

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР
«ХАРКІВСЬКИЙ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

На правах рукопису

Лобзов Леонід Дмитрович

УДК 621.384.6

ДИСЕРТАЦІЯ

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

01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем
Фізико-математичні

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук.
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Л.Д. Лобзов
(підпис)

Науковий керівник: Шуліка Микола Георгійович, к. ф.-м. н., с. н. с.

Харків – 2019

АНОТАЦІЯ

Лобзов Л. Д. «Стабілізація збуджуваних ВЧ полів у Н-резонаторі лінійного прискорювача іонів в умовах мультипакторних явищ».

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем.

Харківський Національний Університет Радіоелектроніки. Харків, 2019.

Національний Науковий Центр «Харківський фізико-технічний інститут»

У дисертаційній роботі представлені результати з отримання стабілізованих ВЧ напруг і полів для прискорення протонів або дейтронів у малогабаритному лінійному прискорювачі «МЛПД-3» з трубками дрейфу, габарити корисних торців яких більше довжини зазорів між ними. Зазначений прискорювач використовується для інструментального активаційного аналізу матеріалів ядерноенергетичних установок та іонного опромінювання цирконієвих оболонок твелів. Зокрема було виконано фізичне обґрунтування нової ВЧ системи для стабілізації збуджуваних ВЧ напруг у Н-резонаторі і полів у прискорювальних зазорах, дослідження у однорідних ВЧ полях вторинно-електронних емісійних (ВЕЕ) властивостей мідних трубок дрейфу та одержання інтенсивних струмів пучків іонів на рівні $\sim 50-100$ мА.

Вперше розраховано, розроблено, виготовлено, змонтовано і настроєно компактну та економічну генераторну ВЧ систему для Н-резонатора лінійного прискорювача іонів (ЛПІ), у якому аксіально-симетричні ВЧ поля між трубками дрейфу повністю оточених однорідними ВЧ полями між їх торцями, задовольняє вимогам довгострокової експлуатації прискорювача МЛПД-3. Тут потужний підсилювальний канал (ПК) для стабілізації прискорювальних електричних полів, може бути одночасно з'єднаним двома незалежними

позитивними зворотними зв'язками (ПЗЗ) з його основними елементами – з резонатором (ПЗЗР) та фідером (ПЗЗФ). Напруги зазначених ПЗЗ в узгоджених умовах складаються у ВЧ пристрій і їх сума подається на вхід ПК.

Робота ПК з будь-яким одним ПЗЗ (ПЗЗР або ПЗЗФ) в режимі відключення напруги ПЗЗФ, здійснюється шляхом повертання площини індуктивної петлі у повітряному коаксіальному фідері, паралельно до його магнітних силових ліній. Відключення напруги ПЗЗР здійснюється за допомогою коаксіального атенюатора.

Дослідження проведено на лінійному прискорювачі іонів, у якому мідні трубки дрейфу вироблені в умовах традиційних технологій – на токарних верстатах з ручним керуванням.

При експериментальному налаштуванні завданого розподілу електричних полів уздовж прискорювальних зазорів використані корисні кільцеві мідні диски, що насаджуються на торці трубок дрейфу. Збільшення зовнішніх діаметрів кожного з дисків визначається завданими значеннями прискорювальних полів у зазорах між трубками дрейфу.

Досліджено, що при збудженні ЛПІ новою ВЧ системою напруги незалежних ПЗЗФ та ПЗЗР мають бути знаходитися у співвідношенні $U_{\text{ПЗЗФ}} \geq 0,25U_{\text{ПЗЗР}}$. При цьому у прискорювальному Н-резонаторі діється безперервне зростання з найменших значень загальних ВЧ напруг і полів. А в однорідних ВЧ полях між поверхнями паралельних торців трубок забезпечується ініціація короткочасного множення та зменшення числа електронів вторинно-електронної емісії найменших енергій (тобто початкові мультипакторні процеси при найменших значеннях ВЧ полів). Але це не заважає стабілізації збуджуваних аксіально-симетричних ВЧ полів, які необхідні для прискорення інтенсивних струмів пучків іонів.

За межами найменших значень однорідних ВЧ полів між торцями трубок множення електронів найменших енергій припиняється. А з їх поверхонь діється звичайна ВЕ емісія електронів більших енергій, число яких дорівнює числу падаючих. У відсутності умов розвитку множення електронів найменших

енергій, частота резонансного ЛПП ($f_{\text{РЕЗ}} = 98,146$ МГц) є стабільною у часі. Це може пояснюватися тим, що основні ємкісні та індуктивні елементи циліндричної резонаторної структури ЛПП утворені міцними конструкціями трубок дрейфу з гребінчастими утримувачами.

Уперше експериментально показано, що процеси короткочасного множення електронів ВЕЕ найменших енергій між торцями трубок дрейфу існують не тільки на самому початку переднього фронту імпульсів ВЧ напруг резонатора, але й на задньому фронті їх спадання до найменших значень. Однак, на протязі довготривалого часу це не було експериментально підтверджено значеннями струмів ВЕЕ з паралельних електродів у резонаторних структурах ЛПП де загальні імпульси ВЧ напруг і полів нарастають з нуля та спадають до найменших значень за законами експоненти.

Уперше для безпомилкової ідентифікації ВЧ розрядів у резонаторі ЛПП, в каскадах імпульсного ПК та фідерних елементів, у лінійній ділянці повітряного фідеру встановлено фідерний перемикач (ФП), що дозволяє у новій ВЧ системі мобільно перемикати підсилювальний канал на резонансний лінійний прискорювач іонів або активне навантаження і навпаки.

Якщо до ПК з'єднаного одним ПЗЗ з фідером, підключається активне навантаження, а в генераторної ВЧ системі будь-які розряди свідомо відсутні, то це однозначно забезпечує гарантії високої електричної міцності і стійкої роботи її ВЧ каскадів, імпульсного модулятора та елементів фідера. У цьому режимі здійснюється калібрування потужності ПК, коли кожній амплітуді напруги падаючої хвилі у фідері відповідає його вихідний рівень.

Якщо до ПК, підключається резонансний прискорювач з'єднаний одним ПЗЗ з резонатором, то на початку наростання з нуля імпульсів ВЧ напруг і полів, між торцями усіх його прискорювальних зазорів, відбувається безперервне множення електронів ВЕЕ з найменшими енергіями. Їх число може досягати електронного замикання торців перших трубок дрейфу (зазору найменшої довжини), відомих як мультипакторні розряди. При цьому здійснюється різкий спад ВЧ напруг резонатора і прискорювальних полів у

зазорах та грубе викривлення його електродинамічних характеристик. Також зменшується число електронів ВЕЕ, найменших енергій, що раз у раз надходять у зазори найменшої та більшої довжини. В таких умовах безперечно, уся відповідальність за виникнення безперервного множення електронів ВЕЕ може бути покладена на прискорювальний Н-резонатор ЛПП. Тобто на паралельні торці значних поверхонь трубок дрейфу та інших корисних діодних проміжків, що можуть бути уведені у прискорювач, або штучно утворених ними з будь-якими його поверхнями.

Набули подальшого розвитку методи реєстрації параметрів імпульсів ВЧ напруг резонатора (U_{PE3}), загальних струмів ВЕЕ (I_{BEE}) та їх енергій, при проходженні електронами спочатку через тонку алюмінієву мішень, а потім реєструються циліндром Фарадея за допомогою електронного осцилографа.

Аналіз нормальних форм імпульсів ВЧ напруг резонатора (U_{PE3}) і загальних струмів ВЕЕ (I_{BEE}), збуджуваних новою ВЧ системою і вимірюваних цифровим двохраневим осцилографом, вперше дозволив установити, що у складі загального імпульсу струму ВЕЕ I_{BEE} присутні такі часткові струми:

- –мультипакторні струми ВЕЕ з найменшими енергіями електронів, що обумовлені короткочасним множенням та зменшенням їх числа з самого початку переднього та майже у кінці заднього фронтів ВЧ імпульсу U_{PE3} ;
- –струми ВЕЕ зміщення з енергіями електронів, утворюваних на протязі крутості переднього та заднього фронтів ВЧ імпульсу U_{PE3} ;
- –звичайні струми ВЕЕ з високими енергіями електронів, що обумовлені максимальними значеннями імпульсу ВЧ напруг резонатора U_{PE3} .

З вищеописуваного виходить, що короткочасні мультипакторні струми електронів на загальному імпульсу струму ВЕЕ (I_{BEE}), це є результат найменших потенційних енергій електронів, що падають на торці трубок, попередньо визначаючи їх коефіцієнти вторинно-електронної емісії (ВЕЕ), як більше одиниці ($K_{BEE} > 1$).

Наявність пригнічених електронних струмів на початку переднього фронту імпульсу ВЧ напруги резонатора лише доказує, що у резонансному ЛПП

з трубками дрейфу, поперечні розміри торців яких більше довжини зазорів між ними, умови розвитку мультипакторних розрядів відсутні.

Як відомо, теорії мультипакторних процесів і розрядів між електродами ізольованого ДП, розглядають кінетичні енергії електронів та їх швидкості, і не розглядають потенційних енергій електронів ВЕЕ, що проходять різні різниці потенціалів за півперіод при переміщенні з одного електрода ДП на другий. Тобто коефіцієнти ВЕЕ електродів, на які попередньо падають електрони з різними потенційними енергіями, взагалі не визначаються такими теоріями.

На основі досліджень умов виникнення мультипакторних розрядів у найменшому зазорі резонатора ЛПП, збуджуваного ВЧ системою, де ПК з'єднаний ПЗЗ з резонатором, було вперше запропоновано розглядати ємкісний діодний проміжок (ДП), що шунтується активним опором вторинно-електронної (ВЕ) мультипакції (R_M), у складі одиночного резонансного контуру і лампового тріода. При цьому існування електронів ВЕЕ з паралельних електродів діодного проміжку забезпечується енергією, що запасується у ОРК.

Уперше для ВЧ системи з додатковим опором ВЕ мультипакції були визначені загальні вирази збуджуваних ВЧ-НВЧ напруг і полів, і кругової частоти коливань, в залежності від значень активного опору ВЕ мультипакції R_M , що визначає різні значення динамічної добротності (Q) одиночного резонансного контуру.

Обґрунтовано і реалізовано метод розгляду потенційних енергій електронів ВЕЕ, що проходять різні значення ВЧ-НВЧ потенціалів між електродами ДП, від фаз кожного півперіоду ($0-180^\circ$) при наростанні або спаданні імпульсів ВЧ напруг резонатора у ЛПП.

Уперше теоретично визначені графічні залежності значень потенційних енергій електронів ВЕЕ від фаз кожного ВЧ-НВЧ півперіоду ($0-180^\circ$), що падають на електроди ДП, попередньо визначаючи їх коефіцієнти ВЕЕ, в початковому інтервалі фаз ($0-65^\circ$) як $K_{ВЕЕ} > 1$, а в інтервалі залишкових фаз ($65^\circ-180^\circ$) як $K_{ВЕЕ} < 1$. Т.ч. доведено, що між електродами ДП, шунтованого активним опором ВЕ мультипакції R_M , у складі резонансного контуру, ініціація множення

та зменшення числа електронів ВЕЕ, в початковому інтервалі фаз (0-65°) і звичайна ВЕЕ в залишкових фазах (65°-180°) кожного півперіоду, при безупинно повторюваних імпульсах ВЧ-НВЧ напруг і полів, є реальними фізичними явищами.

Розроблена нова ВЧ система резонансного ЛПІ, де ПК з'єднаний 2-ма незалежними ПЗЗ з резонатором та фідером з простим керуванням значень їх напруг та фаз, може використовуватися при розробці потужних лінійних прискорювачів іонів для здійснення ядерно-фізичних досліджень, вирішення задач електродерного виробництва енергії і трансмутації ядерних відходів та різних технологічних проектах у народному господарстві.

Відсутність в об'ємі резонансного прискорювача додаткових електродів, що звично уводяться у резонатор з підключенними до них напруг постійних зовнішніх ВЧ джерел, будь якої полярності, а також складних систем автоматичної стабілізації та регулювання ВЧ полів у резонаторних структурах, дозволяє застосовувати нову ВЧ систему повсюдно. При збудженні ВЧ-НВЧ напруг і полів у циклотронах, прискорювачах електронів, клістронах, магнетронах, надпровідних структурах та інше, у яких діодні проміжки з корисними паралельними електродами є їх основними елементами.

Ключові слова: лінійний прискорювач іонів, підсилювальний канал з 2-ма незалежними позитивними зворотними зв'язками, ВЧ-НВЧ напруги і поля, діодний проміжок, вторинно-електронна емісія, мультипакторні явища.

Список публікацій, у яких опубліковані основні результати дисертації:

1. Lobzov L.D., Shulika N.G. Self-exited 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., Овчинников А.В. Влияние мультипакторных разрядов на устойчивость установления автогенераторных ускоряющих полей однорезонаторного линейного ускорителя ионов // Вісник Харківського національного університету 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 Харківського національного університету ім. Каразіна В.Н. 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 ЛУИ // Радиофизика и Электроника. ИРЭ НАН Украины, Харьков. 2007. Т.12. №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 физические исследования» (53). 2010. №2(66). С. 44-47.
7. Lobzov L.D. Parametres 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., Belan V.N., Shulika O.N., Podolak A.P. and Makarova L.N. / Multipactor Discharges in Gaps of the Acceleration Channel and Other Areas of Resonator Structure of the Linear ion Accelerator // Telecommunications and Radio Engineering. 2015. Vol.74. №3. P. 247-159.
9. А.с. 1251782 А СССР МКИЗ Н 05 Н 9/4. Ускоряющая система линейного ускорителя ионов / Лобзов Л.Д., Гусев Е.В., Хижняк Н.А., Шулика Н.Г. №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 / Лобзов Л.Д., Гусев Е.В., Шулика Н.Г., Хижняк Н.А. №4222927/19-01; заявлено 19.01.87; зарегистрировано 01.04.89.

11. А.с.-патент 1700783 А1 СССР МКИЗ Н 05 Н 7/02. Высокочастотный автогенератор / Лобзов Л.Д., Мазалов Ю.П., Шулика Н.Г. №4483736/11-07; заявлено 11.07.88; зарегистр. 22.07.91; опубликовано БИ № 47. 1991. С. 239.
12. Л.Д. Лобзов, Ю.П. Мазалов, Е.В. Гусев, Н.Г. Шулика. Исследование мультипакторных разрядов в резонаторе Н-типа ЛУИ // Труды XIII Совещания по ускорителям заряженных частиц в 2-х томах. Дубна. 1993. Т.1. С.269-273.
13. Л.Д. Лобзов, Н.Г. Шулика. Мультипакторные разряды в резонаторе Н-типа линейного ускорителя ионов // XIV Совещание по ускорителям заряженных частиц. Сборник докладов в 4-х томах. ИФВЭ. Протвино, 25-27 октября 1994 г. Т.1. С. 209-212.
14. Гусев Е.В., Лобзов Л.Д., Логвин В.В., Коваленко В.Ф., Мазалов Ю.П., Шулика Н.Г. ВЧ автогенератор линейного ускорителя ионов // Тезисы докладов 12-го Всесоюзного семинара по линейным ускорителям заряженных частиц. ХФТИ и ХГУ, Харьков, 28-30 мая 1991г. С. 51.
15. Лобзов Л.Д., Гусев Е.В., Шулика Н.Г. Исследование мультипакторных разрядов в резонаторе Н-типа линейного ускорителя ионов // Тринадцатое Совещание по ускорителям заряженных частиц, 13-15 октября 1992г. Аннотации докладов. 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. ИФВЭ. Протвино. 1994. С. 31.
17. Лобзов Л.Д., Толстолужский А.П., Шулика Н.Г. Мультипакторный разряд в электрических полях вакуумированной ячейки ускорителя // Тезисы XIX Международного Семинара по ускорителям заряженных частиц, 12-18 сентября 2005г. Алушта. Крым. 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. Харьков. 2008. С. 94.

19. Гусев Е.В., Лобзов Л.Д., Шулика Н.Г. Автоколебательная система возбуждения ВЧ полей двухрезонаторного линейного ускорителя дейтронов // Тезисы XXI Международного Семинара по ускорителям заряженных частиц, 6–12 сентября 2009 г. Алушта, Крым. Харьков. С. 27.
20. Лобзов Л.Д. Энергетические параметры вторично-электронных процессов в однородных электрических полях ВЧ-СВЧ резонаторной структуры ЛУИ // Тезисы XXIII Международного семинара по ускорителям заряженных частиц, 8-14 сентября 2013г., Алушта, Крым. Харьков. 2013. С. 78.
21. Лобзов Л.Д., Шулика Н.Г., Коваленко В.Ф., Белан В.Н., Шулика О.Н., Подоляк А.П., Макарова Л.Н. Мультипакторные разряды в зазорах ускоряющего канала и на периферии резонаторной структуры ЛУИ // Тезисы XXIII Международного семинара по ускорителям заряженных частиц, 8-14 сентября 2013 г., Алушта, Крым, Харьков. 2013. С. 80.

ABSTRACT

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

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

National Science Center “Kharkiv Institute of Physics and Technology”

In the dissertation paper presents the solutions to the scientific problem of stabilization HF fields for acceleration of protons and deuterons on a small of ions linear accelerator «SLAD-3», with drift tubes, used for instrumental activation analysis of materials of nuclear power plants and ions irradiation of zirconium shell claddings. In particular, the physical substantiation of the new RF system of acceleration and formation of ion beams at the gaps between of the drift tubes of the accelerator «SLAD-3» was performed, which allows obtaining currents of ions at the level of $\sim 50-100\text{mA}$. Also designed, manufactured, tuned into operating mode and used the specified RF system, for the study of multipactor processes and discharges in electric fields LPI with drifting tubes, transverse dimensions of useful end faces, longer clearance gaps between them.

For obtaining stable RF voltages and fields in resonant ILA with drift tubes, for the first time a new compact RF system was developed, where the high stability of axially-symmetric RF fields in the gap between the pipes, surrounded by homogeneous HF fields between their ends, satisfies the requirements of long-term operation of the accelerator. A new modern RF system is created by a powerful amplifier canal (AC), which can be covered by one positive feedback with a resonator (PFBP) or with a feeder (PFBF), as well as, at the same time, two independent PFBP + PFBF. The voltages of the show PFB sum up in the bridge, on the quarter-wave piece of the coaxial cables, from where their sum total to the connected up input of the PA. The disconnection of the PFBF voltage is performed by rotating the plane of its inductive

loop mounted in the feeder, in parallel with its magnetic power lines. The disconnection of the PFBP voltage is carried out by means of its detachment from the show bridge.

The study was conducted on a ion linear accelerator, in which copper tubes of drift with parallel ends, made in traditional technologies - on lathes with manual control. In the experimental setting of the distributed distribution of electric fields in the gaps of the accelerating channel, also used useful circular disks made of copper, planted at the ends of the tubes. The increase in disk diameters is determined by the required field values in each gap.

For the first time, it has been investigated that when the new RF system is excited (voltages of independent PFBR and PFBF are in the ratio of $U_{PFBF} \geq 0.25 U_{PFBR}$), in the ILA has continuous growth, from the lowest values, of the total RF voltages and fields. At the same time, the short-term multiplication of electrons of secondary electron emission (SEE) is ensured between the ends of the drift tubes, which does not interfere with the stability of axially symmetric RF fields in the gaps between them. But outside of the smallest values of homogeneous HF fields, the electron multiplication of SEE is stopped, and from the ends of the tubes is the typical emission of electrons, the number of which is equal to the number of incident ones. Resonance frequency of ILA ($f_{RES} = 98,146\text{MHz}$) is high stability in time, because its capacitive and inductive elements are formed by strong metal structures.

For the first time it was experimentally shown, that processes of short-term multiplication of electrons of SEE (multipactor processes) between the ends of the drift tubes exist not only at the beginning of the front edge of the RF pulse of the cavity voltage of the resonator, but also on the rear edge of its fall to the least values. However, over a long period of time, this was not experimentally confirmed by the values of the SEE currents from parallel electrodes of the resonator, where the total RF voltages and fields, increase from zero and fall under the laws of the exponential.

For the first time, for the error-free identification of HF and VE discharges in the ILA, the output anode-grid contour of the power amplifier canal (AC) and

elements of the feeder, a feeder switch (FS) is installed in it, allowing, if necessary, very fast switching of the PA on the resonant or active load.

If the power amplifier canal, covered by a PFB with a feeder, is connected to frequency-independent, active load, and in this system, any discharges absence, this clearly guarantees the high electrical strength and steady operation of the PA, the pulse modulator and elements of the feeder. In this regime, the calibration of the power of the PA is performed, when each amplitude incident wave in the feeder, corresponds to its output power useful.

If the AC, is connected to an ILA, covered by a PFB with a resonator, or with a feeder, then between the ends of all its accelerating gaps, there is a continuous multiplication of electrons SEE (multipactor processes), reaching the electronic circuit (multipactor discharges) of the smallest gap, the ends of the first tubes drift.

This is accompanied by a sharp fall in the impulses of HF voltages and accelerator fields, and the gross distortion of its resonance parameters. Also, the number of electrons of SEE, emitted in multipactor processes and discharge is decreasing. The decrease in the number of electrons is not simple unambiguous, which is confirmed by various oscillations along top these impulses. In such conditions, undoubtedly, all responsibility for the occurrence of the multiplication of the electrons of the SEE and the distortion of the general RF voltages and fields can be placed on the parallel surfaces of the ends of the drift tubes and other useful spaces inserted into the resonator, or artificially formed with its surfaces.

Further development of the methods for recording the parameters of the pulses of HF voltages resonator (U_{RES}), full the currents of the SEE (I_{SEE}) and their energies, with electrons first pass through a thin metal target, then measured by the Faraday cylinder, using any oscilloscope (cathode-ray or dual-trace).

The analysis of the normal forms of pulses of HF voltages resonator (U_{RES}) and general currents of the SEE (I_{SEE}), measured by a digital two-beam oscilloscope of high sensitivity, for the first time allowed to establish that in the composition of the full current pulse current I_{SEE} , the following part are present:

- short-term multipactor splashes of the multiplication of electrons of the SEE that arise at the beginning of the front edge and almost at the very end of the rear edge of the pulse of the RF voltage U_{RES} ;
- SE currents of displacement, formed during the growth of the anterior and falling of the rear fronts of the pulse of the RF voltage U_{RES} ;
- BE electron currents of large values that arise in accordance with the maximum amplitudes of the pulse of the RF voltage U_{RES} .

From the above goes out, it turns out that the multiplication of electrons at the full a pulse of the current SEE (I_{SEE}), this is the result of the smallest potential energies of the electrons falling on the ends of the tubes, pre-characterizing their SEE coefficients, as $C_{SEE} > 1$.

The presence of these processes, only proves that intensive multipactor processes and discharges, are possible in resonant ILA with drift tubes and large areas of their ends.

As is known, the elementary theories of multipactor processes and discharges, between the electrodes of an isolated diode gap (DG), do not imply the significance of the potential energies of the electrons of the SEE (where the kinetic energies electrons and their velocity are fundamental), moving from one electrode to the other, with different differences potentials. That is in general, the coefficients of SEE electrodes of the DG, are not determined by such theories.

Based on the study of the conditions of multi-packet discharges in a separate gap of the smallest length of the resonator of an accelerator with a HF source, it was proposed to enter a capacitive diode gap (DG) with active resistance SEE of multipacks (R_M) between its electrodes, consisting of a single resonance circuit (SRC) and the tube triode. In this case, the existence of a general SEE to from parallel the electrodes of the DG, is provided by the energy stored in the resonance contour.

For the first time, for the improved new self-oscillating system (SOS), the general expressions of the HF voltages and fields, excited by the laws of the exponential and the circular frequency of oscillations were determined, depending on the values of the resistance of the SE of the multipactor R_M .

The methods of considering the potential energies of electrons of the SEE, that we pass different values of HF potentials from phases (0-180°) of each half-time of time, during increasing or decreasing values of voltage pulses, varying to the laws of the exponential, are substantiated and implemented.

For the first time the graphic dependences of the values of potential energies of electrons of SEE from the phases of each HF half-period (0-180 °), the fall of which on the electrodes of the DG, pre-characterizes their coefficients SEE as $C_{SEE} > 1$, at the beginning of phases (0-65°), and $C_{SEE} < 1$, in residual phases (65°-180°).

It was proved that between the DG electrodes, in the component of the resonance circuit, the multiplication of the electrons of the SEE, in the initial phase interval (0-65 °), and their total emissions in subsequent phases (65°-180°) of each half-period, with continuously repeated pulses of HF voltage, are real physical processes.

A new RF system resonant ILA, can be used for the development of powerful accelerators, for electro-nuclear physics research, for solving the problems of electronucleus power generation and transmutation of nuclear waste and various technological projects in the national economy.

The absence of external high frequency sources in the resonator of ion linear accelerator and systems of automatic stabilization and regulation of voltages and fields, sources of constant voltages, additional electrodes introduced into the resonator, as well as the simplicity of control of the parameters of the new high frequency system, allows it to be used everywhere: in cyclotrons, linear accelerators of electrons, klystrons, magnetrons, superconducting structures and others, in which useful diode gaps, with parallel surface electrodes, are their main elements.

Keywords: ion linear accelerator, amplifier canal with double independent positive feedback, diode gap, RF voltages and fields, secondary electron emission, multipactor phenomena.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	19
ВСТУП.....	20
РОЗДІЛ 1. Збудження ВЧ напруг і полів у лінійних прискорювачах іонів та методи пригнічення множення електронів ВЕЕ між паралельними електродами.....	28
1.1. Методи збудження ВЧ напруг і полів у ЛПП з мультипакторними властивостями мідних трубок дрейфу.....	29
1.2. Методи пригнічення умов множення електронів ВЕЕ між паралельними торцями трубок дрейфу ЛПП.....	31
1.3. Механізм ВЕ розрядів між паралельними електродами ДП ізольованого від резонансної структури.....	38
1.4. Висновки до розділу.....	39
РОЗДІЛ 2. ВПЛИВ МУЛЬТИПАКТОРНИХ ЯВИЩЬ НА ПАРАМЕТРИ ПРИСКОРЮВАЛЬНОГО Н-РЕЗОНАТОРА ЛПП.....	41
2.1. Методи і апаратура для дослідження впливу мультипакторних явищ на установлення ВЧ напруг і полів у ЛПП.....	42
2.2. Викривлення імпульсів ВЧ напруг резонатора при збудженні ЛПП підсилювальним каналом з'єднаного позитивним зворотнім зв'язком з резонатором (ПЗЗР).....	53
2.3. Викривлення імпульсів ВЧ напруг резонатора при збудженні ЛПП ПК з'єднаного ПЗЗ з фідером (ПЗЗФ).....	55
2.4. ВЕ струми з торців трубок дрейфу на завершальній стадії ВЧ тренування ЛПП збуджуваного новою ВЧ системою.....	59

2.5. Досягнення високої стабільності збуджуваних ВЧ напруг і полів у прискорювальному Н- резонаторі ЛПІ.....	62
2.6. Висновки до розділу.....	65

РОЗДІЛ 3. ПАРАЗИТНІ ВЧ РОЗРЯДИ НА ПЕРИФЕРІЇ ЛПІ, ЩО ПРОВОКУЮТЬ МУЛЬТИПАКТОРНІ ЯВИЩА МІЖ ЕЛЕКТРОДАМИ ПРИСКОРЮВАЛЬНИХ ЗАЗОРІВ.....68

3.1. Умови виникнення мультипакторних процесів і розрядів у різних областях ЛПІ збуджуваного новою ВЧ системою.....	72
3.2. Викривлення імпульсів ВЧ напруг резонатора та загальних струмів ВЕЕ, що виходять з ЛПІ при мультипакторних розрядах у різних його областях.....	75
3.3. Висновки до розділу.....	83

РОЗДІЛ 4. ВЕЕ З ЕЛЕКТРОДІВ ДП, НА ЯКІ ПАДАЮТЬ ЕЛЕКТРОНИ РІЗНИХ ЕНЕРГІЙ, ПРИСКОРЕНИХ ПОТЕНЦІАЛАМИ ПОСТІЙНИХ АБО ВЧ-НВЧ ДЖЕРЕЛ.....85

4.1. ВЕЕ з електрода, що перебуває під дією постійного потенціалу та падаючих електронах різних енергій, які регулюються від найменших значень потенціалами першої електронної гармати.....	86
4.2. ВЕЕ з електродів ДП, що перебуває під дією ВЧ-НВЧ напруг та падаючих електронах різних енергій, регульованих такими ж напругами.....	89
4.3. Модель ДП шунтованого активним опором ВЕ мультипакції R_M , у складі лампового тріоду з'єднаного позитивним зворотнім зв'язком з окремим резонансним контуром (ОРК).....	90
4.4. Значення енергій електронів ВЕЕ, що проходять різні різниці ВЧ-НВЧ потенціалів, при переміщенні з одного електрода ДП на другий при їх наростанні у ОРК.....	92

4.5	Значення енергій електронів ВЕЕ, що проходять різні різниці ВЧ-НВЧ потенціалів при переміщенні з одного електрода ДП на другий, при їх спаданні у ОРК.....	96
4.6.	Висновки до розділу.....	99

РОЗДІЛ 5. КЕРУВАННЯ МУЛЬТИПАКТОРНИМИ ПРОЦЕСАМИ І РОЗРЯДАМИ У Н-РЕЗОНАТОРІ ПРИСКОРЮВАЧА МЛПД-3.....101

5.1.	Параметри ВЧ напруг і полів прискорювача МЛПД-3, що збуджується новою ВЧ системою при пригніченні множення електронів ВЕЕ між торцями трубок дрейфу.....	102
5.2.	Керування ВЕ процесами у ЛПП, що збуджується новою ВЧ системою при номінальних напругах ПЗЗР та регульованих напругах ПЗЗФ, від нуля до номінальних значень.....	107
5.3.	Вимір імпульсів ВЧ напруг Н-резонатора та загальних струмів ВЕЕ, що виходять з нього при стабілізації параметрів ВЧ системи і прискорювача МЛПД-3 в цілому.....	113
5.4.	Висновки до розділу.....	118

ВИСНОВКИ.....120

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....124

ДОДАТОК А. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....135

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- АС – автоколивальна система
- ВЧ – висока частота
- ВЕ – вторинні електрони
- ВЕЕ – вторинно-електронна емісія
- ДП – діодний проміжок
- $K_{\text{ВЕЕ}}$ – коефіцієнт ВЕЕ
- ККД – коефіцієнт корисної дії
- ЛПІ – лінійний прискорювач іонів
- НВЧ – надвисока частота
- ОРК – одинокий резонансний контур
- ПК – підсилювальний канал (каскад)
- ПЗЗ – позитивний зворотний зв'язок
- ПЗЗР – ПЗЗ з резонатором
- ПЗЗФ – ПЗЗ з фідером
- Q_0 – добротність власна
- Q – добротність динамічна
- R_M – активний опір ВЕ мультипакції

ВСТУП

Актуальність теми. Лінійні прискорювачі іонів (ЛПІ), на базі об'ємних резонаторів ($Q_0 \gg 1$), що спочатку розроблялися як інструмент для фундаментальних досліджень у ядерній фізики та фізики елементарних частинок, мають великий попит у прикладних застосуваннях. Одною з небажаних проблем при створенні таких ЛПІ з трубками дрейфу, поперечні габарити паралельних торців яких більше довжини зазорів між ними, виявляється і у теперішній час. Як відомо відтоді, при збудженні ВЧ напруг резонатора і електричних полів між трубками дрейфу, на окремих ділянках поверхонь їх торців автоматично утворюються умови емісії електронів, що множаться, притаманної майже усім обладнанням, що використовують ВЧ поля у вакуумі. Виходячи з цього, було припущено, що множення електронів між паралельними торцями трубок, обумовлено електронами вторинно-електронної емісії (ВЕЕ), число яких може досягати їх електронного замикання, відомого як паразитні вторинно-електронні (ВЕ) розряди (в англійській термінології – *multipactor phenomenons, effect*).

Однак, це не було підтверджено струмами електронів різних енергій, що падаючи на мішень-електрод попередньо характеризують його коефіцієнт ВЕЕ ($K_{ВЕЕ}$), як більше одиниці ($K_{ВЕЕ} > 1$) при найменших ВЧ напругах, так і менше одиниці ($K_{ВЕЕ} < 1$) при більших їх значеннях. Тут слід зауважити, що струми електронів ВЕЕ можуть й не досягати паразитних розрядів, але наявність процесів множення електронів, це фактори грубого викривлення у прискорювальних зазорах аксіально-симетричних ВЧ полів, які знаходяться в повному оточенні однорідних ВЧ полів між паралельними торцями трубок. Якщо не вживати заходів по усуненню множення електронів ВЕЕ, то формування інтенсивних пучків іонів та їх прискорення буде суттєво зіпсовано.

На сьогодні є досить, підібраних експериментально, способів пригнічення мультипакторних розрядів у ЛПІ де однорідні ВЧ поля утворюються паралельними поверхнями торців трубок дрейфу. При цьому виникнення та

керування множенням електронів ВЕЕ з мідних електродів досліджувались не достатньо. Такі ЛПП з традиційними ВЧ генераторами та автоколивальними системами (АС) мають свої переваги й недоліки, загальним з яких є низький коефіцієнт корисної дії (ККД) їх прискорювальних резонаторів.

Альтернативою відомим малоефективним методам давлення умов множення електронів ВЕЕ є застосування власних ВЧ напруг і полів, що мають безперервно наростати у ЛПП з мінімальних значень. При цьому автоматично забезпечується, як пригнічення умов множення електронів ВЕЕ між торцями трубок, так і збудження стабілізованих азимутально-симетричних ВЧ полів у прискорювальних зазорах.

Раніше були запропоновані теорії ВЕЕ розряду між електродами діодного проміжку (ДП) ізольованого від резонаторної структури. Тезами таких теорій також було припущення про допустимість ВЕЕ з паралельних електродів ДП, поперечні габарити яких більше відстані між ними.

При усталеній однорідній ВЧ напруженості між електродами були отримані окремі вираження для швидкостей прискорених електронів та їх кінетичних енергій. Але це ніяк не пов'язано з потенціальними енергіями первинних електронів найменших та більших значень, що падають в кожному періоду часу на паралельні електроди ДП попередньо характеризуючи їх коефіцієнти вторинно-електронної емісії (ВЕЕ), як $K_{ВЕЕ} > 1$, так і $K_{ВЕЕ} < 1$.

Як добре відомо, залежність коефіцієнта ВЕЕ мішені (електрода), що знаходиться під дією постійного прискорювального потенціалу, обумовлена первинними електронами, емітованих першою електронною гарматою де вони попередньо проходять відносно повільно різні різниці потенціалів найменших та більших значень, а потім падають на цю мішень. Цілком зрозуміло, що експериментальна залежність коефіцієнтів ВЕЕ електродів ДП, що знаходиться під дією періодичних синусних ВЧ полів, може бути визначена енергіями попередньо падаючими первинними електронами, значення яких змінюються від найменших до найбільших амплітуд за законами експоненти.

Теоретичне розв'язання цього питання можливо в ДП з паралельними електродами, який шунтується активним опором ВЕ мультипакції R_M у складі окремого резонансного контуру (ОРК) і лампового тріода при збудженні ВЧ-НВЧ напруг та полів у прискорювальних зазорах.

З вищевикладеного виходить, що розробка нових ВЧ систем для збудження стабілізованих ВЧ напруг резонатора та аксіально-симетричних ВЧ полів у прискорювальних зазорах ЛПП, а також методів пригнічення множення електронів ВЕЕ між торцями трубок для формування інтенсивних пучків іонів та їх ефективного прискорення, є безсумнівно актуальними.

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:

- 1) Програма, яка виконувалась за Постановою Бюро Відділення ядерної фізики та енергетики НАН України від 13 червня 2006 року в рамках теми: “Розробка сильнострумowego радіаційно-чистого прискорювача протонів для електроядерних технологій”, (шифр теми Ш-6-06), ИПЕНМП ННЦ ХФТІ, (2006-2010), № г/р – 080906UP0010.
- 2) Програма, яка виконується 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 Ш-6-11) ИПЕНМП ННЦ ХФТІ, (2011-2015), № г/р – 0111U009560.

Дисертант у зазначених роботах виступав у якості виконавця.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є фізичне обґрунтування вибору генераторної ВЧ системи для резонансного лінійного прискорювачі іонів, яка б забезпечувала стабілізацію збуджуваних ВЧ аксіально-симетричних полів між трубками дрейфу та пригнічення мультипакторних явищ між паралельними торцями трубок дрейфу, поперечні габарити яких більше довжини зазорів між ними.

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

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

- провести вивчення викривлень імпульсів ВЧ напруг Н-резонатора, збуджуваних різними ВЧ системами при мультипакторних розрядах у різних його областях.

- запропонувати таку електричну модель ДП, де можуть бути враховані ВЧ енергії, що витрачаються на існування електронних струмів ВЕЕ.

- розглянути залежність коефіцієнта ВЕЕ ($K_{ВЕЕ}$) паралельних електродів ДП, від значень потенційних енергій електронів, що падають на них (у статусі первинних), попередньо характеризуючи їх коефіцієнти 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 та вхідним опором ЛПП, а також настроїти її у режим стабілізації збуджуваних ВЧ полів.

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

Предметом дослідження є процеси стабілізації збуджуваних 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 і 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 підсилювального каналу (ПК) регулюється параметрами напруг 2-ох незалежних позитивних зворотних зв'язків (ПЗЗ), що частково 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. Аналіз викривлених імпульсів ВЧ напруг резонатора та загальних струмів ВЕЕ, що виходять з нього, дозволив, на відміну від відомих методів, стверджувати, що у ЛПП існують ще й паразитні ВЕ розряди на його периферії. Разом з мультипакторними явищами між торцями трубок дрейфу вони унеможливають зростання ВЧ напруг резонатора із найменших значень.

3. Отримала подальший розвиток модель діодного проміжку, шунтованого активним опором вторинно-електронної (ВЕ) мультипакції у складі лампового тріоду 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 напівперіодах фаз (0-180°) та переміщуються з одного електрода діодного проміжку на другий, при загальному наростанні або спаданні коливань у резонансному контурі.

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

присутні електрони ВЕЕ як з найменшими значеннями енергій ефективно пригнічених, так і з більшими значеннями енергій.

Практичне значення одержаних результатів:

Результати наведених в дисертації експериментальних досліджень стабілізації збуджуваних ВЧ напруг і полів 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 лінійних прискорювачів іонів для промисловості, медицини, біології, матеріалознавства, а також вдосконалення існуючої ВЧ техніки для народного господарства.

Стабілізація збуджуваних аксіально-симетричних ВЧ полів у зазорах між торцями трубчастих електродів ЛПП при використанні нової ВЧ системи, де ПК з'єднаний 2-ома незалежними ПЗЗ з власними ВЧ структурами (резонатором та фідером), дозволяє повністю розв'язати проблему паразитного мультипактора. При цьому відмова від відомих методів пригнічення мультипакторних розрядів у лінійному прискорювачі іонів дозволяє збільшити майже на порядок значення прискорених струмів пучків іонів високих енергій.

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 і тез доповідей на міжнародні конференції та семінари за темою дисертації.

У роботі [1, 11] – здобувач брав участь у розробці нової ВЧ системи для малогабаритного лінійного прискорювача дейтронів МЛПД-3, що 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 та брав участь у дослідженнях впливу мультипакторних

явищ на стійкість стабілізації ВЧ напруг і полів у ЛПП. У роботах [4, 17, 7, 20], здобувач брав участь у виборі моделі ДП шунтованого опором ВЕ мультипакції R_M , у складі відомої ВЧ системи лампового тріода і одинокого резонансного контуру при збудженні наростаючих або спадаючих полів. У роботі [5, 18] – готував і брав участь у дослідженні методу керування мультипакторними процесами і розрядами у ЛПП, збуджуваного новою ВЧ системою. У роботі [6, 19] – здобувач брав участь в розробці і реалізації нової схеми збудження ВЧ напруг і полів у 2-ох резонаторному ЛПП, що створюється в ІПЕНМП ННЦ «ХФТИ». У роботі [8, 21] – брав участь у дослідженні розвитку паразитних ВЕ розрядів у ЛПП, збуджуваного новою ВЧ системою при штучному виникненні одного з розрядів на його периферії. 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 і циліндричних стінок та оформленні авторських свідчень. При оформленні авторського свідчення - патенту [11], здобувач вивчав відомі ВЧ методи пригнічення паразитних ВЕ розрядів у ЛПП і резонаторних структурах інших радіофізичних приладів. У роботах [12, 14] здобувач брав участь у дослідженнях впливів мультипакторних явищ при різних напругах у резонаторі, які збуджувались як стандартним генератором, так і новою ВЧ системою. У роботах [13, 15, 16] здобувач брав участь у дослідженнях впливу мультипакторних явищ з початку ВЧ тренування резонатора у режимі роботи ПК з будь яким одним ПЗЗ так і новою ВЧ системою. Роботу [20] – здобувач виконав самостійно.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи були представлені і отримали позитивні відгуки на міжнародних конференціях та семінарах:

ХІІ Всесоюзном семинаре по линейным ускорителям заряженных частиц, ХФТИ и ХГУ, г. Харьков, 28-30 мая 1991 [14];

Тринадцатом совещании по ускорителям заряженных частиц, ОИЯИ, Дубна, 13-15 октября 1992 [15];

XIV совещании по линейным ускорителям заряженных частиц, Протвино, 25-27 октября 1994 года [16];

XIX Международном семинаре по ускорителям заряженных частиц, 12-18 сентября 2005 года, Алушта, Крым, Харьков, 2005 [17];

VI конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, 25-29 февраля 2008 года, Харьков, 2008 [18];

XXI Международном семинаре по ускорителям заряженных частиц, 6-12 сентября 2009 года, Алушта, Крым, Харьков, 2009 [19];

XXIII Международном семинаре по ускорителям заряженных частиц, 08-14 сентября 2013 года Алушта, Крым, Харьков, 2013г. [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] і 1 патенті [11]. 2 статті [7, 8], опубліковані у спеціалізованих наукових виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз Scopus, 10 доповідей та тез на наукових конференціях 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.

РОЗДІЛ 1

Збудження ВЧ напруг і полів у лінійних прискорювачах іонів та методи пригнічення множення електронів ВЕЕ між паралельними електродами

Сучасні лінійні прискорювачі важких частинок відіграють провідну роль у розвитку фундаментальних досліджень [1-3] та вирішенні проблем безпечної ядерної енергетики [4-6]. Малогабаритні лінійні прискорювачі іонів знаходять широке застосування для прикладних цілей у різних областях техніки, медицини [7-9] та реалізації багатьох радіаційних технологічних процесів у промисловості [10-12]. До таких процесів ставляться методи активаційного аналізу із застосуванням ядерних реакцій під дією прискорених протонів, дейтронів, нейтронів або багатозарядних іонів і ізотопного аналізу хімічних елементів. При цьому розширення сфер використання малогабаритних ЛПП пов'язане з підвищенням їх коефіцієнта корисної дії, стійкої роботи у часі, зниження різного роду фінансових витрат на їх виготовлення та експлуатацію.

Для багатьох технологічних застосувань потрібні прискорені іони з енергією від одиниць до десятків мегаелектронвольт і середнім струмом у пучку від десятків до сотень мікроампер.

Зазначені параметри пучків можуть бути отримані за допомогою малогабаритної прискорювальної структури на базі Н-резонатора [13-15]. Збудження ВЧ напруг і полів у такому ЛПП може забезпечуватися компактною генераторною системою, з необхідним числом ВЧ каскадів.

В цьому випадку ВЧ збудження резонаторної структури може забезпечуватися одним ємкісним або індуктивним елементом зв'язку, або їх сполукою у вигляді резонансного електричного контуру [16, 17].

Регулюючи ступінь зв'язку з відповідними складовими власних електромагнітних полів резонатора досить просто реалізується узгодження його вхідного опору з хвильовим опором коаксіального фідера. При цьому способи

ВЧ збудження однорезонаторної структури ЛПІ і прискорення пучків іонів визначаються умовами збереження високої стабілізації та стійкості його електродинамічних параметрів у часі [18,19].

1.1. Методи збудження ВЧ напруг і полів у ЛПІ з мультипакторними властивостями мідних трубок дрейфу

При загальних вимогах до енергетичного спектру, формі і розмірам прискорених пучків іонів, наприклад, при проведенні активаційного аналізу матеріалів, для ВЧ збудження резонансної структури лінійного прискорювача іонів, може застосовуватися відома автоколивальна система (АС) де потужний підсилювальний каналу (ПК) з'єднаний одним позитивним зворотним зв'язком з резонатором (ПЗР). При цьому забезпечується основна перевага ВЧ збудження ЛПІ – його резонансна частота однозначно визначається формами й геометричними розмірами резонаторної структури і металевих трубок дрейфу, виготовлених з міді високої якості. У цьому випадку так само, як і в будь-якому ВЧ автогенераторі без систем стабілізації його вихідних параметрів, наявність у ЛПІ дестабілізуючих факторів, є перешкодою генерації імпульсів ВЧ напруг резонатора і полів у прискорювальних зазорах [20].

Оскільки з прискорювальною структурою ЛПІ збуджуваного ПК з'єднаного одним позитивним зворотним зв'язком (ПЗЗ) з резонатором (ПЗР), підключеного до його вхідного контуру, то будь-які суттєві зміни параметрів електродів прискорювальних зазорів у резонаторі, де існують мультипакторні явища, можуть впливати також і на установлення стійкої роботи ПК у цілому [21-23]. Тому що це супроводжується різким порушенням у часі резонансного опору прискорювального резонатора ЛПІ, то викривлення умов погодженого з ним ПК, відбувається автоматично [24]. При цьому у фідері виникають відбиті хвилі ВЧ напруг, які звертаються від прискорювача до вихідного контуру ПК, порушуючи і його стійку роботу.

Вплив на поведінку дестабілізованої резонаторної структури, як кінцевого навантаження ПК, зберігається й при зменшенні числа його попередніх ВЧ каскадів. А при збудженні резонатора прискорювача ПК з'єданого ПЗЗ з резонатором, вплив паразитних факторів, що виникають при перехідних процесах установа, збуджуваних у ньому імпульсів ВЧ напруг, стає максимально шкідливим. Якщо паразитні фактори у резонаторі відсутні, то це може бути предметом повсюдного прагнення до реалізації такої ВЧ системи резонансного ЛПП [25-26].

Таким чином, для однорезонаторного прискорювача з автоколивальною системою ВЧ збудження, можна відмовитися від великого (7-10) числа ВЧ підсилювальних каскадів. При цьому можливо зменшення їх числа від 1-го до 3-ох, відповідно до необхідного рівня ВЧ напруг резонатора і полів у прискорювальних зазорах із припустимими нестабільностями їх параметрів.

У скороченому ПК зменшуються енергетичні витрати на накальні ланцюги меншого числа генераторних ламп, на системи їх охолодження та інші активні витрати.

При цьому пусконаладжувальні роботи зі збудженням ВЧ напруг і полів у резонаторі ЛПП та прискорення важких іонів можуть проводитися у ручному режимі. У такому випадку можливе формування особистих вимог до систем автоматичного регулювання параметрів ВЧ напруг і полів у ЛПП, а також прецизійних характеристик пучків прискорюваних іонів.

Головною вимогою до збудження ВЧ напруг і полів у однорезонаторному ЛПП є не тільки стабілізація його загальних електродинамічних параметрів у часі, але й стійка робота потужної ВЧ системи з коаксиальним фідером [27].

При цьому повинні забезпечуватися доступні технологічні можливості проектування та розробці цих структур, використання традиційних технологій виготовлення їх елементів та очевидна простота експлуатаційного обслуговування при високій надійності довгострокової роботи лінійного прискорювача іонів у часі.

1.2. Методи пригнічення умов множення електронів ВЕЕ між паралельними торцями трубок дрейфу ЛПП

З багатьох робіт [20-27] випливає, що в умовах резонаторних прискорювальних структур ЛПП, головним фактором спотворення його стійкої роботи та різкого спадання ВЧ напруг і полів до мінімальних значень є ВЕ процеси і розряди. Їх розвиток відбуваються між торцями трубчастих електродів, з ідентичними ВЕ емісійними здібностями їх матеріалу. В окремих монографіях [28,29] стверджується, що між трубками дрейфу прискорювача мають бути аксіально-симетричні ВЧ поля, а для усунення ВЕ дестабілізуючих факторів у ЛПП, рекомендуються спеціальні заходи.

Ефективним методом подолання мультифакторних розрядів у ЛПП, є усунення паралельних поверхонь торців трубок дрейфу. Зовнішні циліндричні поверхні трубок, разом з їх паралельними торцями, можуть бути змінені на еліпсну форму [19]. При цьому крайки торців сусідніх трубок дрейфу набувають овальні форми, що приводить до зменшення їх поверхонь, де б могли збуджуються однорідні ВЧ електричні поля і умови множення електронів ВЕЕ. Однак, виготовлення таких трубок пов'язано з наявністю складних електронних і кінематичних механізмів із числовим програмним керуванням, що є недоліком методу. Це приводить до істотного подорожчання вартості виготовлення елементів прискорювача й, відповідно, прискорених пучків іонів.

Експериментальні методи досліджень показують [30], що пригнічення паразитних мультифакторних розрядів у ЛПП може забезпечуватися введенням у резонатор додаткових електродів із подачею на них постійних напруг будь якої полярності. Однак, це вимагає обліку реальної конструкції прискорювача, щоб присутність цих електродів не спотворювали поздовжні компоненти ВЧ полів на осі прискорювальних зазорів. І це є важливим недоліком цього методу.

Подолання паразитних ВЕ розрядів між торцями трубок дрейфу, можливо також і за умови уведення в прискорювальну структуру додаткових ВЧ напруг від зовнішнього генератора [31]. При цьому, наявність у прискорювачі напруг

іншої частоти викликає осциляції результуючих напруг, що залежать від різниці їх частот [32], приводячи до порушення ВЧ полів у зазорах ЛПП. Для забезпечення їх стабільності у часі, потрібно підстроювання резонансної частоти прискорювача в ручному режимі, системою автоматичного регулювання або включенням і відключенням додаткового ВЧ генератора. В остаточному підсумку це також є частковим розв'язанням зазначеної проблеми і не може вважатися вичерпним, залишаючи завдання стабільного та стійкого збудження ВЧ напруг і полів у однорезонаторному прискорювачі актуальним і по теперішній час [33,34].

Оскільки порушення стабілізації стійких ВЧ напруг і полів у резонаторній структурі ЛПП, обумовлено швидкими змінами параметрів його власних прискорювальних зазорів, то вивчення умов виникнення паразитних мультипакторних струмів в однорідних ВЧ полях, що оточують ВЧ поля в зазорах між трубками дрейфу, потребує додаткових експериментальних досліджень.

Виникнення ВЕ процесів і розрядів в прискорювальних зазорах ЛПП змінює в першу чергу їх власні параметри, що вимагає негайного вживання спеціальних заходів [35]. Змінюються також електродинамічні параметри відповідної резонаторної комірки й усієї структури резонансного прискорювача в цілому. При цьому різко порушується розподіл електричних полів по прискорювальних зазорах структури, змінюється її резонансна частота, резонансний та вихідний опори. Тривалий час опромінення електронами різних енергій електродів, приводить до їх інтенсивного нагрівання, що може супроводжуватися вигоранням ділянок їх матеріалу у вигляді плям [36].

Порушується також і стійкість роботи системи ВЧ збудження ЛПП. Неузгодженість входу резонаторної структури лінійного прискорювача з вихідним опором кінцевого ВЧ каскаду та хвильовим опором фідера приводить до виникнення в ньому стоячих хвиль, утворених напругами падаючих та відбитих хвиль. Як правило, це викликає ВЧ розряди в анодно-сітчатому контурі кінцевого підсилювального каскаду та пробої в елементах фідерного

тракту [37]. Це є також досить небезпечним для скляних або керамічних ВЧ генераторних ламп, що можуть руйнуватися через швидке за короткий проміжок часу локального надходження енергії у зону пучності напруги стоячої хвилі. При більших інтенсивностях ВЕ розрядів у прискорювальних зазорах у ЛПП може погіршуватися вакуум, що вимагає уникнення серйозних аварійних ситуацій та вживання відповідних заходів по відключенню імпульсних модуляторів лінійних прискорювачів електронів [38]. Оскільки зазначені порушення можуть відбуватися також і у ВЧ каскадах ПК, то однозначне виявлення місць виникнення ВЕ та ВЧ розрядів може бути досить утрудненим.

У багатьох знову створюваних багатозазорних однорезонаторних структурах, що прискорюють електрони й іони, від енергій інжекції, відповідальність за те, що відбуваються зриви викривлених ВЧ напруг через виникнення ВЕ і ВЧ розрядів, часто покладається на потужні ВЧ системи. Під сумнів ставляться розрахунки робочих режимів підсилювальних або генераторних каскадів та елементів зв'язків між ними. При цьому вживаються спроби змінення еквівалентних схем ВЧ систем [39].

При наявності паразитних ВЕ розрядів, що супроводжуються звуковими сигналами в загальній системі ЛПП, уживають пошуки ділянок їх виникнення, та розробляються акустичні методи діагностики [40-41]. Для закритих конструкцій резонаторних ЛПП та інших електрофізичних установок із традиційними ВЧ-НВЧ системами (прискорювачі електронів з паралельними діафрагмами та клістронними генераторами, магнетронах із зосередженими ємкостями, утворюваних окремими ділянками паралельних електродів [42-45]), виконання цих заходів є не більш ніж підтвердженням наявності існування в них паразитних ВЕ процесів і розрядів.

У відомому методі ВЧ збудження однорезонаторного ЛПП зі швидко змінними електродинамічними параметрами, за рахунок виникаючих паразитних ВЧ розрядів, використовується зміна опору резонансного навантаження. При цьому паралельно до фідера ЛПП підключається потужний активний баластовий опір [46,47], що поглинає ВЧ потужність як падаючих так

і зворотних хвиль, що рухаються у фідері. Цілком очевидно, що ефективність використання такого способу збудження загального ВЧ навантаження (як прискорювачів, так і плазмових [48-50]), то подолання паразитних ВЕ розрядів, не може бути ефективним через великі активні втрати ВЧ потужності і досить малому ККД створеної потужної резонансної ВЧ установки. У теперішній час, використання такого баластового опору в прискорювальній техніці не рекомендується офіційно [2].

Серед результатів по подоланню ВЕ розрядів у прискорювальних структурах іонів слід зазначити, що окремі дослідження, спрямовані на зміну емісійних властивостей трубок дрейфу. Здійснюється це нанесенням покриттів на трубки, що збільшують роботу виходу у вакуум попередньо збуджених електронів та різко знижують коефіцієнт ВЕЕ таких трубок.

У дослідженнях Зайдина Д.Г. [51] показана можливість подолання ВЕ розряду шляхом нанесення на мідні електроди тонкого шару сірки. Нанесений випаром у вакуумі або шляхом осадження із сильно розведеного розчину сірки, такий шар може виявитися достатнім для пригнічення множення електронів ВЕЕ. Автор зв'язує це з тим, що сірка утворює міцне сполучення з матеріалом, і пояснює нанесення шару сірки, як ліквідацію на електродах локальних місць емісії електронів, а не зменшенням коефіцієнта ВЕЕ матеріалу електродів. У якості матеріалів покриття може також застосовуватися графіт із $K_{ВЕЕ} = 0,4$, або ряд лужно-активних елементів: барій – $K_{ВЕЕ} = 0,83$; цезій – $K_{ВЕЕ} = 0,72$; літій – $K_{ВЕЕ} = 0,5$ і інші із $K_{ВЕЕ} < 1$ [52].

Однак, застосування таких покриттів для пригнічення ВЕ розрядів у більшості резонаторних структур не виправдовується через різке зниження їх динамічних добротностей і, відповідно, різкого падіння амплітуд збуджуваних ВЧ напруг і полів. До того ж технології нанесення таких пухких покриттів на поверхні металевих поверхонь електродів, дотепер залишаються не зовсім ефективними, що не дозволяє рекомендувати їх для повсюдного використання в електричних та радіофізичних ВЧ-НВЧ приладах і установках з високою добротністю.

Уживають також більш-менш успішні спроби покривати робочі поверхні електродів дуже тонким шаром титану [53], що характеризується коефіцієнтом ВЕЕ менше одиниці. Однак, велика сорбційна здатність титану, може дуже погано відбитися на вакуумній ізоляції, тому такий метод подолання розрядів потребує додаткових експериментальних досліджень. Відомості про найбільш сучасну методику нанесення особливо міцного покриття тонким шаром нітриду титану (TiN) на поверхні електродів лінійного прискорювача Лос-Аламоскій Національної лабораторії, досить обмежені. Відзначається при цьому, що швидкість вакуумної відкачки об'єму резонатора прискорювача була суттєво збільшена. Переконливих доказів про вплив такого покриття на умови пригнічення емісії вторинних електронів, що можуть множитись і поліпшення стійкості установа ВЧ напруг і полів у прискорювачі, не надано. Пригнічення ВЕ розрядів у прискорювачах заряджених частинок можливо й при усуненні загальної паралельності електродних поверхонь прискорювальних комірок тороїдних форм [55].

Оскільки виникнення ВЕ розрядів відбувається з самого початку наростання електричних полів, в умовах відомих традиційних методів ВЧ збудження ЛПП, то важливе місце в пригніченні цих розрядів, займають дослідження з вивчення початкових змін характеру цих полів.

До них належить уведення в область прискорювальних зазорів додаткового плескатога електрод [55], ізолюваного від корпусу та розташовуваного в площині симетрії резонатора так, щоб його власна резонансна частота практично не змінювалася. При цьому на цей електрод, подаються постійні напруги $\sim (4 - 6)$ кВ.

Однак, наявність металевго електрода у прискорювача – це поява ще одного додаткового ВЕ емітера у ВЧ електричних полях, що взагалі не може поліпшувати його електродинамічні параметри в цілому.

У деяких випадках застосовується подача напруг постійних джерел на парні (непарні) трубки дрейфу ізолюваних від корпусу. Основною умовою для

застосування таких напруг є їхній малий вплив на поздовжні складові прискорювальних ВЧ полів.

Результати досліджень стійкості ВЧ напруг і полів при цьому обмежуються експериментально підібраними значеннями постійних напруг. Однак, це ускладнює технології виготовлення його елементів і інших витрат виробництва, що збільшує вартість лінійного прискорювача та іонів, що прискорюються.

У методі ВЧ збудження 2-ох резонаторного прискорювача протонів УРАЛ-5 [56], для забезпечення його стійкої роботи та пригнічення умов розвитку мультипакторних процесів та розрядів, використовується подача напруг постійного джерела $\sim (4\div 6)$ кВ на парні трубки дрейфу, що ізольовані від корпусу прискорювальної структури.

Подача постійної напруги на один з електродів резонаторної структури з одним прискорювальним зазором також використовується в методі стійкого ВЧ збудження імпульсного лінійного прискорювача (ЛП) електронів ЛП-6 [57, 58]. Здійснюється це шляхом поділу зовнішньої циліндричної поверхні на дві частини меншого й більшого діаметрів, одна з яких із прискорювальним патрубком частково входить в іншу з таким же патрубком.

Такі прискорювачі розробляються Новосибірським інститутом ядерної фізики Російської Академії Наук. Лінійний прискорювач типу ЛП-6, із зазначеним методом подолання ВЕ розрядів є базовою моделлю багатьох технологічних прискорювачів для промисловості розроблювальних з 1970 року й по теперішній час [59]. Тут також потрібна наявність джерела постійної напруги й двох зовнішніх частин резонаторної структури із зазором по високій частоті на периферії. На практиці це суттєво ускладнює конструкцію прискорювача, його налагодження та експлуатаційне обслуговування.

У лабораторії високих енергій (ОИЯИ, Дубна, Россия) на інжекторі синхрофазотрону (однорезонаторного ЛП на 20 Мев) – для пригнічення ВЕ розрядів у резонаторній структурі протонів Е-типу з послідовною сполукою прискорювальних зазорів, застосована ускладнена автоколивальна система ВЧ

збудження [20-22]. Вона утворена двома ВЧ підсилювальними каналами з 2-ма ланцюгами ПЗЗ з резонатором в різних його кінцях. Напруги ПЗЗ з одного елемента зв'язку, що установлений на вході прискорювальної структури, підключаються до першого ПК. Напруги з елемента зв'язку другого ПЗЗ, установленому на іншому кінці структури, підключаються до другого ПК.

Однак, такий спосіб не може бути використаний для ВЧ збудження резонатора Н-типу з паралельною сполукою прискорювальних зазорів, трубки дрейфу яких укріплені на 2-ох гребінчастих тримачах розташованих вертикально у діаметральній площі резонатора [13,60]. Електронне замикання електродів будь якого із зазорів між трубками дрейфу у такій структурі, приводить до різкого падіння резонансного опору резонатора і значень ВЧ полів в усіх зазорах прискорювального каналу. При цьому сигнали ПЗЗ можуть бути настільки малі, що їх неможливо відрізнити від рівнів наведень у вимірювальній апаратурі. Незважаючи на уявну достатність методів пригнічення ВЕ процесів і розрядів у ВЧ-НВЧ полях прискорювальних структур, усі вони малоефективні й не сприяють підвищенню коефіцієнта корисної дії ЛПП. Крім того зазначені методи подолання ВЕ розрядів, не дозволяють до кінця зрозуміти механізм їх виникнення між паралельними електродами [61, 62].

Залишається також не з'ясованим вплив швидкостей збуджуваних ВЧ напруг і полів у лінійних прискорювачах іонів на умови виникнення вторинно-електронних розрядів, обумовлених різким змінням параметрів резонатора. Аналіз експериментальних методів досліджень стійкості стабілізованих ВЧ напруг і полів, збуджуваних у резонаторних структурах ЛПП, дозволяє зробити висновок, що низка питань, які стосуються паразитного впливу мультипакторних явищ на викривлення імпульсів ВЧ напруг резонатора та аксиально-симетричних ВЧ полів у прискорювальних зазорах між трубчастими електродами прискорювача іонів, не знайшли належного висвітлення в науковій літературі.

1.3. Механізм ВЕ розряду між паралельними електродами ДП ізольованого від резонаторної структури

Незважаючи на простоту пропонованих способів пригнічення мультипакторних процесів і розрядів у ЛПП, їх використання на практиці не забезпечує потрібної стабільності збуджуваних ВЧ напруг і полів у резонаторі та високих темпів прискорення важких іонів.

І тут слід зазначити на недоліки ранніх елементарних теорій, що розглядають мультипакторні явища між електродами ізольованого ДП, при прикладених синусоїдальних напругах зовнішнього ВЧ джерела й досить умовній кількості введених допущень [63-67]. В їх число входять напівемпіричні припущення про те, що з електродів які опромінюються первинними електронами різних енергій, існує вторинно-електронна емісія. А умови установа ВЧ полів між електродами ДП не залежать від інтенсивності паразитних ВЕ процесів і розрядів. Але це не відповідає відомим експериментальним результатам.

В основі цих теорій відсутні значення мінімальних напруг, з яких починається ВЕЕ з паралельних електродів ДП, а величини потенціальних енергій електронів, що здобуваються при проходженні різних ВЧ-НВЧ потенціалів між електродами падають на них (у статусі первинних) у цих напівемпіричних теоріях зовсім не наведені. У зв'язку з цим і попередні ВЕ емісійні здібності цих електродів, не можуть бути точно визначені.

Разом з тим відомо [68] щоб деякі електрони, з енергією спокою E_0 , могли виходити з тіла, їх необхідно попередньо збудити, тобто передати їм тим або іншим способом додаткову енергію величини ΔE , щоб їх загальна енергія в збудженому стані ($E_0 + \Delta E$) була достатньою для виходу із тіла. Тут слід урахувати, що переміщення електронів з одного з електродів ДП на інший, відбувається при різних різницях потенціалів. Тому і додаткова енергія, що попередньо передається електронам тіла, повинна бути також потенціальною, від первинних електронів, що пройшли різні різниці потенціалів [69].

Таким чином, теоретичне дослідження виникнення множення електронів ВЕЕ з паралельних електродів резонансного прискорювача іонів при падінні на них електронів різних енергій вимагає такої електричної моделі, у якій би враховувалися методи збудження ВЧ-НВЧ напруг і полів, та активні витрати енергії, що запасається у резонаторі та витрачається на існування ВЕЕ.

1.4. Висновки до розділу

Резюмуючи стан існуючих у прискорювальній техніці методів збудження ВЧ напруг і полів, що забезпечують виникнення паразитних мультипакторних процесів і розрядів між окремими ділянками паралельних електродів прискорювальних зазорів, можна зробити висновок, що технічні розв'язання по створенню простих і ефективних потужнострумівих ЛПП пророблені не досить повно. Проблеми мультипактора починають з'ясовуватися у основному після того як об'ємна резонаторна прискорювальна структура з трубками дрейфу, виготовлених із високоякісної безкисневої міді, установлена в кожусі, у якому створюються вакуумні умови, та підключена до ВЧ підсилювача. При цьому не враховуються відомі знання, що мідні електроди, перебуваючи у ВЧ електричних полях, характеризуються неоднозначними ВЕ емісійними властивостями, при падінні на них електронів різних потенційних енергій. Завдання про прискорення іонних пучків, в умовах виникнення хаотичної вторинно-електронної емісії між паралельними областями торців трубок дрейфу, де поряд збуджуються аксиально-симетричні ВЧ поля між трубками дрейфу, вимагає вживання фахових заходів, що стабілізують їх ВЕ параметри.

Не вирішеними залишилися завдання взаємодії однорідних ВЧ електричних полів з електронами, що емітують з електродів прискорювальних проміжків та попередньо характеризують їх загальні коефіцієнти ВЕЕ. Також у літературі відсутні дані про потенціальні енергії електронів, що падають на електроди, при наростанні або спаданні ВЧ напруг, та визначають їх динамічною добротністю резонансного ЛПП.

Завдання по дослідженню стабілізації устанавлення ВЧ напруг і полів ЛПП, збуджуваного одним ПП з'єднаного 2-ма ПЗЗ з різними структурами, дозволяє відповісти на питання – чи можливо поліпшення параметрів трубчастих електродів з паралельними торцями і аксиально-симетричних ВЧ полів у прискорювальних зазорах між ними. А також збільшення значень прискорених пучків іонів при повному пригніченні умов множення електронів ВЕЕ у мультипакторних явищах. Вирішення зазначених проблем дозволить більш повно зрозуміти механізм розвитку і існування паразитних ВЕ розрядів між торцями трубок дрейфу ЛПП з однозначними емісійними властивостями та досягнення стабілізації збуджуванних ВЧ напруг і полів у резонаторних структурах високої добротності. Це допоможе також у створенні простої і надійної ВЧ системи для стабілізації збуджуваних прискорювальних полів у Н-резонаторі малогабаритного лінійного прискорювача дейтронів МЛПД-3 та забезпечення суттєво підвищених (у рази) інтенсивних струмів пучків іонів, що можуть використовуватись як для технологічних цілей, так і для фундаментальних досліджень.

РОЗДІЛ 2

ВПЛИВ МУЛЬТИПАКТОРНИХ ЯВИЩ НА ПАРАМЕТРИ ПРИСКОРЮВАЛЬНОГО Н-РЕЗОНАТОРА ЛПІ

Проблеми існування й впливу мультипакторних явищ на параметри ЛПІ, доводиться вирішувати кожен раз, коли у резонаторі та зазорах між трубками дрейфу, здійснюється збудження ВЧ напруг і полів [70]. Це може бути як при початковому ВЧ тренуванні виготовленого ЛПІ, так і при його черговому запуску в режим прискорення іонів з енергіями від інжектора.

Особливо, це стосується однорезонаторних прискорювачів іонів, що розробляються для технологічних цілей із простими ВЧ системами, які не мають систем автоматичної стабілізації параметрів резонаторної структури ЛПІ [17,18]. При розвитку між торцями трубок дрейфу, габарити яких більше ніж довжини зазорів між ними, умов множення електронів вторинно-електронної емісії, не можливо повною мірою забезпечити у часі стабільність аксиально-симетричних ВЧ напруг і полів у лінійному прискорювачі іонів.

Виникнення електронного замикання найменшого зазору Н-резонатора лінійного прискорювача дейтронів МЛПД-3 є аварійним режимом для резонансного прискорювача в цілому і вимагає прийняття термінових заходів, спрямованих на швидке усунення паразитних процесів і розрядів, що грубо порушують його електродинамічні характеристики.

Електронне замикання торців трубок дрейфу на осі прискорювача різко порушує не тільки завдані параметри усіх прискорювальних зазорів, але й Н-резонатора [71] в цілому, що неминуче супроджується різким спадом ВЧ напруг резонатора і полів у прискорювальних зазорах до мінімальних значень, зміненням його резонансної частоти – тобто безперечними втратами резонансних властивостей.

При цьому можуть виникати ВЕ пробої й розряди в анодно-сітковому контурі кінцевого ВЧ каскаду ПК, що є небезпечно для скляного (керамічного)

лампового тріоду, а також елементах фідерних ліній як повітряних, так і заповнених діелектриком. Можливо також виникнення паразитних ВЧ пробоїв і розрядів між електродами, що призначені для настроювання та регулювання основних параметрів ЛПП [72].

Визначення областей розвитку ВЕ розрядів між паралельними електродами резонаторного прискорювача поряд з можливими ВЧ пробоями й розрядами інших типів становить важку проблему для її розв'язання, коли до нього підключається потужний ВЧ підсилювальний канал, що може збуджуватись у різних режимах.

В окремих наукових статтях підтверджується, що порушення характеристик резонансного прискорювача мультипакторними розрядами, відбувається на етапах збудження імпульсів ВЧ напруг і полів, значення яких досить малі (початок експонентного зростання у часі з нуля) [18].

Далі викладаються напівемпіричні умови виникнення паразитних вторинно-електронних процесів і розрядів, пропонуються малоефективні методи їх пригнічення, без посилань на неоднозначні вторинно-електронні здібності мідних торців трубок дрейфу, що перебувають під дією ВЧ напруг і полів періодичної полярності [73].

У теперішньому розділі представлені результати дослідження впливу ВЕ процесів і розрядів на резонансні характеристики однорезонаторного прискорювача при різних методах збудження ВЧ напруг і полів, що забезпечують умови множення електронів ВЕЕ, або їх пригнічення.

2.1 Методи і апаратура для дослідження впливу мультипакторних явищ на установлення ВЧ напруг і полів у ЛПП

При збудженні електромагнітних полів у багатозазорній резонаторній структурі ЛПП паразитні ВЕ процеси й розряди можуть виникати не тільки між паралельними торцями трубок дрейфу, але й в інших діодних проміжках, що можуть стати паразитними. Це створює труднощі при виявленні областей

виникнення цих розрядів, оскільки сигнали контрольних напруг резонатора, падаючих та відбитих хвиль фідера, а також в інших вимірювальних ланцюгах, розташованих за межами основних систем, одночасно характеризують роботу ЛПІ в цілому.

На практиці ідентифікація пробоїв і розрядів при ВЧ збудженні прискорювальної структури іонів має проводитися поетапно. Спочатку це запуск робочого режиму потужного підсилювача на активне навантаження, погодженого з хвильовим опором фідера та калориметричні виміри його вихідної потужності.

При роботі ПК на активне навантаження в режимі біжучих хвиль, коли легко виявляються й усуваються ВЧ пробої й розряди, що можуть бути обумовлені неточностями при обґрунтуванні вибору матеріалу, конструкцій елементів, їх вироблення і якості монтажних робіт. Для переконливості високої електричної міцності виготовлених, змонтованих і настроєних у робочий режим ВЧ каскадів ПК і елементів коаксіального фідера, на аноди генераторних ламп короткочасно подаються високовольтні напруги, що не перевищують їхні паспортні дані більш ніж на 50%.

Висока стійкість генерації потужності у ВЧ каскадах ПК, що передається в активне навантаження, дозволяє припускати, що при його підключенні до резонансного ЛПІ з мідними трубками дрейфу та їх мультипакторними здібностями, саме він стає джерелом виникнення паразитних вторинно-електронних розрядів у прискорювальних зазорах та інших корисних ДП із паралельними поверхнями електродів.

Цьому може сприяти наявність оглядових вікон у вакуумному кожусі ЛПІ, що й забезпечує спостереження за динамічним станом прискорювальних зазорів і візуалізації зазначених розрядів. Можливий також контроль параметрів резонаторного ЛПІ в якому існують ВЕ розряди.

Це вимір величини зміщення основної частоти ЛПІ від резонансної; викривлення нормальних форм імпульсів ВЧ напруг і ВЕ струмів, що є паразитними для прискорювача. А також вимір значень напруг біжучих і

відбитих хвиль по фідеру та падіння ККД прискорювача, тобто перетворення енергії постійних джерел у ВЧ енергію прискорених пучків іонів.

Дослідження впливу паразитних мультипакторних розрядів на параметри резонансного ЛПП стало можливим у зв'язку з вдалою розробкою в ННЦ ХФТІ загальної ВЧ системи, з принципово новим способом його збудження. Тут ефективно пригнічується паразитне множення електронів ВЕЕ в однорідних ВЧ полях між торцями трубок, що одночасно забезпечує стабілізацію збуджуваних прискорювальних ВЧ полів у зазорах між ними.

Сутність нового способу ВЧ збудження резонансного прискорювача, полягає в створенні у його ВЧ системі загальної автоколивальної системи (АС), де потужний підсилювальний канал (каскад) з'єднаний 2-ма незалежними позитивними зворотними з'язками з напругами резонатора (ПЗЗР) та падаючих хвиль у повітряному коаксіальному фідері (ПЗЗФ).

Вихідні напруги, що генеруються потужним ПК з кожним ПЗЗ, підсумовуються безпосередньо у Н-резонаторі лінійного прискорювача іонів. При цьому параметри напруг ПЗЗ з резонатором, що з'єднують його з ПК, прямо залежать від впливу паразитних мультипакторних процесів і розрядів, супроводжуючи різке падіння ВЧ напруг і полів прискорювача до найменших значень. Параметри ж напруг ПЗЗ падаючих хвиль з фідером, що з'єднують його з ПК непрямо залежать від указаних мультипакторних явищ у резонаторі і безперервно наростають у часі.

Тому що у лінійному прискорювачі іонів на основі Н-резонатора з високими електродинамічними характеристиками трубки дрейфу по черзі укріплені на різних плескатих гребінчатих тримачах, розташованих у діаметральній площині, то прискорювальні зазори виявляються з'єднаними паралельно, утворюючи загальну ємкість на осі прискорювача. Довжини трубок дрейфу й прискорювальних проміжків між ними відповідно різні.

Однак, порушення ВЧ полів паразитними розрядами у всіх паралельно з'єднаних зазорах прискорювального каналу, відбувається одночасно. І синхронно зі збудженням прискорювальних ВЧ напруг резонатора та

прискорювальних полів у зазорах між трубками й виникають струми ВЕЕ з торців мідних трубок.

При реєстрації імпульсів ВЕ струмів разом з контрольними імпульсами ВЧ напруг резонатора ЛПП, досить просто реалізується методика дослідження впливів мультипакторних розрядів на його резонансні та електродинамічні параметри.

Розрахункові напруженості поздовжніх електричних полів по осі прискорювальних зазорів, для протонів, що прискорюються, рівні 60кВ/см, крім першого й останнього зазорів, для яких напруженості зазначених полів рівні 30кВ/см.

Основні розміри трубок дрейфу і значення ємкостей прискорювальних зазорів у Н резонаторі прискорювача МЛПД-3, наведені нижче в таблиці 1.

З таблиці випливає, що довжина 1-го прискорювального зазору яка дорівнює 13,53мм, менше ніж різниця радіусів кільцевих поверхонь його електродів (широта кільцевої поверхні електрода першого зазору дорівнює 23,5мм, а протилежного – 19мм, тобто більше зазору між ними).

Можна вважати, що в середніх частках кільцевих електродів силові лінії однорідних ВЧ полів нормальні до поверхонь їх паралельних торців.

Тобто ВЧ поля між їхніми торцями є такими, що сприяють умовам виникнення електронів вторинно-електронної емісії. При періодично змінних полярністях зазначених ВЧ полів в кожному з півперіодів, з торцевих поверхонь трубок дрейфу й здійснюється емітування електронів у тому числі й небажане множення попередньо збуджених електронів.

У першу чергу умови безперервного множення електронів ВЕЕ, що досягають ВЕ розрядів, забезпечуються в зазорі найменшої довжини.

Можна вважати, що і в інших зазорах відбуваються аналогічні вторинно-електронні процеси, але інтенсивність множення в них електронів ВЕЕ обмежується різким спадом ВЧ напруг резонатора за рахунок інтенсивного ВЕ розряду (електронного замикання торців трубок дрейфу) в першому прискорювальному зазорі найменшої довжини.

Номер періоду №№	Довжина (мм)				Радіус (мм)		Ємність приск. зазорів (пф)
	Приск. зазор	Приск. трубка	Період LP	Сума періодів	Апертури RA	Зовнішній (приск. тр.)	
Вхід. патрубок		3,00			13,00	60,00	
Вихід. патрубок		115,50			0,00	60,00	
1	13,53	18,43	31,96	31,96	27,00	65,00	2,623
2	17,53	7,06	24,59	56,55	27,00	51,00	2,046
3	22,29	47,12	69,41	125,96	27,00	60,00	3,346
4	22,18	31,41	53,59	179,55	27,00	56,50	2,070
5	26,77	9,35	36,12	215,67	27,00	45,50	1,935
6	31,25	65,04	96,29	311,96	27,00	49,00	2,561
7	31,14	43,36	74,50	386,46	27,00	55,50	2,673
8	35,73	13,70	49,43	435,89	27,00	40,00	2,923
9	40,09	89,74	129,83	565,72	27,00	48,00	4,302
10	41,46	14,74	56,20	621,92	27,00	43,50	5,267
11	44,63	52,66	97,29	719,21	27,00	48,00	2,873
12	50,61	17,29	67,90	787,11	27,00	48,00	5,156
13	55,08	18,78	73,86	860,97	27,00	50,00	4,481
14	59,54	135,12	194,66	1055,63	27,00	51,00	5,029
15	61,20	22,27	83,47	1139,10	27,00	62,00	7,247
16	64,22	0,00	64,22	1203,32	0,00	0,00	5,373
Σ 635,08							Σ 59,905
Довжина прискорювача, м				LR=1,32182			
Діаметр прискорювача, м				D =0,4			

У прискорювальних проміжках більшої довжини такі вторинно-електронні струми не можуть подолати гальмуюче електричне поле сусіднього зазору. Однак, у двох останніх зазорах коефіцієнти полів рівні 1 і 1/2. Тому струми електронів вторинно-електронної емісії, що виходять із Н-резонатора лінійного прискорювача іонів, можуть бути зареєстровані вимірювальною апаратурою [74-77].

На рис. 2.1 показано сучасну блок-схему ВЧ системи малогабаритного лінійного прискорювача протонів та дейтронів МЛПД-3, збуджуваного одним ПК з'єднаного 2-ома незалежними позитивними зворотними зв'язками, індуктивні петлі яких 4 і 8 уведені у резонатор (ПЗЗР) та лінійній ділянці повітряного коаксиального фідера 2.

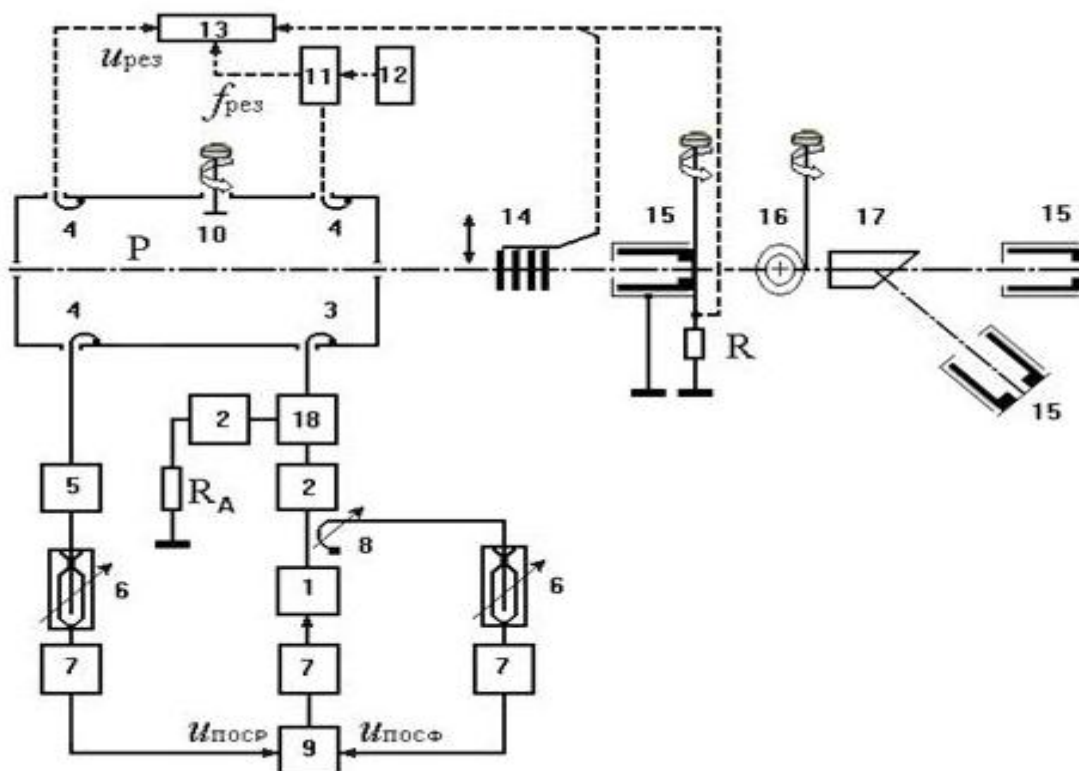


Рис. 2.1. Блок-схема експериментального стенду для дослідження стабілізації збуджуваних ВЧ полів у Н-резонаторі малогабаритного лінійного прискорювача дейтронів МЛПД-3, збуджуваного новою ВЧ системою, де підсилювальний канал з'єднаний 2-ма незалежними позитивними зворотніми зв'язками з напругами резонатора та падаючих хвиль у коаксіальному фідері, або будь-яким одним із них.

Резонансний прискорювач створений на базі циліндричного Н-резонатора Р з прискорювальними зазорами різної довжини ($n=16$, коливання π -виду), які утворені паралельними поверхнями торців трубок дрейфу, що по черзі розташовані по осі на двох плескатих гребінчатих утримувачах, укріплених вертикально в діаметральній площині резонатора.

При завданих довжинах прискорювальних зазорів між трубками дрейфу потрібний розподіл електричних полів уздовж прискорювального каналу забезпечується плескатими дисками з міді, що насаджуються на торці мідних трубок. Збільшення радіусів вказаних дисків підбирається експериментально. Частота резонатора $f_{PEZ} \approx 100$ МГц, власна добротність $Q_0 \approx 5000$. Енергетичним джерелом прискорювача є 3-ох каскадний підсилювальний канал 1 з коефіцієнтом підсилення $K_{\Pi} > 100$ і вихідною потужністю $\sim 0,6$ Мвт.

Передача потужних ВЧ напруг, збуджуваних в кінцевому анодно-сітчастому контуру ПК на погоджений індуктивний увід 3 у резонатор здійснюється за допомогою повітряного коаксіального фідера із хвильовим опором $W = 50$ ом (базове співвідношення діаметрів зовнішнього й внутрішнього коаксіальних провідників 160/70мм). Висока електрична міцність, як лінійних ділянок повітряного фідера, так і елементів (рефлектометрів 2 для виміру контрольних напруг падаючих та відбитих хвиль) та приладів для настроювання та регулювання резонансних параметрів прискорювача забезпечується нормальними умовами температури, вологості й атмосферного тиску. Для безпомилкової ідентифікації ВЕ розрядів у прискорювальній структурі та ВЧ розрядів за її межами, у фідерному тракті ВЧ системи прискорювача встановлено коаксіальний перемикач фідерний (ПФ) 18. Корпус і внутрішній провідник перемикача зроблені у вигляді сферичного конденсатора. Імпеданс ПФ дорівнює хвильовому опору фідера. Внутрішній провідник фідера з боку підсилювача, підключається безпосередньо до внутрішнього шарового провідника, що перебуває в центрі сферичного корпусу ПФ та піддержується короткозамкненим чвертьхвильовим шлейфом.

Підключення потужного активного навантаження R_A або ЛПІ до ПФ здійснюється за допомогою механічних приводів, керованих вручну (є можливість і для дистанційного керування). Наявність ПФ дозволяє потужному ПК працювати у двох режимах. У першому – при підключенні до нього частотно незалежного активного навантаження, опір якої дорівнює хвильовому опору фідера. При роботі ПК на погоджене активне навантаження R_A перевіряється електрична міцність високовольтних ланцюгів та елементів імпульсних модуляторів і ВЧ каскадів, а також елементів фідерного тракту. У другому – при безпосередньому підключенні ПК до Н-резонатора лінійного прискорювача іонів, параметри якого при збудженні ВЧ напруг і електричних полів можуть несподівано мінятися різними ВЧ системами. При цьому збудження імпульсних ВЧ напруг і полів, що змінюються за законами експоненти від мінімальних значень, дозволяє виявляти у ЛПІ як виникнення паразитних ВЕ струмів між його прискорювальними електродами, так і їх повне пригнічення

Потужний ПК може бути одночасно охоплений 2-ма незалежними ПЗЗ. Напруги з елементів ПЗЗР і ПЗЗФ, у погоджених умовах по коаксіальному кабелю типу РК-75-9-12, надходять у підсумовувач ВЧ типу 9 і далі на вхід ПК, забезпечуючи завданий рівень його вихідної ВЧ потужності. Як впливає із схеми, підсилення напруг ПЗЗ контурів з ПЗЗР і ПЗЗФ відбувається в одному і тому ж підсилювальному каналі. Далі по фідеру, підключеному до погодженого індуктивного ВЧ входу у резонатор 3, зазначені напруги поступають у ЛПІ. Режим біжучих хвиль у фідері забезпечується за допомогою фазообертачів 6. Наявність ПК із загальною АС, утвореної 2-ма незалежними позитивними зворотними зв'язками, а також можливість мобільного керування їх фазами і значеннями напруг, дозволяє досліджувати впливи мультипакторних явищ на роботу прискорювача і потужного підсилювача, при різних способах його ВЧ збудження.

- 1) У режимі збудження резонатора резонансного прискорювача потужним підсилювальним каналом, з'єднаного позитивним зворотним зв'язком з

резонатором, утворюючи циркуляцію частини відгалуженої ВЧ напруги, що надходить на вхід ПК.

2) У режимі ВЧ збудження резонатора ЛПП потужним підсилювальним каналом з'єднаного ПЗЗ з фідером, що також надходить на вхід ПК.

3). У режимі ВЧ збудження потужного ПК з'єднаного позитивним зворотним зв'язком з фідером (ПЗЗФ), що поступає на вхід ПК, а його вихід підключається, за допомогою перемикача фідерного, до активного опору R_A . охолоджуваного проточною водою.

4) У режимі збудження резонатора ЛПП потужним ПК з'єднаного з 2-ома зазначеними автоколивальними контурами, ВЧ напруги незалежних позитивних зворотних зв'язків яких оптимально регулюються по амплітуді й фазі, та спільно підсилюються у ПК і безпосередньо підсумовуються у резонаторі ЛПП.

Збудження Н-резонатора прискорювача різними автоколивальними контурами дозволяє досліджувати паразитні вторинно-електронні процеси між прискорювальними електродами, як на початку покритих шарами атмосферних газів, так і очищених ВЧ полями. В останньому випадку, коли електроди прискорювальних зазорів повністю треновані, та виявляють свої власні вторинно-електронні здібності, це дозволяє вважати результати проведених експериментальних досліджень найбільш достовірними.

У режимі роботи потужного підсилювального каналу, з'єднаного позитивним зворотним зв'язком з фідером, на активний опір R_A , перевіряється погодженість підключень усіх необхідних елементів по довжині фідера й усуваються ділянки зі слабкою електричною міцністю. У цьому режимі також здійснюється калібрування рівнів вихідної потужності ПК, коли кожному значенню амплітуди падаючої хвилі, обмірюваної за допомогою рефлектометрів 2 відповідає рівень ВЧ потужності, вимірюваної калориметричним методом і поглиненої активним опіром R_A охолоджуваного проточною водою.

Таким чином, в усьому діапазоні ВЧ напруг генерируючих ПК у режимі біжучих хвиль, переданих по фідеру в активний опір R_A , забезпечується гарантія високої електричної міцності й стійкої роботи всіх ВЧ каскадів ПК, імпульсного модулятора, а також фідерних елементів. Зазначена перевірка стійкої роботи потужного ПК є обов'язковою перед підключенням його до резонансного ЛПІ. Тоді, уся відповідальність за виникнення розрядів і пробоїв у лінійному прискорювачі в цілому, може бути покладена на паралельні електроди прискорювальних зазорів та інших ДП, що перебувають під дією однорідних ВЧ полів. Величина ВЧ потужності, що надходить у резонатор прискорювача, при загальної неузгодженості з вихідом ПК, визначається вираженням $P_P = P_G \{1 - |\Gamma|^2\}$. Тут P_P – потужність, що уведена у резонатор; $P_{ПК}$ – потужність, що генерується ПК; $\Gamma = U_{ВІДБ}/U_{ПАД}$ – коефіцієнт відбиття по напрузі, $U_{ПАД}$, $U_{ВІДБ}$ амплітуди напруг падаючих та відбитих хвиль у фідері [80-81]. Амплітудні умови роботи контуру з ПЗЗР регулюються за допомогою повільного атенюатора 5, що перебуває за межами резонатора прискорювача, а для контуру з ПЗЗФ, зміною зв'язку елемента 8 з магнітними полями коаксіального фідера (індуктивна петля, що установлена на внутрішній поверхні фідера, може обертатися щодо його магнітних силових ліній). Настроювання фазових умов ВЧ коливань по кільцевих ланцюгах контурів, де підсилювальний канал з ПЗЗР та з ПЗЗ з фідером, проводиться фазообертувачами 6 (0-360°), коаксіальні провідники яких мають ковзні контакти по їх внутрішніх і зовнішніх поверхнях.

Ступінь погодженої передачі потужності, визначається контрольними напругами падаючих і відбитих хвиль рефлектометром 2, а в ланцюгах ПЗЗ – рефлектометрами 7 на базі кабелів типу РК-75-9-12. Індуктивними петлями 4, установленими в резонаторі контролюється амплітуда ВЧ напруги резонатора $U_{РЕЗ}$ на індикаторному обладнанні 13. За допомогою частотного змішувача 11 і вимірювального генератора 12 контролюється робоча частота резонатора $f_{РЕЗ}$.

Струми вторинних електронів що виходять по осі резонатора, визуалізуються за його межами за допомогою люмінесцентного екрану 16. За допомогою циліндра Фарадея 15 виміряються значення імпульсів ВЕ струмів, на відомому значенні опору R , при вимірюванні напруги електронним або цифровим осцилографом [75, 76]. Фольговий аналізатор енергій електронів 14 здійснює поділ по значенням енергій електронів ВЕЕ. Магнітний аналізатор 17 призначений для виміру енергетичних спектрів інтенсивних пучків прискорених іонів. Аналіз реєстрованих імпульсів ВЧ напруг резонатора й ВЕ струмів дозволяє в цілому судити про наявність ВЕЕ електронів різних енергій і їх впливу на характеристики резонансного ЛПП.

Використання тонких алюмінієвих фольг (у нашому випадку товщини 5мкм), дозволяє досить точно оцінити нижню межу енергій прискорених електронів, що поступають у процеси множення електронів найменших енергій, число яких може бути мінімальним, при пригніченні ініціації множення електронної мультипакції [77].

Вплив ВЕЕ розрядів на стійкість устанавлення ВЧ полів у ЛПП розглянемо при окремому підключенні до нього автоколивальної системи ВЧ джерела з одним позитивним зворотним зв'язком з резонатором (ПЗЗР) або з фідером (ПЗЗФ). При цьому вважається, що ВЧ напруги забезпечуються завданими коефіцієнтами ПЗЗ з номінальними фазами в ланцюгах. Ці умови визначаються припустимими обурюваннями, що вводяться у резонатор і повітряний фідер від елементів ПЗЗ 4 і 8 з метою забезпечення “слабкості” їх впливів на розподіл полів вздовж прискорювача і режиму біжучих хвиль у коаксіальному фідері. Спільна робота двох незалежних ПЗЗ в новій ВЧ системі, в результаті забезпечує в зазорах між трубками дрейфу стабілізацію стійких ВЧ полів, що пригнічують умови множення електронів у однорідних ВЧ полях між торцями трубок.

Дослідження співвідношення амплітуд ВЧ імпульсів напруг, збуджуваних у коливальних контурах з ПЗЗР або ПЗЗФ при виконанні зазначених вимог по пригніченню множенню мультипакторних процесів і розрядів дозволили устанавити

номінальне значення напруги ПЗЗ з коаксіальним фідером як $U_{ПЗЗФ} \geq 0,25U_{ПЗЗР}$. Це однозначно визначає розміри індуктивної петлі, установленної у фідері.

ВЧ збудження ЛПІ новою ВЧ системою, де підсилювальний канал, з'єднаний 2-ма незалежними позитивними з резонатором та фідером, в результаті забезпечує високу стабільність збуджуваних ВЧ напруг резонатора і полів у зазорах ЛПІ. При цьому здійснюється ефективне пригнічення мультипакторних явищ між паралельними торцями трубок дрейфу лінійного прискорювача іонів.

2.2 Викривлення імпульсів ВЧ напруг резонатора при збудженні ЛПІ підсилювальним каналом з'єданого позитивним зворотнім зв'язком з резонатором

На рис. 2.2. показано вплив мультипакторних розрядів між на викривлення електродинамічних параметрів прискорювача МЛПД-3, збуджуваного ПК з'єданого ПЗЗ з резонатором (ПЗЗР).

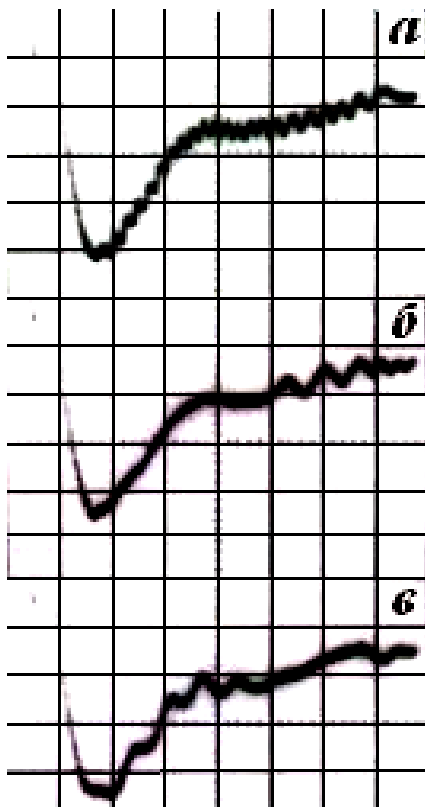


Рис. 2.2 (а-в) – Імпульси ВЧ напруг частотного змішувача $U_{чЗМ}$, при виміру резонансної частоти прискорювача МЛПД-3, за допомогою стандартного генератора.

а – загальний імпульс ВЧ напруги частотного змішувача $U_{чЗМ}$;

б – нульові биття на початку імпульсу ВЧ напруги частотного змішувача $U_{чЗМ}$.

($f_{ВГ} - f_{РЕЗ} = 80\text{кГц}$);

в – нульові биття наприкінці імпульсу ВЧ напруги частотного змішувача $U_{чЗМ}$

($f_{ВГ} - f_{РЕЗ} = 50\text{кГц}$);

Масштаб: $U_{чЗМ} = 0,01\text{В/діл.}$;

Масштаб по горизонталі: – 50мкс/діл.

Динамічний стан ЛПШ на початку чергової зміни: температура 20°, поверхні електродів штучно, шляхом напускання атмосферних газів у вакуумний кожух, забруднені шарами цих газів.

При досягненні вакууму $\sim 10^{-5}$ мм рт. ст., резонатор збуджується від ПК з'єднаного одним ПЗЗ із резонатором. Рівень потужності, що надходить у прискорювач визначається значеннями постійних напруг імпульсного модулятора (частота посилення імпульсів 1 Гц/сек), які на початку ВЧ тренування малі але достатні для початкового запуску зазначеної ВЧ системи.

У міру збільшення напруги модулятора у резонаторі встановлюються стійкі імпульси ВЧ напруг нормальних форм (їх фронти змінюються за законами експоненти). Але після $\sim 10 \dots 11$ хвилин, ВЧ напруги резонатора різко спадають і з кожним імпульсом на протязі декількох секунд досягають найменшого значення, що збігається з лінією розгорнення променя осцилографа. У прискорювачі забезпечено існування мультипакторних явищ.

ВЧ порушення високих електродинамічних характеристик прискорювального Н-резонатора можливе також при повторних (кількаразових) напусках в нього атмосфери, досягнення вакууму, завданого вище, і короткочасного стійкого ВЧ тренування, у режимі ПК з ПЗЗР, доки електроди не очистяться зазначеними ВЧ полями й падаючими на них електронами ВЕЕ з найменшими потенціальними енергіями. Можна вважати, що цей час необхідний для придбання прискорювальними електродами власних ВЕ емісійних здібностей, що забезпечують безперервне множення електронів ВЕЕ.

Усі інші значення контрольованих напруг резонатора й фідера ($U_{РЕЗ}$, $U_{ПАД}$, $U_{ВДБ}$, $U_{ПЗЗР}$) у цьому нестійкому режимі ВЧ збудження резонансного прискорювача неможливо зареєструвати через малість їх величин.

При таких малих величинах ВЧ напруг збуджуваних у ЛПШ і була обмірювана його резонансна частота. Для цього було встановлено максимальну чутливість електронного осцилографа й налагоджена методика виміру частоти резонансного прискорювача за допомогою вимірювального стандартного генератора (СГ).

На осцилограмах рис. 2.2(а-в) представлені ВЧ імпульси вихідних напруг частотного змішувача $U_{\text{чз}}$ до якого надходять імпульси ВЧ напруг резонатора досить малих значень, обуреного мультипакторними процесами і розрядами, та напруги стандартного генератора.

На осцилограмі рис. 2.2(а) показані загальні осциляції напруги частотного змішувача $U_{\text{чс}}$, що вказують на наявність у резонаторі прискорювача 2-х напруг з різними частотами, одна з яких викривлена електронним замиканням електродів першого прискорювального зазору, що спостерігаються по світності між ними (крізь скло у вакуумному кожусі).

Виділення нульових “биттів” на початку (рис. 2.2б) і наприкінці (рис. 2.2в) імпульсів ВЧ напруги частотного змішувача $U_{\text{чзм}}$ дозволило виміряти значення двох частот $f_1 = 98,226$ МГц і $f_2 = 98,196$ МГц при основній частоті резонатора прискорювача $f_{\text{PEЗ}} = 98,146$ МГц.

Аналіз зміни частоти протягом тривалості ВЧ імпульсу вказує на більше відсторонення від частоти резонатора на початку ВЧ імпульсу ніж наприкінці, що може пояснюватися зменшенням у часі більшого числа електронів ВЕЕ, що спочатку надходять у паразитний вторинно-електронний розряд.

Таким чином, ВЧ збудження прискорювача де підсилювальний канал з'єднаний одним ПЗЗ із Н-резонатором (ПЗЗР), забезпечуючи мови множення електронів, що можуть досягати паразитних розрядів між електродами зазору найменшої довжини та інтенсивних мультипакторних процесів у прискорювальних зазорах більшої довжини, не може бути стійким.

2.3 Викривлення імпульсів ВЧ напруг резонатора, при збудженні ЛПІ одним ПК з'єданого ПЗЗ з фідером (ПЗЗФ)

На рис. 2.3 (а-г) показано вплив мультипакторних процесів і розрядів на викривлення імпульсів ВЧ напруг Н-резонатора прискорювача, збуджуваного ВЧ системою, де підсилювальний канал з'єднаний одним ПЗЗ з коаксіальним фідером.

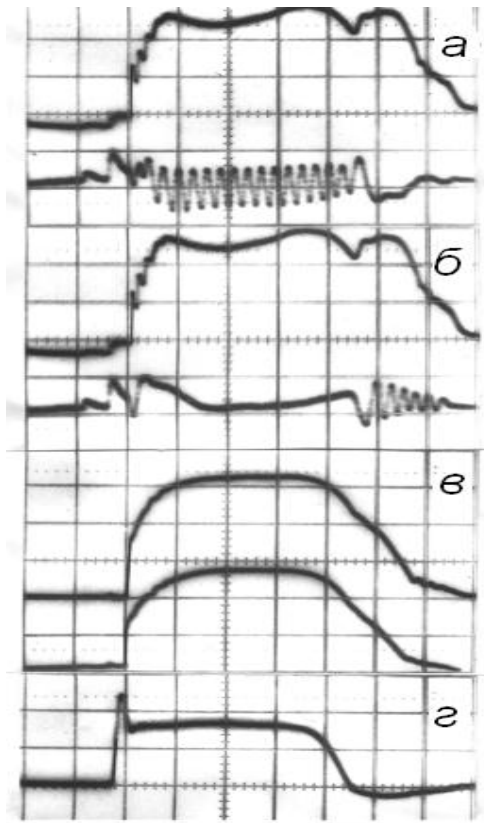


Рис. 2.3 – Імпульси ВЧ напруг U_{PE3} (верхні) і частотного змішувача $U_{ЧЗМ}$ (нижні), на початку ВЧ «тренування» прискорювача.

а-б частоти нульових биттів – $f_1 = 98,226$ МГц (3.2а) та $f_2 = 98,196$ МГц (3.2б).

Масштаб: $U_{PE3} - 2$ В/діл; $U_{ЧЗМ} - 50$ мВ/діл.

в – напруги падаючих (верхні) і відбитих хвиль $U_{ВІДБ}$ (нижні) у фідері.

Масштаб: $U_{ПАД} - 5$ В/діл; $U_{ВІДБ} - 5$ В/діл.

г – ВВ напруга на аноді кінцевого ВЧ каскаду. Масштаб: $U_{МОД} - 5$ кВ/діл.

Масштаб по горизонталі: -50 мкс/діл.

На осцилограмах імпульсів (рис. 2.3а і 2.3б) показано викривлення ВЧ напруг U_{PE3} (верхні) і частотного змішувача $U_{ЧЗМ}$ (нижні), при великому значенні коефіцієнта стоячої хвилі у фідері. Збурювання параметрів ЛПІ приводить до спаду ВЧ полів до $U_{PE3} = 0,5$ В, при $U_{PE3\text{НОМ}} = 8,5$ В і зміні частоти резонатора на протязі ВЧ імпульсу частотного змішувача.

Порушення умов узгодження вхідного опору резонатора із хвильовим опором фідера (коефіцієнт стоячої хвилі ~ 20 супроводжується ВЧ пробоями й звуковими сигналами у вихідному анодно-сітковому контурі кінцевого ВЧ каскаду. При цьому у перших прискорювальних зазорах Н-резонатора візуально спостерігається червонясто-жовте світіння. У всіх наступних, більших зазорах прискорювального каналу таке світіння відсутнє. Оскільки неузгодженість у загальній системі ЛПІ відбувається в умовах паразитних ВЕ процесів і розрядів, то підвищення високої напруги імпульсного модулятора ПК досить небезпечно, оскільки це може привести до виходу з ладу, наприклад, дорогої генераторної лампи кінцевого ВЧ каскаду й елементів високовольтного модулятора.

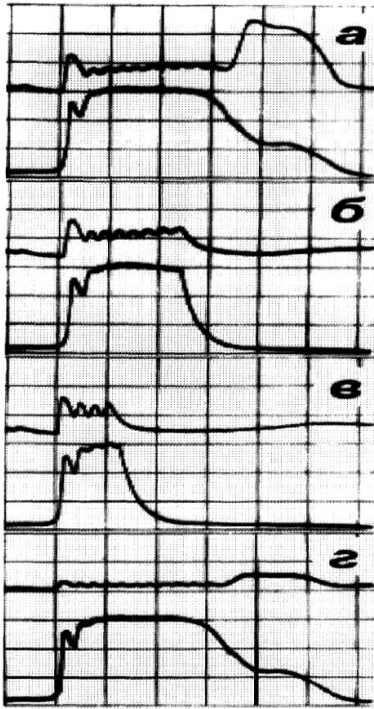


Рис. 2.4 – Нестійке встановлення імпульсів ВЧ напруг Н-резонатора, збуджуваного ПК з'єднаного ПЗЗ з фідером (ПЗЗФ), через 20 хвилин ВЧ тренування при незмінних значеннях напруг падаючої хвилі у фідері.

а-г – імпульси ВЧ напруг U_{PEZ} (верхні).

Масштаб: $U_{PEZ} - 1$ В/діл.

а-г – імпульси ВЧ напруг падаючих хвиль у фідері $U_{ПАД}$ (нижні).

Масштаб: $U_{ПАД} - 10$ В/діл;

Масштаб по горизонталі: $- 50$ мкс/діл.

На рис. 2.4 показано нестійке ВЧ збудження прискорювача МЛПД-3, в умовах продовження ВЧ «тренування» його циліндричних поверхонь і трубчастих електродів (через 20 хвилин роботи ПК із ПЗЗФ).

Умовою початкового зриву наростання імпульсів ВЧ напруг резонатора і падаючих хвиль у фідері при розстроюваному прискорювачі може бути виникнення ВЧ розрядів за його межами (у фідері, ВЧ каскадах). Можна вважатися, що це викликане неузгодженістю ПК із модулятором і триваючою неузгодженістю з ЛПІ.

Осцилограми на рис. 2.4 (а-г) дозволяють судити не тільки про характер викривлення ВЧ напруг U_{PEZ} (верхні), в розстроєному резонаторі, але й про порушення погоджених умов підсилювального каналу з резонансним прискорювачем, що характеризується різким спадом напруг падаючих хвиль у фідері $U_{ПАД}$ (нижні).

З осцилограм впливає, що в початковий момент збудження ЛПІ, імпульси ВЧ напруг резонатора, з повільно наростаючими передніми фронтами (обумовлених експонентними залежностями, що починаються з нуля), забезпечують фізичні умови множення електронів загальних ВЕ емісійних

процесів. Досягаючи електронного замикання електродів з найменшою довжиною одного з зазорів, це викликає змінення параметрів усіх прискорювальних зазорів в цілому. Також порушуються у часі умови біжучих хвиль у фідері й стоячих хвиль у вихідному анодно-сітковому контурі вихідного ВЧ каскаду ПК.

Досягнення ВЕ розрядів у ЛПП приводить до змінення його основної частоти й різкому паданню напруг U_{PE3} до мінімальної величини. Зі зменшенням амплітуд напруг у зазорах прискорювального каналу інтенсивність електронів ВЕЕ також зменшується, приводячи до відносно меншого змінення частоти резонатора.

Початкове збільшування малих напруженостей полів у зазорах веде знову до наростання інтенсивностей ВЕ розрядів до максимально можливої величини. Далі процес повторюється й кожні наростаючі й спадаючі цикли множення електронів ВЕЕ в часі трохи відрізняється друг від друга по інтенсивності, що й спостерігається на осцилограмах. Таким чином, осциляційний характер зміни амплітуд напруг збуджуваних в обуреній резонаторній структурі прискорювача може характеризуватися досить більшим числом емісії вторинних електронів, що надходять у розрядний процес. Вимір періодичності осциляцій стола ВЧ імпульсу перебуває в межах $12,5 \div 20$ мксек, що відповідає зміні основної частоти прискорювальної структури, збуджуваної АС ПК із ПЗЗР, в межах $\sim (80-50)$ кГц). Виникаючі зриви (рис. 2.4 б,в) напруг прискорювача, при незмінному рівні переданої потужності (пропорційній амплітуді падаючій хвилі, що характеризує режим встановлення генерації ПК), випадкові і можуть бути обумовлені як ВЕ розрядами у фідері так і пробоями й розрядами за межами резонатора прискорювача.

Ці зриви, що супроводжуються звуковими ефектами у фідерних елементах і в області розташування генераторної лампи кінцевого ВЧ каскаду ПК, указують на можливе виникнення аварійного режиму. З наведених осцилограм випливає, що умови існування паразитних ВЕ розрядів в елементах резонансного ЛПП (резонаторі, елементах фідера та ВЧ каскадів) не

перешкоджають їхньому розвитку, спотворюючи електродинамічні характеристики прискорювача в цілому.

Осциляційний характер столів ВЧ імпульсів резонатора U_{PE3} і зрив імпульсів падаючих хвиль $U_{пад}$, що досягли максимальних величин, дозволяє зробити висновок, що ВЕ розряди в ЛПІ збуджуваного ВЧ системою з ПЗЗФ, є основною причиною грубого порушення його стійкої роботи. Однак, неоднозначність систем, відповідальних за ВЕ процеси й розряди у ЛПІ в цілому, сприяла тому щоб зажадати вдосконалення відомих методів дослідження. Це знадобилося при проведенні налагоджувальних робіт у ЛПІ, збуджуваного ВЧ системою, коли на різних етапах початкових ВЧ тренувань, спостерігалися зриви нормально наростаючих імпульсів ВЧ напруг прискорювача. Аналіз методів діагностики параметрів резонансного ЛПІ, збуджуваного різними АС, дозволив додатково характеризувати його стійку або нестійку роботу, при реально існуючих у однорідних ВЧ полях прискорювальних зазорів, власних струмів вторинно-електронної емісії.

2.4 ВЕ струми з торців трубок дрейфу на завершальній стадії тренування ЛПІ збуджуваного новою ВЧ системою

На рис. 2.5 (а-г) в умовах не завершеного ВЧ «тренування» елементів ВЧ каскадів підсилювача, елементів коаксіальних фідерних ліній, трубок дрейфу і внутрішніх поверхонь Н-резонатора ЛПІ, збуджуваного новою ВЧ системою, показано викривлення форм осцилограм імпульсів ВЧ напруг резонатора U_{PE3} (верхні) та загальних струмів електронно-електронної емісії I_{BEE} (нижні), вимірюваних однопроменевим осцилографом.

З аналізу викривлення зазначених імпульсів ВЧ напруг резонатора U_{PE3} випливає, що поведінка струмів ВЕЕ I_{BEE} не завжди збігається з характером викривлення імпульсів ВЧ напруг резонатора. Однак, при наростанні передніх фронтів резонатора U_{PE3} , початкова поведінка струмів ВЕЕ I_{BEE} є стійкою.

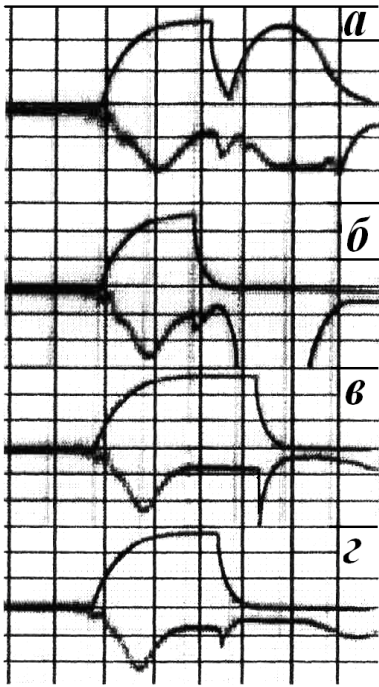


Рис. 2.5 (а-г) – Зриви імпульсів ВЧ напруг резонатора U_{PEZ} і електронних струмів I_{BEE} з трубок передостаннього зазору, торці яких спрямовані до виходу з прискорювача, збуджуваного новою ВЧ системою, на завершальній стадії тренування.

а-г – імпульси напруг U_{PEZ} (верхні). Масштаб: 2 В/діл.

а-г – імпульси струмів електронів I_{BEE} (нижні). Масштаб: 0,2ма/діл.

Масштаб по горизонталі: 50мкс/діл.

На осцилограмах рис. 2.5 (а-г), на початку передніх фронтів ВЧ напруг резонатора U_{PEZ} видні слабкі сплески струмів вторинно-електронної емісії відповідно до діапазону мінімальних значень експоненційно наростаючих напруг, при яких і ініціюється множення числа електронів ВЕЕ (паразитні мультипакторні процеси).

Однак, у міру досягнення сталості столу імпульсу ВЧ напруги резонатора U_{PEZ} , поведінка множення електронів в струмах ВЕЕ не передбачувана.

Відзначимо, що автоколивальним контуром, яке починає збудження Н-резонатора прискорювача МЛПД-3, де ПК одночасно з'єднаного двома незалежними ПЗЗ (ПЗЗР + ПЗЗФ), є контур ПЗЗР ($U_{ПЗЗФ} \geq 0,25 U_{ПЗЗР}$). І як тільки загальний результат ВЧ напруг у резонаторі починає наростати ще й за рахунок напруги ПК з'єднаного ПЗЗ з фідером (ПЗЗФ), то початкове множення електронів ВЕЕ пригнічується, а стійкість передніх фронтів імпульсів резонатора U_{PEZ} стабілізується.

Але продовження протягом ВЧ тренування прискорювача, розвиток загальних вторинно-електронних процесів у однорідних ВЧ полях зазорів усіх паралельних торців трубок дрейфу, може досить швидко міняти їх ВЕЕ властивості.

І при різких спаданнях імпульсів ВЧ напруг резонатора $U_{\text{РЕЗ}}$, обумовлених інтенсивними ВЧ розрядами за межами прискорювача (наприклад, у вихідному анодно-сітковому контурі кінцевого каскаду ПК, елементах фідера й т.п.), з паралельних поверхонь торців трубок дрейфу існує емісія вторинних електронів, які в окремих діодних проміжках можуть множитись до мультипакторних розрядів.

З осцилограми рис. 2.5 (а) випливає, що порушення у середині імпульсу ВЧ напруги $U_{\text{РЕЗ}}$, імпульс струму $I_{\text{ВЭЭ}}$ характеризується короткочасним сплеском множення електронів і їх звичайної емісією, обумовленої ВЧ напругами, що наростають та спадають у часі.

На осциллограмі рис. 2.5 (б) видно, що майже в тій же частці ВЧ напруги, що вільно спадає до досить малих величин (порівняно з нульовою лінією розгорнення променя осцилографа) електрони ВЕ емісії мають умови для інтенсивного множення. Це експериментально підтверджує, що множення електронів ВЕЕ з торців трубок дрейфу резонансного прискорювача при наростанні або спаді його ВЧ напруг і полів відбувається тільки при їх малих значеннях.

На наступних імпульсах ВЧ напруг (рис. 2.5, б-г) з передніми фронтами, що стійко досяглися сталості столу $U_{\text{РЕЗ}}$ також представлені їхні довільні зриви від початку імпульсу ВЧ напруги резонатора. При цьому різкий спад $U_{\text{РЕЗ}}$ до діапазону мінімальних величин – кращі умови множення числа електронів у ВЕ струмах (рис. 2.5,б), або їх ініціації (рис. 2.5, в-г).

Порівняння порушення різних форм імпульсів струмів ВЕЕ $I_{\text{ВЭЭ}}$, при різких викривленнях імпульсів ВЧ напруг резонатора $U_{\text{РЕЗ}}$ дозволяє утверджувати, що розвиток ВЕ процесів між трубчастими прискорювальними електродами резонаторної структури прискорювача МЛПД-3 вимагає тривалості необхідного часу для їхнього ВЧ тренування.

Це також як і для будь-яких електронних емітерів (термоемітеров, вторинно-електронних множників [83]), електроди яких здобувають власні ВЕЕ здібності при достатньому ВЧ тренування у часі.

2.5. Досягнення високої стабільності установавання ВЧ напруг і полів у Н-резонаторі ЛПШ збуджуваного новою ВЧ системою

У підрозділах 2.2, 2.3, і 2.4 експериментально показано характер викривлення імпульсів ВЧ напруг прискорювального Н-резонатора, збуджуваного ВЧ системою, де ПК з'єднаний одним ПЗЗ із резонатором або з фідером. Як прийнято вважати, ці порушення пов'язані з паразитними ВЕ процесами й розрядами, що розвиваються між паралельними торцями трубок дрейфу, електродами вихідного контуру ПК або елементами фідера.

В прискорювальній техніці також становить інтерес дослідження впливу вторинно-електронних струмів, супроводжуваних як множенням електронів у в полях найменших значень так і звичайною емісією вторинних електронів у полях більших значень при ВЧ тренуванні ЛПШ новою ВЧ системою.

Це стосується прискорювачів, що виготовлені для будь яких технологічних проектів, де ВЧ напруги і поля вперше збуджуються після їх виготовлення, коли електроди та поверхні прискорювальної структури, ще не тренуванні в умовах вакууму або попередньо тренуваних, що перебували у залишковому вакууму.

Після повного ВЧ тренування новою ВЧ системою струми електронів ВЕЕ з паралельних електродів прискорювача, паразитного впливу на імпульси ВЧ напруг і полів не мають. При цьому забезпечується стійкість характеристик Н-резонатора, до теплового впливу на його металеві електроди й поверхні.

Тобто, сталість значення коефіцієнтів ВЕЕ електродів (ВЕ емітерів), що опромінюються впродовж відносно тривалого часу електронами найменших та більших енергій, може досягатися у результаті безперервної генерації стабілізованих ВЧ напруг і полів у лінійному прискорювачі.

На рис. 2.6 (а-в) показані парні осцилограми імпульсів загальних струмів вторинно-електронної емісії $I_{ВЕЕ}$ (нижні) у стійко наростаючих передніх та спадаючих фронтах імпульсів ВЧ напруг резонатора $U_{РЕЗ}$ (верхні), за умов ВЧ

тренування, яке задається імпульсами нормальних форм ВЧ напругі полів, що змінюються за законами експоненти та збільшуються у часі

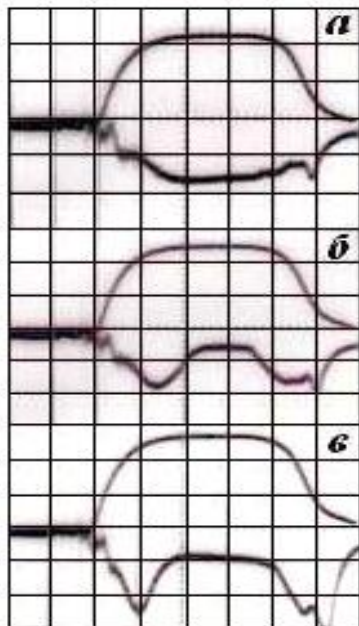


Рис. 2.6. (а-в) Імпульси ВЧ напруг резонатора U_{PEZ} (верхні) і струмів I_{BEE} , (нижні) наприкінці ВЧ тренування прискорювача МЛПД-3 в режимі роботи ПК з ПЗЗР+ПЗЗФ та майже досягнення власних вторинно-електронних властивостей торців трубок.

а-в – імпульси напруг U_{PEZ} . Масштаб: 5В/діл;

а-в – імпульси струмів I_{BEE} . Масшт.: 0,2ма/діл.

Масштаб по горизонталі: 50 мкс/діл.

Оскільки струми I_{BEE} визначаються різною поведінкою зміни ВЧ напруги U_{PEZ} , то саме це буде враховуватися при розгляді взаємодії електронів ВЕЕ з реальними ВЧ напругами і полями.

На рис. 2.7. (а-г) показані осцилограми імпульсів U_{PEZ} і загальних струмів ВЕЕ I_{BEE} з торців трубок дрейфу на виході з ЛПІ, збуджуваному новою ВЧ системою, при збільшенні амплітуд ВЧ імпульсів напруг U_{PEZ} від 5 В до 8,5 В, що дозволяє спостерігати за поведінкою форм імпульсів струмів ВЕЕ I_{BEE} .

Контрольні імпульси ВЧ напруг резонатора U_{PEZ} зареєстровані двохранієвим електронним осцилографом, здатність якого задовільно характеризує стабільний стан параметрів прискорювального Н-резонатора ЛПІ в цілому, при при пригніченні умов множення мультипакторних електронів між паралельними електродами.

На усіх імпульсах ВЕ струмів I_{BEE} ліворуч, на самому початку переднього фронту імпульсу U_{PEZ} , видно слабкі прояви короточасного множення електронів ВЕЕ (по основі це ~ 10 мксек), що не є перешкодою подальшому росту передніх фронтів усіх ВЧ імпульсів U_{PEZ} .

При найменших значеннях напруг U_{PE3} , слабкі струми множення електронів ВЕЕ, що присутні на цих осцилограмах будуть показані у розділі 3.

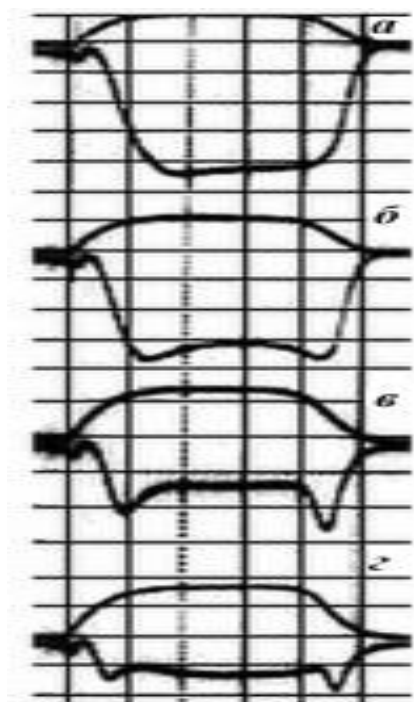


Рис. 2.7. (а-г) Імпульси ВЧ напруг резонатора U_{PE3} (верхні) і струмів ВЕЕ $I_{ВЕЕ}$ (нижні), на виході з прискорювача МЛПД-3, при фіксованому збільшенні напруг U_{PE3} , після ~ 25 хвилин тренування його електродів ВЧ напругами і полями, збуджуваних новою ВЧ системою.

а-г – напруги U_{PE3} . Масштаб: 5В/діл;

а-г– струми ВЕЕ $I_{ВЕЕ}$. Масштаб: 0,2ма/діл.

Масштаб по гориз: 50мкс/діл.

Поведінка імпульсів струмів ВЕЕ $I_{ВЕЕ}$ при ступінчастому змінюванні значень напруг U_{PE3} (рис. 2.7 б, в, г), може пояснюватися різними емісійними здібностями електродів, утворюючих ВЕ струми зміщення.

Про високі резонансні характеристики прискорювального Н-резонатора, електроди якого тренувані ВЧ напругами і полями (рис. 2.7), можна сказати наступне: загальна ВЕЕ з торців трубок дрейфу, поперечні розміри яких більше, ніж довжина зазору між ними, є реальною; множення електронів ВЕЕ між торцями трубок пригнічено; порушення погоджених умов роботи нової ВЧ системи з прискорювачем в цілому відсутнє; передні і задні фронти імпульсів U_{PE3} і струмів ВЕЕ $I_{ВЕЕ}$ стабілізовані; будь які осциляції на імпульсах ВЧ напруг відсутні; частота резонатора $f_{рез}$ є винятково стабільною.

У висновку слід зазначити, що пригнічення мультипакторних процесів і розрядів між паралельними торцями трубок дрейфу резонансного ЛПД, повністю поліпшує характеристики аксиально-симетричних ВЧ полів у зазорах між трубками дрейфу. Отримання інтенсивних пучків іонів з поліпшеними

параметрами прискорювальних зазорів, забезпечується усуненням одного із грубих факторів у прискорювальному Н-резонаторі – паразитних струмів вторинно-електронної емісії між паралельними електродами. При цьому стабілізація однорідних ВЧ полів між торцями трубок дрейфу забезпечує ефективну стабілізацію збуджуваних аксиально-симетричних ВЧ полів у зазорах між трубками.

2.6. Висновки до розділу

Основним досягненням проведених досліджень з'явилася розробка й створення нової компактної ВЧ системи для лінійного прискорювача іонів, де підсилювальний канал з'єднаний 2-ма незалежними ПЗЗ з резонатором високої добротності ($Q_0 \gg 1$) та повітряним коаксіальним фідером. В результаті цей спосіб збудження ВЧ напруг і полів у ЛПП, характеризує виняткову стабільність параметрів прискорювальних зазорів, утворюваних трубками дрейфу, поперечні розміри торців яких більше довжини між ними.

Експериментально показано, що при збудженні ВЧ полів у ЛПП новою ВЧ системою множення електронів ВЕЕ відбувається одночасно у всіх прискорювальних зазорах різних довжин. Електронне замикання електродів зазора найменшої довжини, приводить до спаду ВЧ напруг у розстроєному резонаторі. При цьому в зазорі найменшої довжини забезпечуються умови безперервного існування мультипакторного розряду, а в зазорах більших довжин у ЛПП, множення електронів ВЕЕ обмежено різким спадом ВЧ напруг і полів у резонаторі.

Дослідження впливу множення електронів ВЕЕ, що досягають паразитних ВЕ процесів і розрядів та дестабілізують високі електродинамічні характеристики Н-резонатора, дозволили визначити порушення його основних характеристик при збудженні простими ВЧ системами:

1) Різкий спад на етапі наростання імпульсів ВЧ напруг резонатора $U_{\text{РЕЗ}}$ до мінімальних значень, що визначається інтенсивністю ВЕ процесів.

2) Різке зміннення основної частоти Н-резонатора прискорювача f_{PE3} , максимальний зсув якого кратний власній смузі перепускання ($\Delta f_{МАКС} \approx 80$ кГц при $2\Delta f = 20$ кГц і $f_{PE3} \approx 100$ МГц). На протязі тривалості ВЧ імпульсу, значення зсуву частоти f_{PE3} безупинно зменшується, указуючи на те, що інтенсивність мультипакторних процесів і розрядів у ВЧ полях резонаторних структур високої добротності зменшується безперервно.

3) Різке появлення осциляцій (биттів) на імпульсах ВЧ напруг резонатора ЛПІ, указує на наявність у ньому 2-х коливань різних частот, що спочатку обумовлені як його власними параметрами так і такими, що виявляються у часі при множенні електронів ВЕЕ з паралельних електродів прискорювальних зазорів.

4) Різке зміннення вхідного й резонансного опорів Н-резонатора малогабаритного прискорювача МЛПД-3.

5) Різке порушення режиму «біжучих хвиль напруг у фідері» і суттєвого збільшення коефіцієнта стоячих хвиль. Наявність хвиль відбитих від розстроєного прискорювача, що поступають і у вихідний анодно-сітковий контур, разом з його власними напругами, створюють небезпечні перенапруги між електродами генераторного тріоду.

Дослідження загальних умов пригнічення множення електронів ВЕЕ в резонаторній структурі, дозволили суттєво поліпшити основні електродинамічні характеристики ЛПІ:

- Забезпечена безперервна стійкість та стабілізація режиму роботи підсилювального каналу, що одночасно генерує напруги 2-ох незалежних ВЧ автоколивань (ПЗЗР+ПЗЗФ), працюючи на один і той же прискорювальний Н-резонатор.
- Безперервне зростання з найменших значень результуючих ВЧ напруг і полів у ЛПІ збуджуваного новою ВЧ системою та ефективно пригнічуючих умови множення електронів ВЕЕ між паралельними торцями трубок дрейфу.

- Одночасно вимірювані імпульси ВЧ напруг резонатора ($Q \gg 1$) і загальних струмів ВЕЕ на виході з ЛПІ, збуджуваного новою ВЧ системою, указуючи на нормальні форми передніх і задніх фронтів $U_{\text{РЕЗ}}$ також забезпечують стабілізацію поведінки імпульсів струмів вторинно-електронної емісії ($I_{\text{ВЕЕ}}$), що є природними між паралельними мідними електродами розташованих у ВЧ полях.

Нова ВЧ система, що має у своїй сполучі прискорювальну структуру ЛПІ, з високою динамічною добротністю ($Q \gg 1$) та винятковою стабільністю її основної частоти, може бути корисної при розробці традиційних ЛПІ, збуджуваних генераторами на базі сучасних об'ємних коаксіальних ВЧ контурів з відомими генераторними тріодами), що створюються як для фундаментальних досліджень, так і для різних технологічних проектів у промисловості, медицині біології та народному господарстві.

РОЗДІЛ 3

ПАРАЗИТНІ ВЧ РОЗРЯДИ НА ПЕРИФЕРІЇ ЛПП, ЩО ПРОВОКУЮТЬ МУЛЬТИПАКТОРНІ ЯВИЩА МІЖ ЕЛЕКТРОДАМИ ПРИСКОРЮВАЛЬНИХ ЗАЗОРІВ

Мультипакторні процеси й розряди у ВЧ полях між торцями трубок дрейфу, що досягають у зазорі найменшої довжини електронного замикання їх торців трубок дрейфу, як відомо в прискорювальній техніці явища паразитні. Це пов'язано з тим, що резонаторна структура ЛПП при цьому втрачає свої резонансні властивості, а ВЧ поля в прискорювальних зазорах різко спадають до найменших значень, і просто подолати це неможливо. Електронні замикання можуть бути і між корисними електродами інших або штучно утворених діодних проміжків, що є елементами регулювання частоти резонатора, потрібного розподілу електричних полів по зазорах прискорювача та інше.

Однак, у науковій літературі відсутні будь які відомості, що вказують на порушення параметрів ЛПП декількома паразитними ВЕ розрядами, що можуть виникати одночасно в різних його областях. Як правило, розряди в ЛПП з підключеної ВЧ системою, виникають непередбачено (наприклад, при первинному запуску збудованого прискорювача), коли апаратура для виміру його основних параметрів ще не налагоджена. У цьому випадку виявлення областей ВЕ розрядів у резонаторі прискорювача можливо тільки при припиненні роботи його основних систем. Це, як мінімум відключення ПК, вакуумної установи, напуск атмосфери, розкриття вакуумного кожуху й циліндричної конструкції резонатора [24]. Для візуалізації наслідків ВЕ розрядів, здійснюється огляд торців трубок дрейфу, та елементів для настроювання та регулювання параметрів резонатора.

При наявності підозри на паразитні наслідки ВЕ розрядів на окремих електродах елементів їх розбирають, ретельно оглядають з метою виявлення порушення чистоти обробки у вигляді кольорів мінливості й корозійних плям.

Далі усуваються неточності, що допущені при проектуванні їх форм, вибору типу матеріалу, технології виготовленні й місця розташування щодо прискорювальних трубок та циліндричних стінок. По закінченню ремонтних робіт, елементи знову встановлюються у резонаторі та закривається його циліндрична конструкція і вакуумний кожух.

Якщо вжиті заходи виявилися недостатніми, то вони повторюються доти, поки повністю не будуть усунуті будь які ВЧ розряди, що можуть бути присутні і за межами прискорювальних зазорів ЛПП.

Найбільш ефективно пригнічення мультипакторних процесів і розрядів між торцями трубок дрейфу, при попередньо усунутих пробоях і розрядах в інших областях ЛПП, було досягнуто при збудженні його підсилювальним каналом з'єданого з 2-ома незалежними позитивними зворотними зв'язками з резонатором (ПЗЗР) та фідером (ПЗЗФ).

Параметри одного зі збуджуваних автоколивальних напруг, побічно залежать від паразитних ВЕ процесів між прискорювальними електродами у резонаторі. При цьому збільшення у часі ВЧ напруг резонатора здійснюється автоматично, що в результаті синхронного накладення зазначених напруг у резонаторі, забезпечує безперервний ріст ВЧ полів прискорювача.

Основною достоїнстю нового ВЧ способу збудження резонансного ЛПП є те, що при цьому усуваються паразитні ВЕ струми між торцями усіх трубок дрейфу та повністю зберігаються аксиально-симетричні ВЧ поля у зазорах між ними, що однозначно характеризує високі електродинамічні параметри прискорювального Н-резонатора.

На початку проведення досліджень впливу ВЕ процесів і мультипакторних розрядів на роботу резонансного прискорювача, викривлення імпульсів ВЧ напруг резонатора реєструвались лише у відсутності одночасного вимірювання його резонансної частоти та паразитних струмів ВЕЕ (за допомогою однопроменевого осцилографа), що виходять з передостаннього прискорювального зазору резонатора. Також не оцінювались і енергії електронів у цих струмах.

При цьому характер змінення ВЧ напруг і полів, прикладених до трубчастих прискорювальних електродів визначають загальні ВЕ емісійні здібності їх матеріалу й реальні електронні струми ВЕЕ. Витрачаючи енергію, що запасається у резонаторі, такі активні ВЕ струми лише погіршують його динамічну добротність.

Як впливає из розділу 2, вторинно-електронні струми на виході з резонатора прискорювача МЛПД-3, вимірюються розробленою методикою. Вибравши у якості контрольних параметрів прискорювача імпульси ВЧ напруг резонатора U_{PE3} й струмів ВЕЕ $I_{BЭЭ}$ з електродів передостаннього прискорювального зазору, поверхня торця якого звернена до виходу ЛПІ, можна однозначно характеризувати його стійки або викривлені параметри.

При наявності цифрових двопробневих осцилографів з високою чутливістю, виявилася можливість спостерігати на загальних імпульсах струмів вторинно-електронної емісії (I_{BEE}), найменші сплески мультипакторних струмів, як на самому початку, та майже у кінці імпульсів ВЧ напруг резонатора U_{PE3} , а також значні ВЕ струми на його передніх та задніх фронтах.

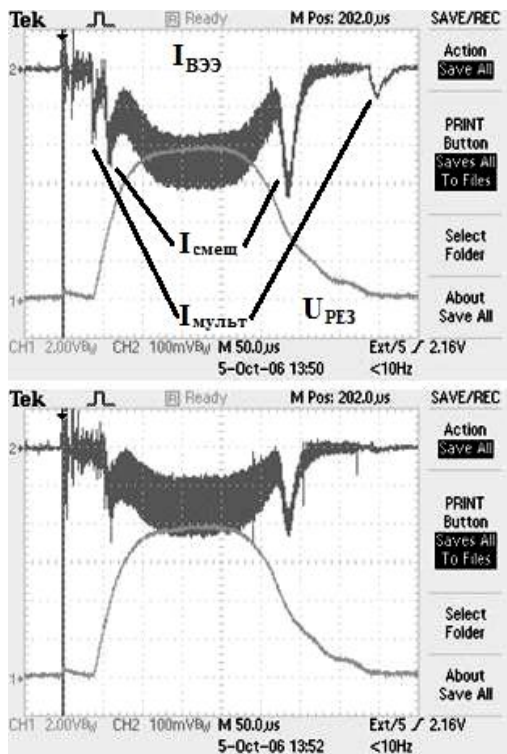


Рис. 3.1. Імпульси нормальних форм ВЧ напруг резонатора U_{PE3} (нижні) і повних струмів вторинно-електронної емісії I_{BEE} (верхні) на виході з прискорювача МЛПД-3, збуджуваного новою ВЧ системою, характеризуючи високі характеристики Н-резонатора з трубками дрейфу, поперечні розміри корисних паралельних торців яких більше довжини зазорів між ними.

На рис. 3.1 представлені осцилограми імпульсів стійких та стабілізованих ВЧ напруг резонатора $U_{\text{РЕЗ}}$ та повних струмів ВЕЕ $I_{\text{ВЕЕ}}$, що приводяться для наочності високих ВЕ здібностей мідних трубок дрейфу Н-резонатора, збуджуваного новою ВЧ системою за умов мультипакторних явищ.

З осцилограм випливає, що збудження резонансного ЛПП з тренуваними прискорювальними електродами – це нормальні контрольні імпульси ВЧ напруг резонатора $U_{\text{РЕЗ}}$ та загальних струмів ВЕЕ $I_{\text{ВЕЕ}}$, що природньо існують між паралельними торцями прискорювальних електродів.

На верхній парі осцилограм присутні такі вторинно-електронні струми: $I_{\text{ВЕЕ}}$ – ВЧ імпульс повного загального струму ВЕЕ з електрода предостанного зазору, поверхня якого звернена до виходу з ЛПП, відповідно до нормальної форми імпульсу ВЧ напруги резонатора $U_{\text{РЕЗ}}$; $I_{\text{МУЛЬТ}}$ – мультипакторні сплески збільшення та зменшення числа електронів ВЕЕ в діапазонах мінімальних значень напруг на початку переднього й наприкінці заднього фронтів імпульсу ВЧ напруг $U_{\text{РЕЗ}}$ і, найменших енергіях електронів у цих сплесках; $I_{\text{ЗМІЩ}}$ – електронні струми зміщення при різних швидкостях зміни напруг на передньому й задньому фронтах ВЧ імпульсу $U_{\text{РЕЗ}}$ ($I_{\text{ЗМІЩ}} = dU_{\text{РЕЗ}}/dt$ [76]).

На нижній парі осцилограм на ВЧ імпульсу повного струму ВЕЕ, мультипакторні сплески $I_{\text{МУЛЬТ}}$, на передньому й задньому фронтах імпульсу ВЧ напруг резонатора $U_{\text{РЕЗ}}$ відсутні, через повну затримку електронів ВЕЕ найменших енергій в алюмінієвій фользі товщиною 5мкм [78], що установлена перед циліндром Фарадея.

Цим підтверджується те, що множення електронів ВЕЕ між паралельними електродами може відбуватися тільки при малих значеннях мінливих за законами експоненти ВЧ напруг, збуджуваних у ЛПП.

Такі результати як найкраще, сприяють розумінню фізиці найменших та більших енергій електронів ВЕЕ, що взаємодіють з ВЧ напругами і полями та періодично падаючих на протилежні електроди прискорювальних зазорів.

Наявність на початку й майже наприкінці загального імпульсу струму ВЕЕ $I_{\text{ВЕЕ}}$, мультипакторних сплесків множення електронів найменших енергій і

звичайна емісія електронів високих енергій, можуть вважатися нормальними фізичними характеристиками ВЕ здібностей паралельних торців мідних трубок дрейфу, що використовуються у лінійних прискорювачах іонів.

У таперішньому розділі приводяться результати експериментальних досліджень умов розвитку паразитних ВЕ струмів на периферії Н-резонатора, що провокують виникнення мультипакторних процесів і розрядів між трубками дрейфу на осі прискорювача.

3.1 Умови виникнення мультипакторних процесів і розрядів у різних областях ЛПП збуджуваного новою ВЧ системою

Сучасна блок-схема збудження стійких ВЧ напруг і полів у резонаторі резонансного ЛПП, з мультипакторними властивостями мідних трубок дрейфу та пригнічення умов множення електронів ВЕЕ, що не досягають паразитних мультипакторних розрядів, докладно описана в розділі 2.

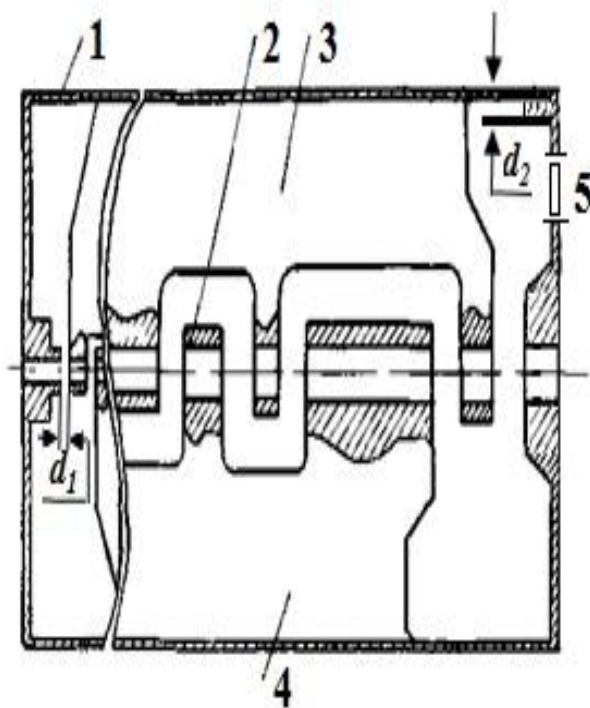


Рис. 3.2. Спрощена схема циліндричного Н-резонатора (1) з гребінчастими тримачами (3,4) трубок дрейфу (2) і двома зазорами d_1 і d_2 , у яких забезпечуються умови одночасного розвитку паразитних вторинно-електронних процесів на його периферії та провокуючих розрядів між торцями трубок, при збудженні прискорювача новою ВЧ системою.

На рис. 3.2 показано поперечний розріз Н-резонатора прискорювача МЛПД-3, де вказані області виникнення паразитних мультипакторних процесів

і розрядів. Це потрібно для розуміння взаємодії збуджуваних ВЧ напруг і полів збуджуваних у ЛПІ та струмів електронів вторинно-електронної емісії, що виходять з предостанього зазору резонатора.

Між паралельними торцями трубок дрейфу 2, збуджуються однорідні ВЧ поля. Поперечні розміри кільцевих торцевих поверхонь трубок дрейфу, більше або порівнянні з довжиною перших, утворених ними прискорювальних зазорів (табл.1 розділу 2).

Лінійний прискорювач іонів збуджується ПК з двома незалежними ПЗЗ з ВЧ напругами резонатора та фідером ($U_{\text{ПЗЗР}} + U_{\text{ПЗЗФ}}$). Посилення цих напруг у потужному підсилювачі відбувається одночасно, а в Н-резонаторі безпосередньо здійснюється їхнє синхронне накладення.

Тому що значення незалежних ПЗЗ з напругами резонатора та фідером перебувають у співвідношенні $U_{\text{ПЗЗФ}} \geq 0,25U_{\text{ПЗЗР}}$, то початкове зростання, найменших значень ВЧ полів прискорювача забезпечується ПК з'єданого з резонатором (ПЗЗР).

За цих умов і починається ініціація множення електронів ВЕЕ найменших енергій. Перед робочими змінами, коли ВЕ емісійні здібності паралельних електродів ще не треновані, множення електронів ВЕЕ може не досягати інтенсивних електронних струмів у першому зазорі прискорювача і паразитному зазору на периферії.

Як зазначено вище, безперервне збудження ВЧ напруг новою ВЧ системою, наростання результуючих напруг і полів у резонаторі ЛПІ збільшується безупинно. При цьому після проходження діапазону наростання ВЧ напруг найменших значень і умов початкового множення електронів ВЕЕ, різко відбувається їх зменшення (тобто швидке множення електронів, що почалося, також швидко й спадає, що й підтверджується на практиці явними мультипакторними сплесками електронів з найменшими енергіями).

Усі інші електрони вторинно-електронної емісії, що емітують із усіх електродів прискорювальних зазорів ЛПІ, та здобувають потенціальні енергії при переміщенні з одного електроду ДП, падаючи на протилежний електрод

протягом кожного напівперіоду поля (у повній відповідності із допущеннями Hatch/Williams [64,65]), попередньо збуджують електрони цього електрода. Потенційні енергії прискорених електронів витрачаються і на інтенсивне нагрівання матеріалу електродів, в тому числі і трубок дрейфу в цілому. Інші прояви витрат енергій падаючих електронів, тут не враховуються. В умовах такого тренування ВЧ полями та нагрівання електродів і поверхонь резонатора ($R = 195\text{мм}$) лінійного прискорювача іонів, на його периферії й виникла паразитна щілина з довжиною зазору d_2 .

Один кінець плескатої мідної платівки товщиною 2мм з габаритами 20×200 мм, залившись на довжині $\sim 40\text{мм}$ без олов'яного припою (через сублімацію при частих ВЧ нагріваннях), утворив з поверхнею резонатора паразитну щілину. Обмірювана при кімнатній температурі стандартним технологічним щупом, ця щілина виявилася $\sim 0,1 \dots 0,2$ мм. При цьому поверхня кінця платівки, не була перекручена протягом попередніх ВЧ тренувань.

Тому що раніше ВЧ і ВЕ розряди в прискорювачі були попередньо виявлені й усунуті то в зазначеному випадку при налагоджених методах реєстрації його основних параметрів та існуючої робочою контрольно-вимірювальної апаратурою, з'явилася можливість визначення типу невідомого паразитного ВЧ розряду.

Прискорювальний канал, що підключений на те саме резонансне навантаження прискорювача, у відсутності мультипакторних процесів і розрядів між електродами прискорювальних зазорів, працює у номінальному режимі роботи, де ПК з'єднаний з 2-ома незалежними ПЗЗ з резонатором та коаксиальним фідером.

При наявності зазначених мультипакторних явищ, діагностика основних параметрів ЛПП забезпечується значеннями викривлених форм імпульсів контрольних ВЧ напруг резонатора ($U_{\text{РЕЗ}}$), загальних ВЕ струмів ($I_{\text{ВЕЕ}}$) з потенціальними енергіями їх електронів, що реєструються на його виході циліндром Фарадея та металевими мішенями (у нашому випадку тонкими алюмінієвими фольгами).

3.2 Викривлення імпульсів ВЧ напруг резонатора та загальних струмів ВЕЕ, що виходять з ЛПІ при мультипакторних явищах у різних його областях

Порушення параметрів прискорювача, у якому досягнуто з залишкового до робочого вакууму, на початку його ВЧ тренування наступної робочої зміни, було несподівано виявлено викривленнями форм імпульсів ВЧ напруг резонатора U_{PE3} та загальних струмів ВЕЕ $I_{ВЕЕ}$, з паралельних торців передостаннього зазору прискорювального каналу.

При огляді (крізь скло з кварцу) динамічного стану нутрощів ЛПІ, було виявлено інтенсивні яскриння, як у найменшому зазору прискорювача, так і на внутрішній циліндричній поверхні резонатора, в місці кріплення верхнього гребінчатого тримача (рис.2). Відбувається це цілком у повній тиші, указуючи на те, що при таких ВЕ розрядах в розстроєному ЛПІ, електрична міцність основних елементів його ВЧ системи та фідера досить висока.

Відповідно до реальної погрози, що відбувається та щоб уникнути аварійної ситуації у вакуумній системі прискорювача, подача високовольтних постійних напруг імпульсного модулятора, була обмежена в часі ~ 15 хвилин. Це виявилось достатнім для встановлення типу ВЕ розряду на периферії ЛПІ.

Подібна ситуація яскриння зазначених розрядів у прискорювачі, після досягнення з залишкового до робочого вакууму, повторювалася та спостерігалася протягом короткочасних ВЧ тренувань наступних робочих змін. Оцінивши відносно безпечну поведінку розузгоджуваної прискорювальної структури ЛПІ з ПК, при таких електронних замиканнях електродів, була проведена реєстрація імпульсів контрольних ВЧ напруг резонатора U_{PE3} і ВЕ струмів $I_{ВЕЕ}$ з метою вивчення характеру їх поведінки у часі.

У цьому підрозділі представлені парні імпульси контрольних ВЧ напруг резонатора U_{PE3} (нижні криві) і струмів ВЕ емісії $I_{ВЕЕ}$ (верхні криві), що виходять з нього, обмірюваних протягом 15 хвилин (11:54...12:08) тренування ВЧ полями. Частота реєстрації парних ВЧ імпульсів – 1...2 хвилини, масштаби

досліджуваних сигналів по горизонталі й вертикалі зазначені в рамках екрана цифрового двопробного осцилографа високої чутливості.

На рис. 3.3 показано 4 осцилограми парних імпульсів ВЧ напруг U_{PE3} і загальних струмів ВЕ емісії I_{BEE} , на протязі початкового ВЧ тренування.

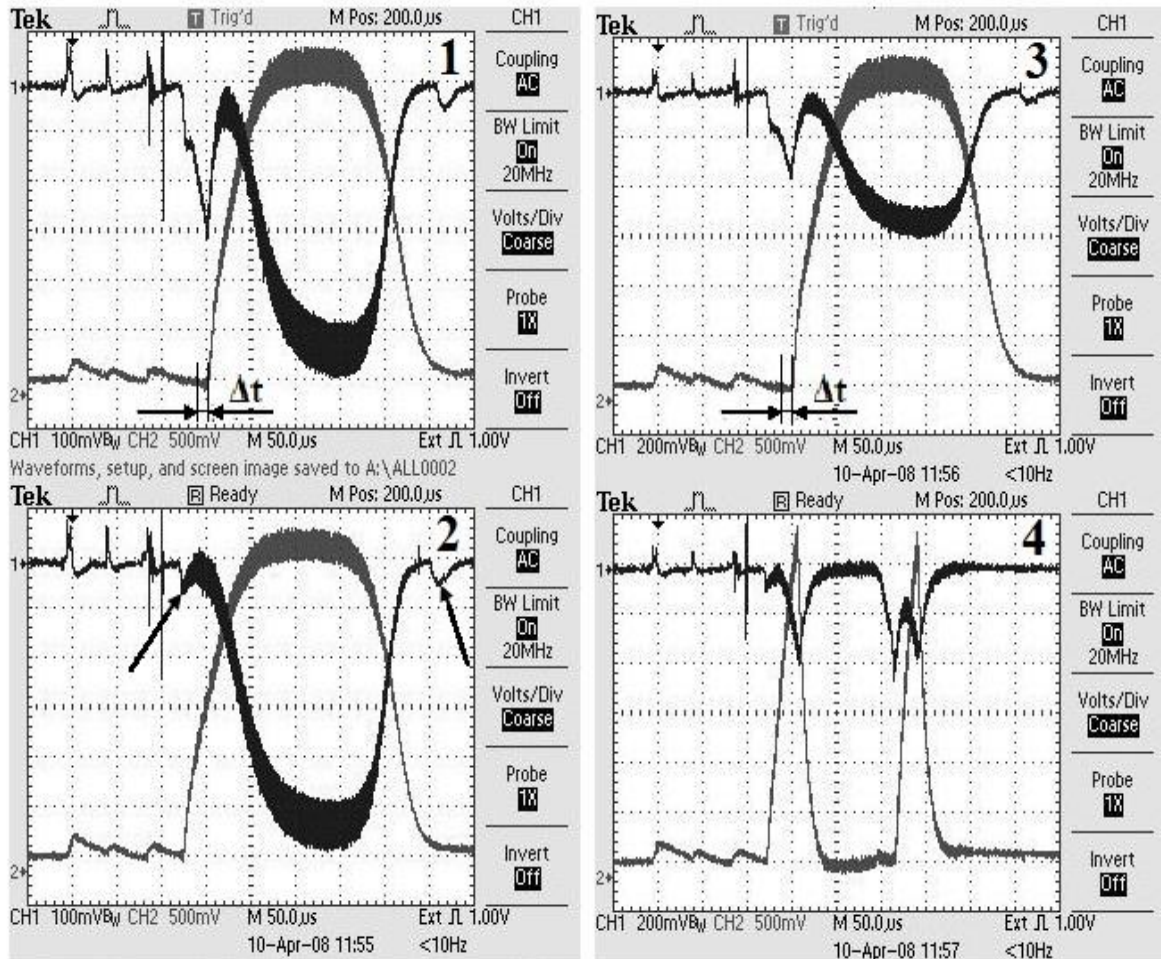


Рис. 3.3. Осцилограми викривлення форм імпульсів ВЧ напруг резонатора U_{PE3} (нижні) і струмів вторинно-електронної емісії I_{BEE} (верхні), на початку розвитку паразитних процесів на периферії резонатора, що провокують мультипакторні процеси і розряди на осі прискорювача МЛПД-3 при збудженні ВЧ полів новою ВЧ системою (11:54...11:57).

Протягом перших 3-ох хвилин (осцил. 1-3) ВЧ тренування вакуумованого ЛПД, коли поверхні трубок дрейфу ще не позбавились від шарів атмосферних

газів [40] наочно видно, що форми імпульсів ВЧ напруг резонатора U_{PE3} і загальних струмів ВЕ емісії I_{BEE} , не передбачають нічого небезпечного. Загальними для збудження нормальних імпульсів ВЧ напруг резонатора U_{PE3} , є майже нормальні форми їх передніх та задніх фронтів. У цей же час, на самому початку (осц.1) переднього фронту імпульса ВЕ струму I_{BEE} , можна відзначити викривлення форми мультипакторного сплеску. А наприкінці задніх фронтів імпульсів цих ВЕ струмів (осц.1-3) – форми таких же сплесків нормальні. Однак нормальними за формою й часу запуску є тільки контрольні імпульси U_{PE3} і повних ВЕ струмів I_{BEE} на осцилограмі 2. Нормальна ініціація пригнічених ВЕ струмів (зазначених стрілками) на початку й майже наприкінці ВЧ імпульсу I_{BEE} , відповідає коротким інтервалам часу мінімальних величин напруг переднього й заднього фронтів імпульсу ВЧ напруги U_{PE3} . Але з часом (осц.4), імпульс ВЧ напруги резонатора U_{PE3} грубо порушується.

На осцилограмах 1 та 3, також відзначено укорочення тривалості імпульсів по основі на малий проміжок часу Δt . Можна вважати, що затримка часу запуску імпульсу U_{PE3} на цих осцилограмах обумовлена незначною зміною форм і амплітуд мультипакторних сплесків на передніх фронтах імпульсів ВЕ струмів I_{BEE} . Однак, значимість швидкостей, що відбуваються у процесах множення електронів ВЕЕ, підтверджується в наступній осцилограмі 4, де форми ВЧ імпульсів U_{PE3} і I_{BEE} , перекручені досить різко.

Поясненням такій поведінці зазначених імпульсів ВЧ напруг та загальних ВЕ струмів у резонаторі прискорювача, у минулому стійко збуджуваного протягом тривалого часу, може бути тільки різка зміна ВЕ здібностей окремих ділянок електродних поверхонь, розташовуваних за межами зазорів.

Можна припустити, що тривалості часу 2-ох спроб нестійкого відновлення імпульсу ВЧ напруги резонатора U_{PE3} (на осцилограмі 4), виявилася достатньою для лавинного множення електронів на периферії резонатора (зазори d_2) о величини паразитного ВЕ розряду.

Різке зменшення значень ВЧ напруг U_{PE3} у резонаторі в цілому, також забезпечило множення електронів ВЕЕ до електронного замикання у зазорі d_1 .

Однак, умови малих величин ВЧ напруг у різко обуреному резонаторі ЛПІ й множення електронів ВЕЕ до електронного замикання зазору на периферії та електродами прискорювального каналу, – це моменти ВЧ тренування електродів паразитного проміжку на периферії та між трубками дрейфу.

На рис.3.4 (осцил. 5-8) показано продовження у часі ВЧ тренування резонатора ЛПІ, в умовах існування викривлених імпульсів ВЧ напруг та електронного замикання зазору на периферії, що провокує вторинно-електронні процеси і розряди між торцями трубок дрейфу.

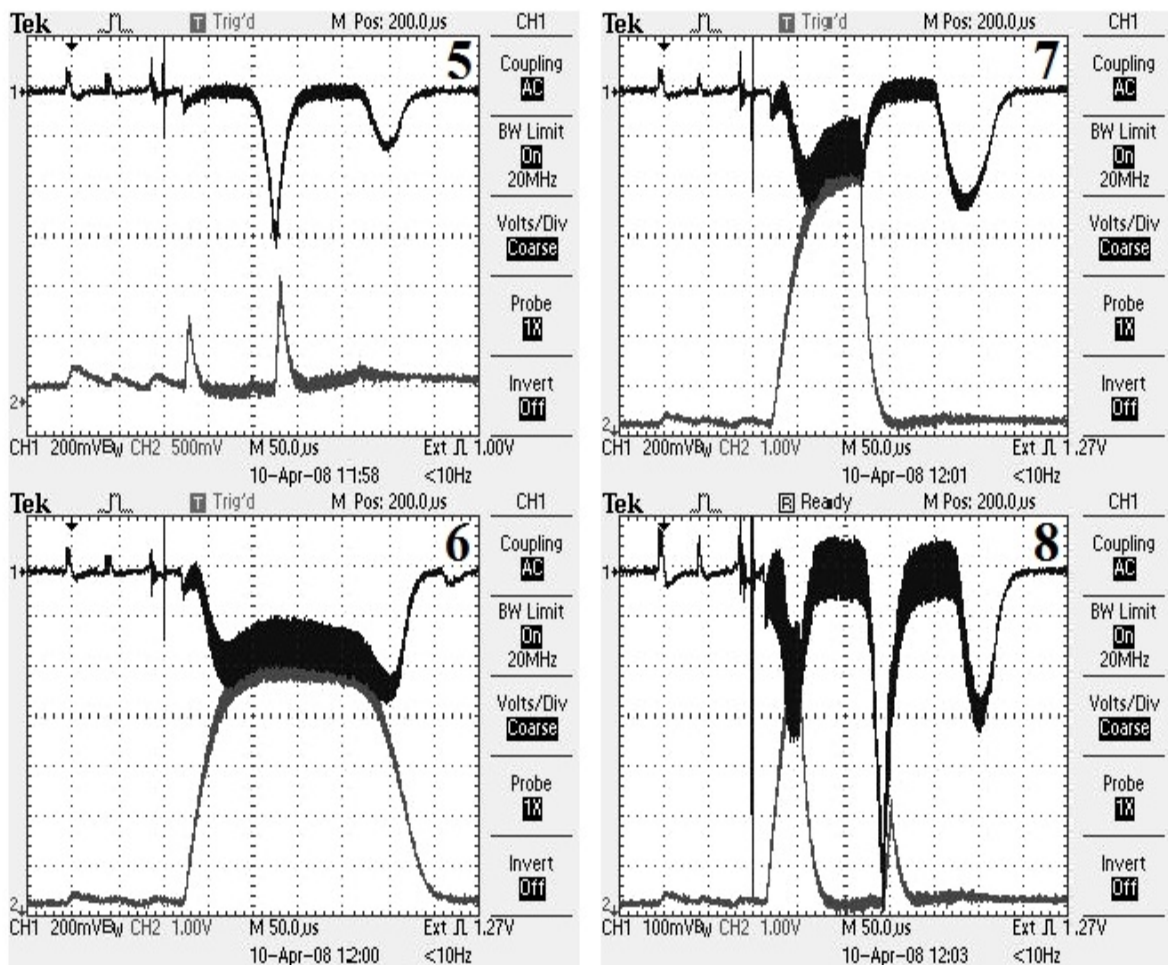


Рис. 3.4. Осцилограми викривлення форм імпульсів ВЧ напруг резонатора U_{PEZ} (нижні) і загальних струмів ВЕЕ I_{BEE} (верхні), при продовженому існуванні у часі ВЕ розрядів на периферії резонатора, що провокують мультипакторні процеси і розряди між торцями трубок дрейфу лінійного прискорювача МЛПД-3, збуджуваного новою ВЧ системою (11:58...12:03).

Загальними для цієї групи осцилограм є відсутність затримки запуску імпульсів U_{PE3} . Відносно тривалий час спаду імпульсу U_{PE3} – це різке змінення загальних інтенсивностей струмів ВЕ I_{BEE} . На осцилограмі 5 ми спостерігаємо за конкуренцію цих процесів, при 3-ох спробах відновлення нормального переднього фронту, скривленого ВЧ імпульсу напруги резонатора U_{PE3} . Слід зазначити, що його остання спроба, ілюструє одночасне множення електронів на периферії та у прискорювальних зазорах.

На осцил. 6 (12:00) ми убачимо проміжний результат інтенсивних ВЕ процесів при ВЧ тренуванні – нормальний запуск імпульсів напруги U_{PE3} та струму ВЕЕ I_{BEE} , що виходить ЛПП, а також форм їх переднього і заднього фронтів. Можна гадати, що в цей час, множення електронів ВЕЕ у імпульсі I_{BEE} , на початку переднього і в кінці заднього фронтів імпульсу U_{PE3} , з електродів вузької паразитної щилини на периферії, було з будь-яких умов зупинено. Тому й імпульси U_{PE3} і загального струму ВЕЕ I_{BEE} , на осцил. 6 не викривлені.

Інакше кажучи, під час відсутності паразитних ВЕ розрядів в переферійних областях резонаторної структури, проблеми мультипакторних процесів і розрядів у прискорювальних зазорах ЛПП, збуджуваного новою ВЧ системою, не мають бути автоматично.

Слабкий вплив, триваючих у часі ВЕ процесах на периферії резонатора, спостерігається й на осцилограмі 7, де початкові частини передніх фронтів імпульсів U_{PE3} і електронних струмів I_{BEE} також нормальної форми. Але ВЕ процеси, що продовжують розвиватися одночасно в різних областях прискорювального Н-резонатора, ще більш не передбачувані, чим на початку його ВЧ тренування.

Це підтверджується продовжуючою частиною ВЧ імпульсу U_{PE3} на тій самій осцилограмі 7. З цього випливає, що при мінімальних величинах спадаючої напруги U_{PE3} , в останній частині ВЧ імпульсу (задній фронт імпульсу U_{PE3} швидко спадає по лінії розгортання променя до кінця екрана осцилографа), а інтенсивність множення електронів ВЕЕ, протягом кінцевої частини імпульсу I_{BEE} , досить велика.

Тому що в резонаторі одночасно спостерігаються ВЕ розряди на осі й за межами прискорювального каналу, указують хаотичні зриви викривлених імпульсів контрольних напруг U_{PE3} і інтенсивних ВЕ сплесків (осц. 8), де множення електронів ВЕЕ може починатися кілька разів (у нашому випадку це тричі) протягом імпульсу ВЕ струму I_{BEE} . Помітимо, що викривлення імпульсів ВЧ напруг резонатора і ВЕ струмів різні, тобто, викривлення фронтів імпульсів U_{PE3} супроводжується таким же безперервним множенням електронів на загальному імпульсі I_{BEE} . При спадаючих до кінця, майже незмінних найменших напругах U_{PE3} , умови множення електронів ВЕЕ у струмах I_{BEE} , забезпечуються також автоматично.

На рис. 3.5 показані осцилограми наступних викривлень ВЧ імпульсів напруг і ВЕ струмів ВЕЕ, обумовлених синхронним множенням електронів ВЕЕ в узкій щілині на периферії та у прискорювальних зазорах і (12:04...12:08).

На осцилограмах 9...11 чітко видний нормальний запуск початкових частин передніх фронтів ВЧ імпульсів напруг U_{PE3} і відповідних мультипакторних сплесків на самому початку ВЧ імпульсів струму ВЕЕ I_{BEE} . Це може вказувати на те, що ініціатором триваючих зривів наростання імпульсів ВЧ напруг U_{PE3} , є ВЕ розряди на периферії, провокуючих такі ж розряди в прискорювальних зазорах.

На осцилограмі 12 запуск імпульсу напруги U_{PE3} затриманий також у часі на Δt . При цьому ВЕ розряди, що розвиваються в 2-ох різних областях ЛПП, досягають інтенсивних мультипакторних струмів, які безупинно перекарчують резонансні параметри резонатора високої добротності, й, відповідно, режим його узгодження з ПК.

Як впливає из осцилограм 10...12, амплітуди імпульсів ВЧ напруг резонатора U_{PE3} безнадійно знизилися до мінімальних значень, забезпечуючи умови безперервного множення електронів ВЕЕ до інтенсивних мультипакторних розрядів в різних областях обуреного резонатора прискорювача. Це підтверджується візуальним спостереженням інтенсивного іскріння зазначених розрядів у вакуумному резонаторі ЛПП.

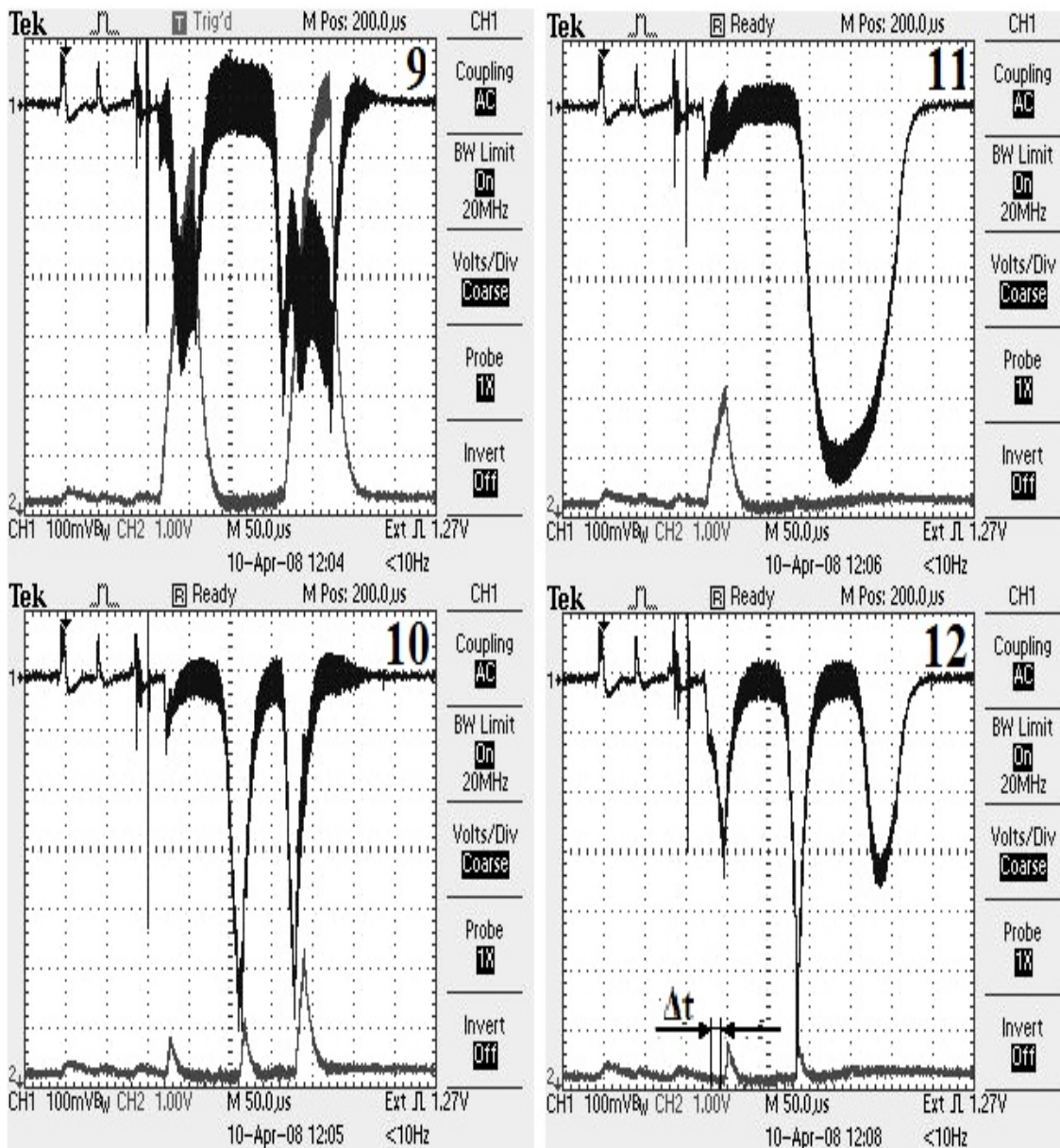


Рис. 3.5. Осцилограми викривлень нормальних форм імпульсів ВЧ напруг резонатора U_{PEZ} (нижні) та загальних струмів вторинно-електронної емісії I_{BEE} (верхні), при триваючих у часі паразитних розрядах на периферії резонатора, що провокують мультипакторні процеси і розряди між торцями трубок дрейфу прискорювача МЛПД-3, збуджуваного новою ВЧ системою (12:04...12:08).

Таким чином, умови розвитку ВЕ процесів у ВЧ полях паразитної щілини на периферії резонатора та між торцями трубок дрейфу лінійного прискорювача

МЛПД-3, можуть уважатися ідентичними мультипакторними явищами, що одночасно досягають електронного замикання електродів у зазначених областях. В таких умовах, тривале ВЧ тренування усіх прискорювальних зазорів, у тому числі й найменшої довжини, може вважатися згубним для потужного ПК, працюючого на грубо розстроєний резонатор ЛПП.

Тобто, наявність у периферійних областях ЛПП паразитних щілин, утворених як порушенням технології монтажу основних елементів резонатора прискорювача, так і обладнань, що регулюють його параметри, може приводити до виникнення ВЧ розрядів не тільки в місцях їх довільного розташування, але й у прискорювальних зазорах на осі. У часі це супроводжується грубим викривленням форм ВЧ імпульсів контрольних напруг U_{PEZ} , не даючи можливості проводити не тільки експериментальну підготовку ЛПП у робочий режим, але й прискорення заряджених іонів.

По закінченню обмеженого часу реєстрації грубо порушеної роботи ЛПП, було проведено демонтаж вакуумного кожуху та резонаторної структури. При огляді паразитного зазору, що утворився на її периферії було обмірювано розмір узької щілини, яка виявилась майже на два порядки менше довжини 1-го прискорювального зазору.

Причина викривлення контрольних сигналів U_{PEZ} і I_{BEE} прискорювача виявилася очевидною, пов'язаною з порушенням технології сполучення мідної латки із циліндричною поверхнею мідного резонатора м'яким припоєм – металом, що відрізняється від емісійних властивостей міді.

У зв'язку із цим метод усунення паразитного розряду був запропонований найбільше простий – олов'яний припій, що з'єднував плескату поверхню мідної латки з поверхнею резонатора було замінено твердим мідно-фосфорним.

При цьому стійкість збудження та установлення імпульсів ВЧ напруг і полів та загальних струмів ВЕЕ з торців трубок дрейфу лінійного прискорювачі МЛПД-3, збуджуваного новою ВЧ системою, було відновлено. Тобто пригнічення умов інтенсивного множення числа електронів ВЕЕ з паралельних

торців трубок дрейфу усіх прискорювальних зазорів, відбувається власними ВЧ напругами і полями резонансного лінійного прискорювача іонів.

3.3 Висновки до розділу

1. Експериментально показано викривлення нормальних форм імпульсів ВЧ напруг резонатора U_{PE3} та загальних струмів вторинно-електронної емісії I_{BEE} , що виходять з нього при наявності у прискорювачі, збуджуваного новою ВЧ системою, штучно виникненої вузької паразитної щілини на периферії резонаторної структури.

2. Досліджено, що викривлення імпульсів ВЧ напруг резонатора та загальних ВЕ струмів на виході прискорювача – це результати електронних замикань паразитної щілини на периферії резонатора та замикань поверхонь електродів найменшого зазору на осі і мультипакторних процесів в останніх прискорювальних зазорах.

3. Експериментально показано, що швидкості мультипакторних процесів і розрядів набагато більші швидкостей ВЧ напруг і полів, збуджуваних у резонаторі з високою динамічною добротністю ($Q \gg 1$) при їх наростанні або спаданні у ЛПП.

4. Встановлено, що при розробці, виготовленні та монтажу настроювальних, регулювальних і вимірювальних елементів, що уводяться у резонансний лінійний прискорювач іонів, зазори їх корисних діодних проміжків і штучно утворюваних проміжків із циліндричною поверхнею резонатора та грибінчатими тримачами трубок дрейфу, не повинні бути менше довжини першого прискорювального зазору.

Отримані експериментальні результати визначили вибір наступного напрямку досліджень, підтверджуючих отримані дані – розгляду потенціальних енергій електронів ВЕЕ, що проходять різні різниці ВЧ-НВЧ потенціалів, при переміщенні з одного електрода ДП на другий у складі окремого резонансного контуру. Для цього треба дослідити як електрони ВЕЕ з різними значеннями

енергій, що проходять різні різниці потенціалів у півперіодах фаз ($0-180^\circ$) між електродами ДП, габарити яких більше довжини зазорів між ними, та при падінні на них, попередньо визначають їх коефіцієнти вторинно-електронної емісії (K_{BEE}), як $K_{BEE} > 1$, так і $K_{BEE} < 1$.

РОЗДІЛ 4

ВЕЕ З ЕЛЕКТРОДІВ, НА ЯКІ ПАДАЮТЬ ЕЛЕКТРОНИ РІЗНИХ ЕНЕРГІЙ, ПРИСКОРЕНИХ ПОТЕНЦІАЛАМИ ПОСТІЙНИХ АБО ВЧ-НВЧ ДЖЕРЕЛ

На початку цього розділу розглянуто подібність загальних ВЕ емісійних властивостей електродів при падінні на них електронів різних енергій, що здобуваються при взаємодії з різними потенціалами постійних джерел, так і з автоматично періодичними ВЧ-НВЧ напругами і полями.

У випадку потенціалів постійних джерел, що змінюються від мінімальних значень відносно повільно протягом часу, енергії первинних електронів, що падають на мішень-електрод, визначають її загальний коефіцієнт вторинно-електронної емісії (ВЕЕ) [52]. При цьому відомо, що у вузькому діапазоні найменших енергій первинних, величини енергій електронів можуть уважатися майже однаковими, тому коефіцієнт ВЕЕ цієї мішені попередньо визначається як $K_{\text{ВЕЕ}} > 1$. За межами діапазону найменших енергій первинних, коефіцієнт ВЕЕ цього ж електрода попередньо визначається як $K_{\text{ВЕЕ}} < 1$. Також відомо [53-54], що інерційність виходу збуджених електронів ВЕЕ з металевих електродів, після попереднього падіння первинних, є дуже малою.

У випадку ВЧ-НВЧ напруг і полів енергії первинних електронів, що падають на паралельні електроди діодних проміжків (ДП) резонаторних структур, змінюються безперервно з бігом фаз кожного півперіоду за законами синусу. При цьому незрозуміло як формуються у півперіодах коливань діапазони різних енергій електронів, що падаючи на електроди, попередньо визначають їх коефіцієнти ВЕЕ [62-65]. Але із практики відомо, що при збудженні ВЧ-НВЧ приладів, електрони найменших енергій, що емітують з одного електрода ДП та падають на другий, попередньо визначаючи його коефіцієнт ВЕЕ як $K_{\text{ВЕЕ}} > 1$. Доказом цьому є паразитні ВЕ розряди, що автоматично виникають у ВЧ-НВЧ апаратурі, працюючої в космосі [91],

магнетронах [92], клістронах [42-45], прискорювачах та накопичувачах заряджених електронів [29]

У цьому розділі взаємодія електронів ВЕЕ із ВЧ-НВЧ напругами і полями, розглядається в моделі АС лампового тріода й окремого резонансного контуру, де його ємність (загальний діодний проміжок - ДП) є основним елементом, з паралельних електродів якого при збудженні ВЧ полів виникає емісія вторинних електронів, додатково витрачаючи активну ВЧ енергію, що запасється у резонансному контурі.

Підключення до паралельних електродів ДП вказаних напруг і полів, є основною електричною силою, що забезпечує емісію первинних електронів з одного електрода, придбання ними різних енергій та падаючих на другий, здійснюючи попередньо збудження його електронів та наступний рух у зворотньомунапрямку прискорювального ВЧ поля.

Показано, що розгляд взаємодії електронів вторинно-електронної емісії, що емітують з електродів ДП, у складі одинокого резонансного контуру (ОРК) високої добротності, при збудженні синусних ВЧ-НВЧ напруг і полів, які у часі змінюються за законами експоненти, може бути описано диференціальними рівняннями 2-го порядку у формі Ньютона.

4.1 ВЕЕ з електродів ДП, що перебуває під дією постійного потенціалу та падаючих електронах різних енергій, які регулюються від найменших значень потенціалами першої електронної гармати

Як відомо, основною характеристикою вторинно-електронних властивостей мішені (рис. 4.1), що знаходиться під дією напруги постійного джерела, є експериментальна залежність її коефіцієнта ВЕЕ δ від первинно падаючих на неї електронів з різними енергіями, які повільно збільшуються від мінімальних до максимальних значень постійними потенціалами першої електронної гармати [52].

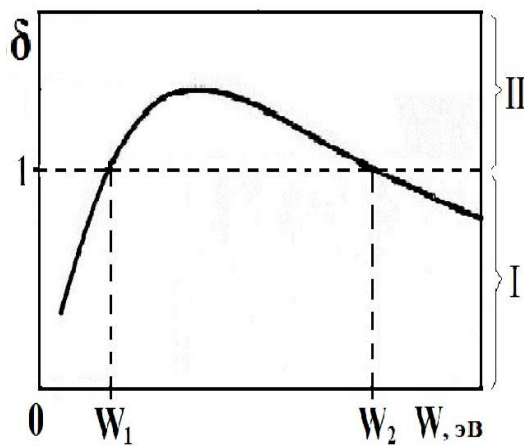


Рис. 4.1 Експериментальна залежність коефіцієнта ВЕЕ мішені δ від різних значень енергій W первинних електронів, що повільно прискорюються змінними постійними потенціалами першої електронної гармати від мінімальних значень.

При цьому вважається, що інтервал часу τ між падінням на мішень електрона і готовністю, при наявності прискорювального поля, виходу вторинного електрона у вакуум, становить для багатьох металів величину менше ніж $\sim (10^{-14} \text{ сек} \dots 10^{-15} \text{ сек})$ [86, 87].

Ці положення стають зрозумілими із аналізу роботи експериментальних схем дослідження коефіцієнта ВЕЕ мішені, що знаходиться у центрі сферичного колектора, от значень енергій падаючих первинних електронів.

На одній із них [52] що приведена на рис.4.2, для визначення коефіцієнта ВЕЕ мішені δ вказується, що струми I_1 первинних електронів e_n і їх енергій W_n , а також струмів I_2 вторинних електронів e_s та їх співвідношення I_2/I_1 , вимірюється при прикладених потенціалах від різних постійних джерел 5.

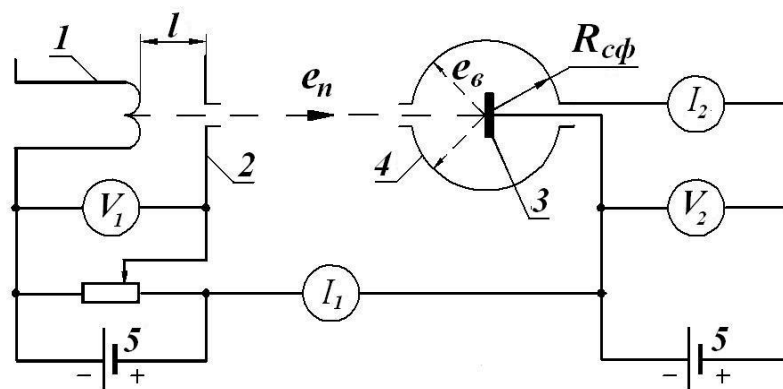


Рис. 4.2. Схема дослідження коефіцієнтів ВЕЕ мішені, що перебуває під дією потенціала сферичного колектора, при падінні на неї електронів з різними потенціальними енергіями.

Цикли змінення енергій первинних електронів від мінімальних значень до максимальних і у зворотному порядку, можуть здійснюватися у часі як відносно повільно (вручну), так і досить швидко автоматично.

Із залежності $\delta(W)$ також очевидно, що зміна малих енергій первинних електронів від W_1 до W_2 , характеризує ВЕЕ здібності мішені як максимальні з коефіцієнтом ВЕЕ, як $\delta(W) > 1$.

За межами зазначеного діапазону найменших енергій первинних електронів, тобто при $W < W_1$ і $W > W_2$, ВЕЕ здібності цієї ж мішені характеризуються як звичайні з коефіцієнтом ВЕЕ $\delta(W) < 1$.

Різні діапазони змінення величин коефіцієнта ВЕЕ мішені $\delta(W) > 1$ і $\delta(W) < 1$, на цій залежності відзначені праворуч фігурними дужками й позначені цифрами II і I.

Такий аналіз із обліком того, що інерційність вторинно-електронної емісії (ВЕЕ) з металів не може бути менш чим $\tau \sim 10^{-15}$ сек [86], приводить до наступних очевидних тверджень. Перше це те, що опромінення мішені електронами різних енергій, що автоматично змінюються на протязі кожного ВЧ-НВЧ півперіоду часу $T/2 \leq (0,5 \cdot 10^{-6} \text{с} \dots 0,5 \cdot 10^{-10} \text{с})$, при збереженні співвідношення $T/2 \gg \tau$, може також характеризувати її ВЕЕ здібності вище зазначеною експериментальною залежністю.

Друге це те, що змінення ВЕЕ здібностей мішені, що опромінюється протягом півперіодів часу енергіями первинних електронів, але при досить великій кількості окремих актів взаємодії первинних з мішенню, не залежать від порядку змінення їх величин.

Такі прості міркування й реальне існування ВЕЕ процесів і розрядів у радіофізичних приладах і установах, у тому числі й у малогабаритного прискорювачі іонів МЛПД-3 на базі Н-резонатора, сприяли теоретичному розгляду взаємодії електронів ВЕЕ, що емітують з паралельних торців трубчастих прискорювальних зазорів у резонаторних структурах з високою динамічною добротністю ($Q \gg 1$), з однорідними ВЧ-НВЧ полями, збудження у часі яких здійснюється за законами експоненти.

4.2 ВЕЕ з електродів ДП, що перебуває під дією ВЧ-НВЧ полів та падаючих електронах різних енергій, регульованих такими ж ВЧ-НВЧ полями

Елементарні теорії [63-66, 86-89, 90-99] ВЕЕ процесів між електродами ізолюваного діодного проміжку (ДП), при підключенні ВЧ напруг й раніше уведених напівемпіричних спрощуваних допущеннях підтвердили, що енергії електронів передбачуваної ВЕЕ, обумовлені значеннями ВЧ напруг і полів, прикладених до електродів. Однак інтервали фаз, коли величини енергій прискорених електронів мінімальні або більші, що падають на електроди в поточних фазах напівперіодів напруг, у таких теоріях не зазначені. У зв'язку із цим й попередні ВЕЕ здібності електрода, що опромінюється різними енергіями електронів (у статусі первинних), не можуть бути точно відомі. Тобто, розгляд ВЕ процесів з різними енергіями електронів, що падають на електроди та множаться в однорідних ВЧ-НВЧ полях, у цих теоріях відсутні.

Але при розробці таких теорій автори й не претендували на повноту інформації про фізичні процеси, що відбуваються між електродами, оскільки враховували лише окремі експериментальні дані, запозичені при вивченні ВЧ розрядів у газах [63-64]. Отримані ними результати лише рекомендувалися як напівемпіричні співвідношення для оцінки окремих параметрів пробоїв.

Надалі такий підхід у теорії ВЕЕ процесів у ВЧ-НВЧ електричних полях між електродами ДП часто повторюється й уточнюється. А на практиці ж, придушення умов множення ВЕЕ та існування паразитних ВЕ розрядів у багатьох випадках досягається експериментальними методами [53-61].

Більш повні характеристики ВЕ процесів у ВЧ-НВЧ полях, при ранніх припущеннях елементарних теорій, були розглянуті в моделі ДП у складі АС, де ламповий тріод з'єднаний позитивним зворотнім зв'язком (ПЗЗ) з окремим резонансним контуром (ОРК) зі змінною динамічною добротністю. При цьому основна увага отриманим результатам приділялася лише в частині фаз напівперіоду, що згодом, в порівнянні з експериментальними даними,

погіршувало загальне розуміння фізики, що висвітлюють ВЕ процеси. У зв'язку із цим важливість загальних енергій електронів ВЕЕ, протягом повних фаз кожного напівперіоду ($0-180^\circ$), залишилася актуальною.

4.3 Модель ДП шунтованого активним опір ВЕ мультипакції R_M , у складі лампового тріоду з'єднаного позитивним зворотним зв'язком з окремим резонансним контуром

Модель діодного проміжку, для розгляду значень енергій електронів ВЕЕ, що проходять у кожному півперіоду різні різниці ВЧ-НВЧ потенціалів при переміщенні з одного електрода ДП на другий, представлена на рис. 4.3.

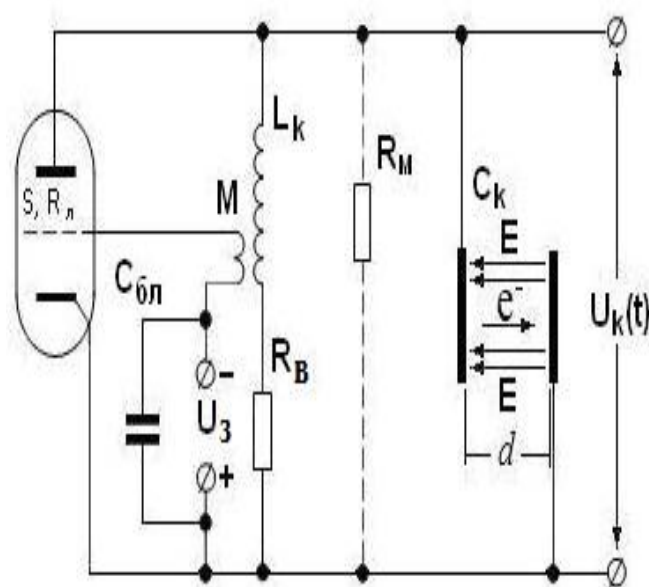


Рис.4.3. ВЧ система лампового тріода й окремого резонансного контуру, де паралельні електроди ємкості C_k , є вторинно-електронними емітерами, а електрони що витрачають енергію контуру, шунтують активним опір ВЕ мультипакції і діодний проміжок і ОРК в цілому.

Протягом кожного напівперіоду часу ($T/2$) з одного з електродів ДП відбувається емісія вторинних електронів, придбання ними енергій у прискорювальних полях при переміщенні на протилежний електрод. При цьому енергії прискорених електронів (у статусі первинних), падаючи на цей електрод, забезпечують перехід його електронів у стан попередньо збуджених [68]. Протягом наступного півперіоду часу, емісія попередньо збуджених електронів, зворотного напрямку їх руху, придбання ними енергій та падаючих

наприкінці на протилежний електрод, повторюється також в прискорювальному електричному полі.

Таким чином електрони, що періодично переміщуються з одного електрода ДП на другий, являють собою ВЕ емітери. А їх електрони активно витрачають енергію, що запасається у контурі. При цьому струми ВЕЕ між паралельними електродами еквівалентні опору вторинно-електронної мультипакції R_M , що шунтує і ДП і контур в цілому. Параметри окремого резонансного контуру (ОРК), де генеруються ВЧ-НВЧ напруги і поля, визначаються не тільки власними значеннями активних і реактивних елементів і лампового тріода, але й ВЕ властивостями матеріалу електродів ДП.

У цих умовах, вираження для вихідних ВЧ напруг ОРК і кругової частоти коливань, можуть бути записані як [18,100].

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

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

де U_{HH} , ϕ – початкові амплітуда й фаза наростаючої напруги; $\omega_0 = 2\pi/T$ – кругова частота коливань; $T=2\pi(L_K C_K)^{1/2}$ – тривалість періоду часу; C_K , L_K , R_B – ємкість диодного проміжку, індуктивність і власний активний опір витрат резонансного контуру; Q_0 – власна добротність резонансного контуру; R_{EP} – еквівалентний резонансний опір ОРК ($L_K/C_K R_{EP}$); S , R_L – крутість і внутрішній опір лампового тріода; $K_{II} = S R_{EP}$ – коефіцієнт підсилення напруги; M – величина взаємодукації, що визначає параметри позитивного зворотнього зв'язку контуру з ламповим тріодом; $K_{II33}=M/L_K$ – коефіцієнт позитивного зворотнього зв'язку; R_M – активний опір ВЕ мультипакції, що виникає автоматично між електродами ДП, шунтуючи його.

Кількість електронів цього опору, при багаторазовому повторюванні у часі напівперіодів ВЧ-НВЧ полів і ВЕ процесах безперервного множення

електронів між паралельними електродами діодного проміжку, може досягати їх вторинно-електронного замикання.

У відсутності електронного замикання електродів діодного проміжку $0 < R_M < \infty$, динамічна добротність резонансного контуру, з проявами початкових мультипакторних процесів, залишається також високою. А при досягненні мультипакторних розрядів між паралельними електродами, а активний опір R_M досягає найменших значень. Це різко спотворює параметри ємкості C_K і динамічної добротності ОРК. Однак наявність великої кількості електронів ВЕЕ, що існують між електродами діодного проміжку, указує на те, що збудження викривлених ВЧ-НВЧ напруг і полів зберігається, але основні вихідні параметри ОРК є вкрай зіпсованими.

З формули (4.1) випливає, що вираження у квадратних дужках множника експоненти може характеризувати як наростання ВЧ-СВЧ напруг у контурі, так і їх спадання. При цьому параметри вихідних напруг повністю залежать від значень опору R_M і характеристик елементів, що визначають загальну динамічну добротність резонансного контуру, як $Q = Q_0 / [K_{II} \cdot K_{33} - R_{EP} / R_{II} - R_{EP} / R_M - 1]$.

З формули (2) також очевидно, що для резонаторних структур, де зберігаються їх високі електродинамічні характеристики, зміна резонансної частоти коливань є незначною. Це зрозуміло й фізично, тому що всі основні характеристики електрофізичних ВЧ-НВЧ структур, форми електродів і довжини зазорів між ними, суворо задані геометричними розмірами їх металевих конструкцій.

4.4. Значення енергій електронів ВЕЕ, що проходять різні різниці потенціалів при переміщенні з одного електрода ДП на другий при їх наростанні у ОРК

Енергії первинних електронів, при взаємодії з експоненціально наростаючими ВЧ-НВЧ електричними полями автоматично заданої тривалості

півперіодів коливань, у кожний момент їх переміщення з одного електрода ДП на другий, розташованих на відстані d , визначимо за допомогою рівняння руху [101-105], записуваного при збереженні знака ”+“ у показнику експоненти наростаючих напруг ОРК і напруженостей між його електродами (1), як

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

де x відлічується від електрода, з якого емітують вторинні електрони, а коефіцієнт наростання $\alpha_n = \omega/2Q$ і $Q = Q_0/[K_{II} \cdot K_{33} - R_{EP}/R_{II} - R_{EP}/R_M - 1]$ при $SK_{II} - 1/R_{II} - 1/R_{EP} > 1/R_M$; E_{nn} – напруженість експоненціально наростаючих однорідних електричних полів між електродами ДП; φ – фаза поля, що змінюється у зв'язку з вибором початку відліку часу для старту беззупинно емітуємих електронів протягом фаз напівперіоду [101].

Оскільки емісія збуджених електронів починається із електрода з нульовим потенціалом, то їх кінцеві енергії будуть визначені, коли електрони пройдуть відстань, що визначається різницями потенціалів між електродами. Це також як і у випадку окремого електрона, при переміщенні із точки із нульовим потенціалом у точку з потенціалом U , що є незмінним на протязі їх взаємодії: $W = eU$ [102].

Інтегруючи рівняння (3) двічі [106], для довжини шляху одержуємо,

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

де $\gamma = \arctg \omega/\alpha_n$ – кут додаткового зрушення фаз електричного поля, обумовлений виникненням небажаних ВЕ процесів (з активними й реактивними складовими), величина якого для резонансних структур високої добротності ($Q \gg 1$) близька до 90° ($\gamma \rightarrow 90^\circ$).

Шукану відстань, що проходить кожен електрон, при різних різницях потенціалів, знайдемо з урахуванням граничних умов (при $t = 0$, початкові

координати попередньо збуджених електронів дорівнюють нулю, тобто $x=0$; при $t = T/2$ кінцеві координати всіх вторинних електронів, що перемістились з одного електрода на протилежний, дорівнюють довжині проміжку, тобто $x = d$). Виражаючи пройдену електронами різницю потенціалів через значення напруги U_{HH} на протилежному електроді, як $U_{\text{HH}} = E_{\text{HH}} \cdot d$ і виходячи з відомих співвідношень для параметрів ОРК в кінці кожного півперіоду часу через його динамічну добротність Q ($\alpha_{\text{H}}t = \pi/2Q$; $\omega/\alpha_{\text{H}} = 2Q$; $\gamma = \arctg \omega/\alpha_{\text{H}} = \arctg 2Q$), одержуємо

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

Позначаючи співвідношення у фігурних дужках як $G(\varphi, Q)$, остаточно одержуємо аналітичне вираження, що зв'язує основні параметри електронів при переміщенні з одного електрода ДП на протилежний. Здійснюється це у поточних півперіодах наростаючих ВЧ-НВЧ напруг, безперервно збуджуваних у резонансному контурі, динамічна добротність Q якого відзначається активним опором ВЕ мультипакції R_{M} , значення якого є змінним у часі.

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

Оскільки довжина ДП є дійсною позитивною величиною, а витрати в коливальному контурі характеризуються реальним значенням динамічної добротності $Q > 0$, то забезпечення отриманої рівності можливо тоді, коли вираження $G(\varphi, Q) > 0$, тобто є модулем своєї величини.

Слід зазначити, що величини eU_{HH} є значеннями потенційних енергій електронів, що пройшли різниці потенціалів при поточних фазах φ електричних ВЧ-НВЧ полів ($W_{\text{пот}} = e \cdot d \cdot E_{\text{HH}} = eU_{\text{HH}}$). Тому що параметр ωd діодного проміжку, має розмірність швидкості, усередненої за півперіод часу ($\omega d = \pi \frac{d}{1/2 \cdot T}$), то тут доречно ввести в розгляд величину $W_{\text{кін}} = m(\omega d)^2/2$, що характеризує мінімальні

значення кінетичних енергій для електронів, що долають ту ж саму відстань d між електродами ДП.

Уводячи також у розгляд відношення зазначених енергій, як $\sigma_1 = eU_{\text{нн}} / \frac{m(\omega d)^2}{2}$, одержуємо залежність відносних потенціальних енергій електронів від фаз півперіоду часу й динамічної добротності контуру Q ,

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

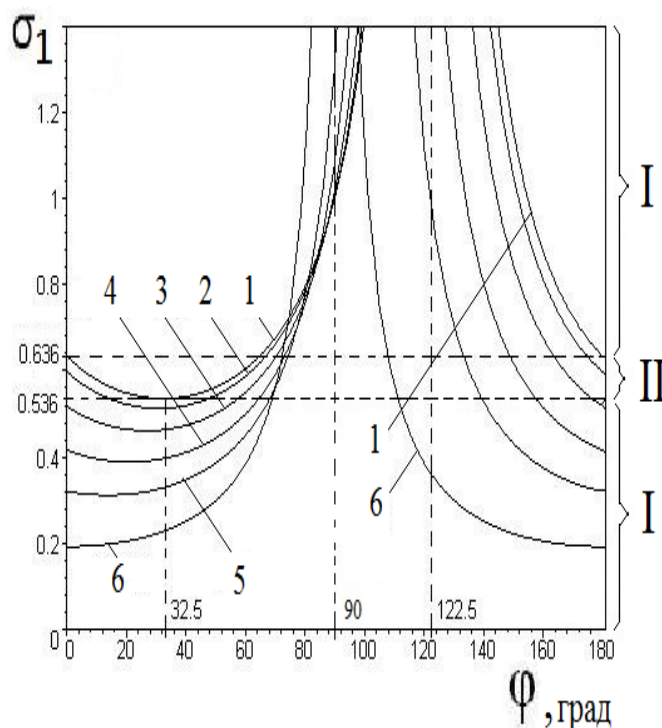


Рис. 4.4. Графічні залежності відносних потенціальних енергій електронів ВЕЕ, від фаз напівперіоду (0-180°) наростаючих ВЧ-НВЧ напруг, при фіксованих значеннях динамічної добротності резонансного контуру.

- 1– $Q = 157$; 2– $Q = 10$;
 3– $Q = 3,14$; 4– $Q = 1,57$;
 5– $Q = 1$; 6 – $Q = 0,6$.

На рис. 4.4. представлені графічні залежності $\sigma_1(\varphi, Q)$, відносних енергій електронів від фаз окремого півперіоду ($\varphi = 0 - 180^\circ$) коливань, при фіксованих динамічних добротностях резонансного контуру Q . При $Q \gg 1$, верхній границі найменших енергій первинних електронів $\sigma_{1В} = 0,636$, відповідає значення фаз $0^\circ, 65^\circ, 180^\circ$. Нижній границі їх енергій $\sigma_{1Н} = 0,536$, відповідає фаза $\varphi = 32,5^\circ$.

Максимальним значенням потенційних енергій електронів σ_1 відповідає асимптота при $\varphi = 122,5^\circ$. Ці значення фаз постійні в безупинних півперіодах коливань й розмежують області найменших та більших енергій електронів.

Мала відмінність значень потенціальних енергій прискорених електронів у діапазоні $0,536 < \sigma_1 < 0,636$, при $Q \gg 1$, дозволяє вважати їх майже однаковими.

І незалежно від того, до яких значень збільшуються потенціальні енергії первинних електронів протягом усього півперіоду, у початковому інтервалі фаз $\varphi \sim (0-65^\circ)$ ВЕ емісійні здібності електрода, на який вони падають, характеризуються як $K_{\text{ВЕЕ}} > 1$, а в інтервалі фаз півперіоду, що залишилися $\sim (65^\circ-180^\circ)$, як $K_{\text{ВЕЕ}} < 1$.

На графіку (рис.4.4) представлені діапазони змінних відносних значень потенціальних енергій електронів ВЕЕ $\delta(\sigma_1)$, придбаних у поточних півперіодах фаз при проходженні різних різниць потенціалів між електродами діодного проміжку.

Це аналогічно відомої експериментальній залежності коефіцієнта ВЕЕ електрода, від потенціальних енергій $\delta(W)$ падаючих первинних електронах, придбаних при прискоренні електростатичними потенціалами [53], відображених праворуч фігурними дужками й цифрами II і I.

З рис.4.4 (крива 1) також випливає, що ВЕ здібності електродів з коефіцієнтами ВЕЕ більше одиниці ($K_{\text{ВЕЕ}} > 1$), можуть визначати множення електронів ВЕЕ у початковому інтервалі фаз $(0-65^\circ)$. При динамічній добротності $Q \gg 1$, це може бути записано як $\sigma_1(\varphi) = |(\pi/2 \cdot \cos\varphi + \sin\varphi)^{-1}|$.

При коефіцієнтах ВЕЕ ($K_{\text{ВЕЕ}}$) електродів діодного проміжку менше одиниці $K_{\text{ВЕЕ}} < 1$, емісія числа електронів ВЕЕ між їх електродами, у кожному півперіоду коливань, є звичайною (без множення).

4.5. Значення енергій електронів ВЕЕ, що проходять різні різниці потенціалів, при переміщенні з одного електрода ДП на другий, при їх спаданні у ОРК

Розгляд енергій прискорених електронів при їх взаємодії з експоненційно спадаючими синусоїдальними полями ОРК, при електронному замиканні

електродів ДП, ідентично розглянутому вище випадку. У зазначеній автоколивальній системі це може бути розглянуте як при відключенні ВЧ джерела ($S \rightarrow 0$, $R_L \rightarrow \infty$), коли напруги контуру спадають від максимальних величин до мінімальних, а коефіцієнти ВЕЕ здібностей електродів ДП, змінюються у кожному півперіоду від $K_{ВЕЕ} > 1$ до $K_{ВЕЕ} < 1$.

При цьому рівняння руху електронів також може бути записане як,

$$m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} = e \cdot E_{cn} e^{-\alpha_c t} \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (8)$$

де коефіцієнт спаду $\alpha_c = \omega/2Q$, а $(Q = Q_0/[1 + R_{EP}/R_M])$ – динамічна добротність контуру з ВЕ здібностями електродів ємкості C_K . Усі інші параметри аналогічні позначенням, уведеним у розділах 4.1 і 4.2.

Інтегруючи рівняння (8) двічі [107], 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 $U_{CH} = d E_{СП}$, а також 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 $\gamma \rightarrow 90^\circ$), одержуємо,

$$d = \frac{e U_{CH}}{m \omega^2 d} \left\{ \frac{\pi}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{2Q}\right)^2}} \sin(\arctg 2Q + \varphi) - \frac{1 + e^{-\frac{\pi}{2Q}}}{1 + \left(\frac{1}{2Q}\right)} \sin(2\arctg 2Q + \varphi) \right\} \quad (9)$$

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

$$e U_{CH} |\{\Phi(\varphi, Q)\}| = m(\omega d)^2 \quad (10)$$

Уводячи в розгляд відношення зазначених енергій електронів σ_2 , як

$$\sigma_2 = e U_{CH} / \frac{m(\omega d)^2}{2}, \text{ з (10), також як і в наростаючих полях, одержуємо}$$

залежності відносних потенційних енергій електронів від фаз півперіоду коливань й добротності резонансного контуру Q ,

$$\sigma_2 = 2 \left| \{ \Phi(\varphi, Q) \}^{-1} \right| \quad (11)$$

На рис. 4.5 представлені графічні залежності $\sigma_2(\varphi, Q)$, що аналогічні $\sigma_1(\varphi, Q)$.

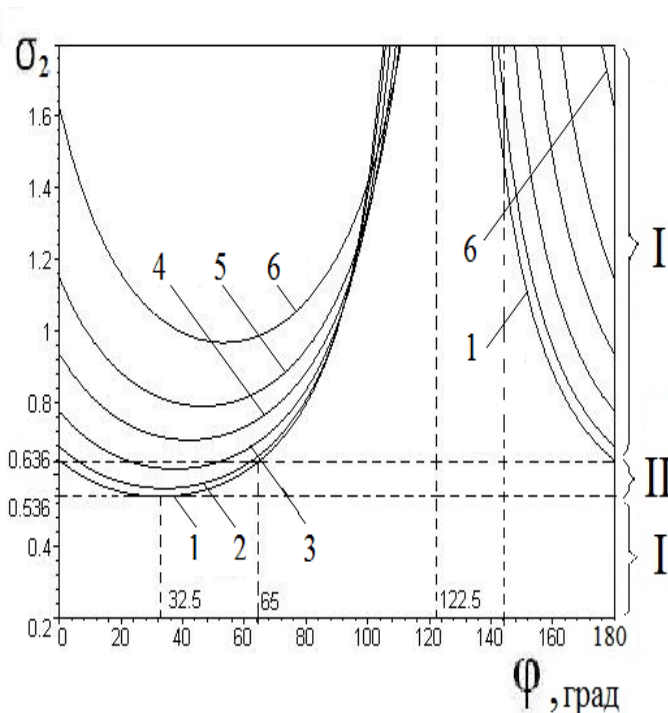


Рис. 4.5. Графічні залежності відносних потенціальних енергій електронів від фаз напівперіоду (0-180°) спадаючих ВЧ-НВЧ напруг при фіксованих значеннях динамічної добротності резонансного контуру:

- 1 – $Q = 157$; 2 – $Q = 10$;
- 3 – $Q = 3,14$; 4 – $Q = 1,57$;
- 5 – $Q = 1$; 6 – $Q = 0,6$.

При $Q \geq 10 \dots 157$ в інтервалі фаз (0–65°), значення мінімальних енергій електронів, що падають на електроди ДП, та попередньо характеризують їх ВЕЕ здібності як $\delta(\sigma_2) > 1$, перебувають у діапазоні мінімальних значень енергій $\sigma_2 = (0,536–0,636)$. За межами зазначеного діапазону енергій електронів $\delta(\sigma_2) < 1$. У інтервалах фаз півперіодів (65° ...180°), що залишилися, коефіцієнти ВЕЕ кожного з електродів цього ж діодного проміжку характеризуються як $\delta(\sigma_1) = \delta(\sigma_2) < 1$. Діапазони змін коефіцієнтів ВЕЕ електродів ДП, на графіку також відображені праворуч фігурними дужками й цифрами II і I. З рис.4.5 (крива 1) також впливає, що електроди ДП, з коефіцієнтами ВЕЕ більше одиниці, можуть визначати множення електронів у початковому інтервалі фаз (0-65°).

півперіодів коливань. При динамічній добротності $Q \gg 1$ (рис.4.5, крива 1), це може бути записано як $\sigma_2(\varphi) = |(\pi/2 \cdot \cos\varphi + \sin\varphi)^{-1}|$.

При коефіцієнтах ВЕЕ ($K_{ВЕЕ}$) електродів ДП менше одиниці $K_{ВЕЕ} < 1$, емісія числа електронів ВЕЕ з кожного з електродів, є звичайною (без множення).

З отриманих результатів випливає, що множення числа електронів і їх звичайна емісія з електродів ДП, може починатися з перших ВЧ-НВЧ півперіодів коливань. Однак, на відміну від ВЕ процесів, що черпають енергію від ВЧ-НВЧ джерела, при наростанні збуджуваних ВЧ напруг і полів, ВЕ процеси при їх спаданні, не виникають нижче значень енергій прискорених електронів $\sigma_2=0,536$ і постійної по величині фази $\varphi = 32,5^\circ$.

Наявність у зазначених графічних залежностях рис. 4.5 мінімумів і максимумів значень потенціальних енергій електронів, описуваних вираженням (11), також указує на стійкість розглянутих ВЕ процесів на початку фаз півперіоду коливань та їх нестійкість в подальших частинах фаз цього півперіоду.

4.6. Висновки до розділу

Визначені графічні залежності відносних потенціальних енергій прискорених електронів ВЕЕ σ_1 і σ_2 , що здобуваються у однорідних ВЧ-НВЧ електричних полях з бігом фаз напівперіоду, і падаючих (у статусі первинних) на протилежний електрод діодного проміжку, у складі лампового тріоду і резонансного контуру з динамічною добротністю ($Q \gg 1$), попередньо визначаючи значення їх загальних коефіцієнтів ВЕЕ.

Показано, що в початковому інтервалі фаз ($0 \dots 65^\circ$) напівперіодів ВЧ-НВЧ напруг і полів, збуджуваних в ОРК (з $Q \gg 1$), енергії прискорених електронів, що падають на електроди ДП, попередньо характеризують їх коефіцієнти ВЕЕ як $\delta(\sigma_1) = \delta(\sigma_2) > 1$.

Із залежностей рис. 4.4 і 4.5 випливає, що при динамічній добротності контуру $Q \gg 1$, мінімальні значення нижній границі $\sigma_{1\text{НГ}} = \sigma_{2\text{НГ}} = 0,536$ і максимальні значення верхній $\sigma_{1\text{ВГ}} = \sigma_{2\text{ВГ}} = 0,636$, енергії електронів, прискорених у ДП при наростанні або спаданні ВЧ напруг, мають майже однакові значення й визначаються початковим інтервалом фаз від 0 до 65° кожного напівперіоду коливань. Значення фаз $\varphi = 0-32,5^\circ-65^\circ-122,5^\circ-180^\circ$ кожного півперіоду часу, розмежовують діапазони найменших і більших енергій електронів ВЕЕ.

Енергетичний розкид найменших енергій електронів становить $\sim 16\%$ ($\Delta\sigma_1 = \Delta\sigma_2 = 0,636 - 0,536 = 0,1$). При цьому ВЕ властивості електродів ДП характеризуються як $\delta = \delta(\sigma_1) = \delta(\sigma_2) > 1$. І протягом напівперіодів наростаючих або спадаючих напруг, ВЕ властивості цих електродів більш стійкі, чим у раніше отриманих даних ($0,318 - 0,268 = 0,05$) [85,86].

Із проведеного розгляду також виходить, що умови розвитку ВЕ процесів між електродами ДП у складі одиночного резонансного контуру, залежать від його динамічної добротності. При $Q > 10$ і більше, зазначені добротності ОРК, як при наростанні ВЧ-НВЧ напруг, так і спаді, майже збігаються з півперіоду в півперіод часу. При $Q < (10 \dots 1)$ ці умови різні.

Результати для $\delta(\sigma_1)$ і $(\delta\sigma_2)$ підтверджуються експериментальними результатами, отриманих в умовах керування вторинно-електронними процесами в Н-резонаторі з різними довжинами зазорів (розд. 3, рис.3.1).

Поділ функцій ВЕ здібностей мідних електродів (емітер-колектор) і їх неоднозначних коефіцієнтів ВЕЕ протягом кожного на півперіоду коливань, поліпшує розуміння механізму ВЕ процесів і розрядів між електродами діодних проміжків у складі ВЧ-НВЧ резонаторних структур.

У діапазоні найменших енергій електронів, що падають на електрод ДП, його коефіцієнт ВЕЕ попередньо визначається, як $K_{\text{ВЕЕ}} > 1$. Електрони більших і найбільших енергій, що продовжують падати на оцей електрод, його коефіцієнт ВЕЕ визначається, як $K_{\text{ВЕЕ}} < 1$. Це підтверджує загальні умови множення

електронів ВЕЕ між електродами діодних проміжків у складі, радіофізичних ВЧ-НВЧ систем.

РОЗДІЛ 5

КЕРУВАННЯ МУЛЬТИПАКТОРНИМИ ПРОЦЕСАМИ І РОЗРЯДАМИ У Н-РЕЗОНАТОРІ ПРИСКОРЮВАЧА МЛПД-3

Найбільш ефективним ВЧ методом керування мультипакторними процесами і розрядами в малогабаритному лінійному прискорювачі дейтронів МЛПД-3, є одночасне збудження двох незалежних ВЧ автоколивачів на основній частоті його Н-резонатора. При цьому параметри одного з ВЧ напруг ПЗЗ з резонатора, прямо залежать від паразитного впливу ВЕ процесів і розрядів в ньому, а інших ВЧ напруг ПЗЗ з фідера – побічно. В результаті у резонаторі здійснюється безперервний ріст імпульсів ВЧ напруг і полів, як при ініціації множення електронів ВЕЕ найменших енергій, так і їх подальшого безперервного пригнічення.

Достоїнстю сучасного методу стабілізації збуджуваних ВЧ напруг і полів у лінійному прискорювачі іонів МЛПД-3, та автоматичного пригнічення множення електронів ВЕЕ, є те, що в об'ємі його Н-резонатора повністю зберігається власна картина ВЧ полів і коефіцієнтів ВЕ властивостей усіх мідних трубок дрейфу.

При цьому у ЛПП не треба змінювати форми торців трубок дрейфу, вводити додаткові електроди, з підключенням до них напруг постійних або ВЧ джерел. Не потрібно також на прискорювальні електроди напилювати будь-які речовини, з коефіцієнтом ВЕЕ менше одиниці. А інтенсивністю початкових мультипакторних процесів, виникаючих між паралельними мідними дисками, насаджуваних на торцях трубок, поперечні габарити яких більше довжини зазорів між ними, можна керувати амплітудами і фазами зазначених позитивних зворотних зв'язків, досягаючи високої стабілізації ВЧ напруг і полів, збуджуваних новою ВЧ системою у прискорювальному Н-резонаторі.

Метою розділа є експериментальне дослідження керування стабілізацією імпульсів ВЧ напруг і пригнічення мультипакторних процесів і розрядів між електродами прискорювальних та інших корисних ДП, що знаходяться під дією ВЧ напруг і полів у резонансному лінійному прискорювачі іонів.

5.1. Параметри ВЧ напруг і полів ЛПП, що збуджується новою ВЧ системою при пригніченні мультипакторних процесів між торцями трубок дрейфу

Дослідження високих електродинамічних характеристик Н-резонатора з ВЕ емісійними властивостями мідних електродів проводилося на лінійному прискорювачі протонів і дейтронів МЛПД-3 з реконструюваним прискорювальним Н-резонатором [12-14]. У такому прискорювачі трубки дрейфу розташовані на двох плескатих гребінчастих тримачах, основа кожного з них укріплена по діаметру до протилежних поверхнях циліндричного резонатора.

Дослідження впливу індуктивних елементів ПЗЗ, уведених у Н-резонатор та фідер, на його резонансну частоту й коефіцієнта стоячих хвиль у фідері, проводилося при порівнянні ВЧ збудження МЛПД-3 вимірювальним стандартним генератором (СГ), з попереднім підсилювачем на 200 Вт. У межах точності вимірів ~ 5 кГц, частота прискорювача не змінюється при його ВЧ збудженні від СГ з попереднім підсилювачем, або ПК з 2-ма ПЗЗ (ПЗЗР + ПЗЗФ). Цим підтверджується відсутність впливу на характеристики ЛПП, елементів ПЗЗ, уведених у резонатор і фідер.

Співвідношення амплітуд ВЧ напруг, що одночасно генеруються автоколивальними контурами з ПЗЗР і з ПЗЗФ, обирались з умов забезпечення високої стійкості резонансних характеристик ЛПП при пригнічених мультипакторних розрядах і необхідних значеннях напруг і полів для прискорення іонів. Це необхідно для автоматичного запобігання наслідків можливої неузгодженості у ВЧ системі прискорювача, де ПК охоплений одним

ПЗЗР, виникнуть швидкі паразитні ВЕ явища, що можуть грубо виводити Н-резонатор з робочого режиму.

Винятково стабілізований режим роботи нової ВЧ системи прискорювача МЛПД-3 з трубками дрейфу, маючих диски з паралельними торцями різні розмірів, що є вкрай потрібним для досягнення завданого розподілу ВЧ полів у зазорах між трубками дрейфу прискорювача, показано на рис. 5.1.

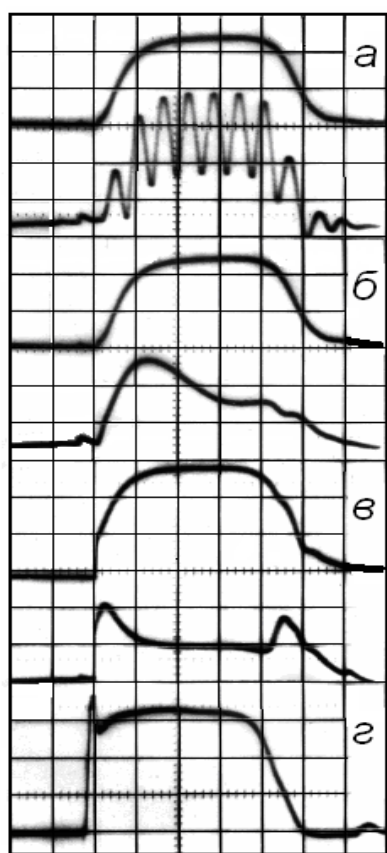


Рис. 5.1. Імпульси стабілізованих ВЧ напруг основних систем ЛПД, збуджуваного новою ВЧ системою, де торці трубок дрейфу мають більші габарити, відносно довжини зазорів між ними.

а,б – ВЧ напруги U_{PE3} (верхні) і частотного змішувача $U_{ЧСМ}$, при розстройках 20кГц(**а**) і 0(**б**).

Масштаб: U_{PE3} – 5 В/діл; $U_{ЧСМ}$ – 0,5 В/діл.;

в – ВЧ напруги падаючих $U_{ПАД}$ (верхня) і відбитих $U_{ВІДБ}$ (нижня) хвиль у фідері.

Масштаб: $U_{ПАД}$ – 10 В/діл; $U_{ВІДБ}$ – 5 В/діл.

г – напруга модулятора: $U_{МОД}$ – 5 В/діл.

Масштаб по горизонталі: 50 мкс/діл.

При амплітуді імпульсу падаючої хвилі $U_{ПАД} \approx 30\text{В}$ і відбитої хвилі $U_{ВІДБ} \approx 5\text{В}$, коефіцієнт біжучої хвилі у фідері, дорівнює 1,4. Відсутність будь яких осциляцій на імпульсах напруг основних систем лінійного прискорювачі іонів, указує на те, що його резонансна частота ($f_{PE3} \approx 98,134\text{МГц}$), що виміряна вимірювальним стандартним генератором, визначається власними реактивними і активними опорами резонаторної структури, де мультипакторні процеси і розряди ефективно подавлені.

При цьому між дисками, насаджуваних на торцях трубок дрейфу продовжується існування ВЕ струмів електронів значно більших енергій, що еквівалентно додатковому активному опору, витрачаючого енергію, що запасається у резонаторній прискорювальній структурі ЛПІ, зменшуючи значення її динамічної добротності.

На рис. 5.2 представлені осцилограми напруг частотного змішувача $U_{ЧСМ}$ при виміру резонансної частоти ЛПІ, збуджуваного новою ВЧ системою, методом биттів за допомогою вимірювального стандартного генератора.

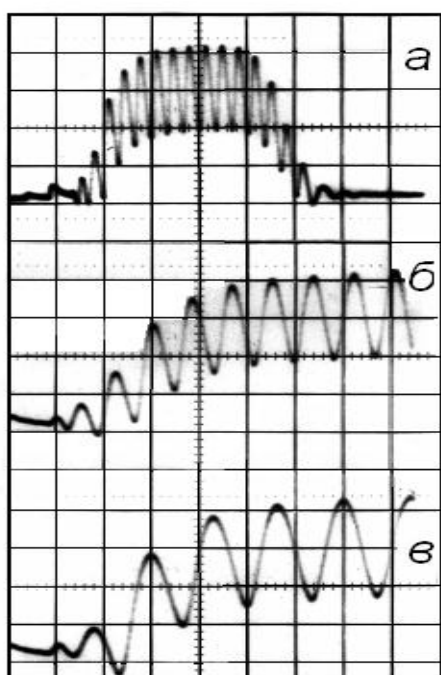


Рис. 5.2. Осцилограми стійких биттів по імпульсу ВЧ напруг частотного змішувача, та на передньому фронті, при різних масштабах розгорнення променя осцилографа й розстройках основної частоти $\Delta f = |f_{РЕЗ} - f_{СГ}|$, що реєструється за допомогою стандартного генератора.

а $-\Delta f = 60 \text{ кГц}$;

Масштаб по гориз.: $- 50 \text{ мкс/діл}$;

б, в $-\Delta f = 60 \text{ кГц}, 40 \text{ кГц}$.

Масштаб по гориз.: $- 20 \text{ мкс/діл}$.

Детальний аналіз переднього фронту імпульсу ВЧ напруги частотного змішувача, від частоти биттів $\Delta f = 60 \text{ кГц}$ (**а**) до частоти биттів $\Delta f = 40 \text{ кГц}$ (**в**) підтверджує те, що при подавленому паразитному множенні електронів ВЕЕ, стабільність частоти резонаторного ЛПІ є винятково високою.

Високі резонансні параметри ЛПІ, підтверджуються графічними залежностями, представлених на рис.5.3 (**а-г**), при оптимальній фазі напруг у контурі з ПЗЗР та зміні фаз напруг у контурі з ПЗЗФ, й навпаки.

Нумерація залежностей: I- $U_{\text{ПАД}} = f(\varphi_{\text{ПЗЗР}})$; II- $U_{\text{ПАД}} = f(\varphi_{\text{ПЗЗФ}})$; III- $U_{\text{ВДБ}} = f(\varphi_{\text{ПЗЗР}})$; IV- $U_{\text{ВДБ}} = f(\varphi_{\text{ПЗЗФ}})$; V- $U_{\text{РЕЗ}} = f(\varphi_{\text{ПЗЗР}})$; VI- $U_{\text{РЕЗ}} = f(\varphi_{\text{ПЗЗФ}})$; VII-КСХ = $f(\varphi_{\text{ПЗЗР}})$; VIII-КСХ = $f(\varphi_{\text{ПЗЗФ}})$; IX- $f_{\text{РЕЗ}} = f(\varphi_{\text{ПЗЗР}})$; X- $f_{\text{РЕЗ}} = f(\varphi_{\text{ПЗЗФ}})$.

З рис. 5.3(а) випливає, що настроювання напруги $U_{\text{ПАД}}$ на максимум амплітуди, визначається інтервалом фаз $\varphi_{\text{ПЗЗР}}$ і $\varphi_{\text{ПЗЗФ}}$ у межах $\pm 4^\circ$, амплітуди $U_{\text{ВДБ}}$ від фази $\varphi_{\text{ПЗЗФ}}$ у межах $\pm 2^\circ$, та від фази $\varphi_{\text{ПЗЗР}}$ у межах $\pm 4^\circ$. З рис. 5.3(в) також випливає, що максимальна амплітуда $U_{\text{РЕЗ}}$ визначається інтервалом фаз $\varphi_{\text{ПЗЗР}}$ у межах $\pm 4^\circ$, а від фаз $\varphi_{\text{ПЗЗФ}}$ у межах $\pm 2^\circ$. Рис. 5.3(б) ілюструє робоче значення мінімуму коефіцієнта стоячої хвилі у фідері, мало змінного (<3%) в межах $\pm 15^\circ$ у функції фази $\varphi_{\text{ПЗЗР}}$ і в межах $\pm 4^\circ$ у функції фази $\varphi_{\text{ПЗЗФ}}$.

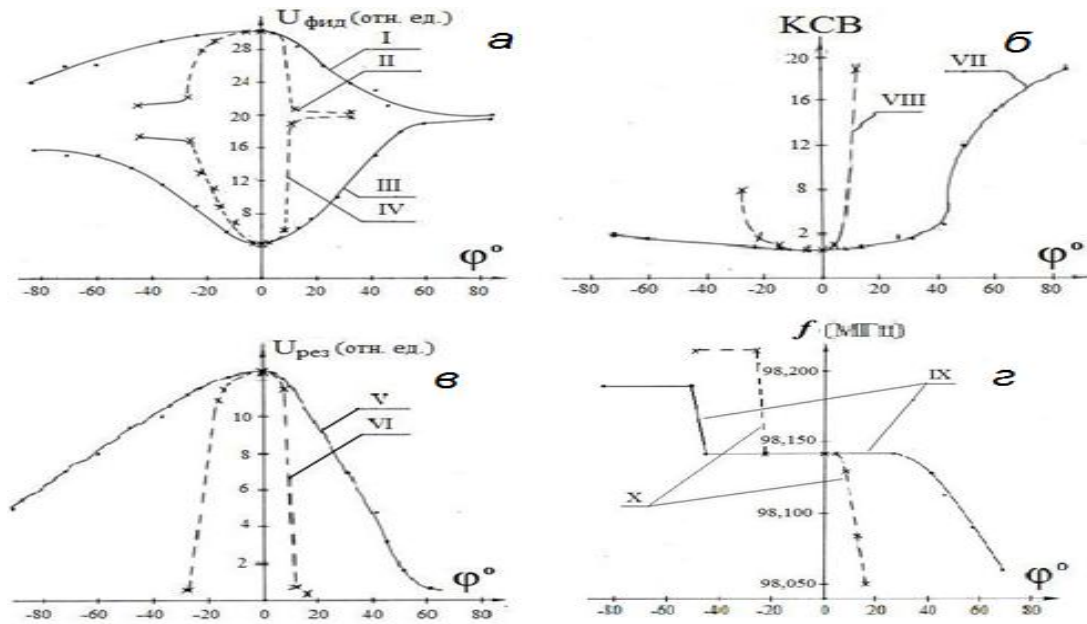


Рис. 5.3. Основні характеристики ЛПІ, збуджуваного підсилювальним каналом з 2-ма незалежними ПЗЗ при номінальній фазі в одному із них (ПЗЗР) і фазах, що змінюються в другому (ПЗЗФ).

Власна частота прискорювача, що позначена залежністю IX і є досить стійкою при зміні фази $\varphi_{\text{ПЗЗФ}}$ сигналу ПЗЗ із фідера до 25° від номінальної.

При більших змінах фази $\varphi_{\text{ПЗЗР}}$ спостерігається зміна основної частоти ЛПІ, що може пояснюватися грубим впливом виникаючих фазових викривлень в його ВЧ системі. Вплив фази нпруги ПЗЗ із фідера $\varphi_{\text{ПЗЗФ}}$ на частоту

прискорювача обмежене $(5...6)^\circ$ і подальший відхід цієї фази приводить до істотної зміни основної частоти. Однак ці змінювання перебувають за межами резонансних настроювань контурів ПЗЗР і ПЗЗФ, коли попередньо погоджені умови передачі потужності у прискорювач (коефіцієнт стоячої хвилі >20) порушено, то більш детальний аналіз не має практичного сенсу.

Необхідне значення напруженості поля на осі резонаторної структури прискорювача, при настроюваних амплітудних і фазових співвідношеннях у кільцевих контурах ПЗЗР і ПЗЗФ, задається величинами імпульсів постійної напруги ВВ модулятора. Ступінь загального узгодження вхідного опору резонаторної структури із хвильовим опором фідера, контрольованого мінімальними величинами амплітуди відбитої хвилі, разом з виміром основних параметрів $U_{\text{РЕЗ}}$ і $f_{\text{РЕЗ}}$, дозволяють досить просто підтримувати резонансні характеристики ЛПІ у ручному режимі.

Наявність у системі ВЧ збудження прискорювача 2-ма незалежних ПЗЗ, що працюють на одне резонансне навантаження, визначають її стійку роботу й високий ККД, як у режимі ефективного ВЧ тренування резонатора та його електродів, так і при прискорюванні іонів. У налагодженої в такий спосіб нової ВЧ системи, з номінально настроюваними стійкими ВЧ напругами та полями прискорювача, і були проведені експерименти по керуванню мультипакторними процесами й розрядами між трубками дрейфу, при змінюванні значень напруг ПЗЗ з фідера.

Напруга на індуктивній петлі 6 контуру ПЗЗФ регулюється шляхом зміни кута φ повороту її площини, щодо магнітних силових ліній навколо внутрішнього провідника фідера. Паралельне розташування площини петлі щодо цих ліній ($\varphi = 0^\circ$) ухвалюється за вихідне, а перпендикулярне ($\varphi = 90^\circ$) – за кінцеве. Це дозволяє визначати значення напруги, що наводиться на петлі, пропорційно синусу зазначеного кута, від $\sin\varphi = 0$ до $\sin\varphi = 1$. Зміна результуючої напруги в резонаторі, при обертанні петлі 6 з одного крайнього положення в інше ($0^\circ-90^\circ-0^\circ$) і, відповідно, напруги ПЗЗ з фідером, визначають характер (наростання або спаду) ВЕ процесів, що відбуваються у ВЧ

електричних полях прискорювальних зазорів. При цьому становить інтерес дослідження реальних форм ВЧ імпульсів, що реєструються вимірювальною апаратурою, при фіксованих значеннях напруг резонатора, спотворених мультипакторними процесами.

У випадку резонатора, розстроєного зазначеними мультипакторними розрядами, обертання петлі ϕ від $\phi = 0^\circ$ до $\phi = 90^\circ$ дозволяє спостерігати викривлення імпульсів ВЧ напруг резонатора від амплітуди $U_{\text{ПЗЗФ}} \approx 0,34 U_{\text{ПЗЗФ ном}}$ і повністю відновлених їх форм при $U_{\text{ПЗЗФ}} \approx 0,94 U_{\text{ПЗЗФ ном}}$ (коефіцієнти 0,34 і 0,94 – значення синусів кутів повороту петлі на 20° і 70°). При стійких параметрах ЛПІ й подавлених розрядах, зворотнє обертання петлі ϕ від $\phi = 90^\circ$ до $\phi = 0^\circ$ (тобто знову до мультипактору) дозволяє спостерігати реальні викривлення ВЧ імпульсів резонатора від $U_{\text{ПЗЗФ}} \approx 0,55 U_{\text{ПЗЗФ ном}}$ до $U_{\text{ПЗЗФ}} \leq 0,225 U_{\text{ПЗЗФ ном}}$ (0,225 і 0,55 – значення синусів кутів 13° і 33°).

Таким чином, керування інтенсивністю мультипакторних процесів і, відповідно, стабілізацією збуджуваних ВЧ полів Н-резонаторі ЛПІ, дозволяє судити про характер множення електронів ВЕЕ між торцями трубок дрейфу, значні площі поверхонь яких виконують свої основні функції – забезпечення потрібного розподілу прискорювального ВЧ полів у розрахованих довжинах зазорів між трубками дрейфу.

5.2. Керування ВЕ процесами у ЛПІ, що збуджується новою ВЧ системою при номінальних напругах ПЗЗР та регульованих напругах ПЗЗФ від нуля до номінальних значень

Стабілізація параметрів ЛПІ, необхідна для забезпечення ефективного тренування ВЕ емісійних властивостей трубчастих електродів і внутрішніх поверхонь резонатора та досягнення протягом найбільш короткого часу, номінальних ВЧ полів для прискорювання інтенсивних пучків іонів.

При цьому в будь-який момент часу ВЧ збудження прискорювача може бути переведено на генерацію мультипакторних явищ й дослідження

відмінних ознак паразитних збудників, що можуть виникати у різних його системах. Відсутність тут інших методів усунення викривлень і відновлення характеристик прискорювача з неоднозначними ВЕЕ здібностями електродів прискорювача, є очевидним.

На рис. 5.4(а–з) представлені осцилограми імпульсів ВЧ напруг резонатора U_{PE3} , що збуджуються ПК у режимі ПЗЗР, показуючи реальні викривлення їх форм, обумовлених мультипакторними явищами між торцями трубок, при додатково збуджуваних напругах ПК у режимі ПЗЗФ, що регулюються положеннями петлі відносно магнітних ліній фідера.

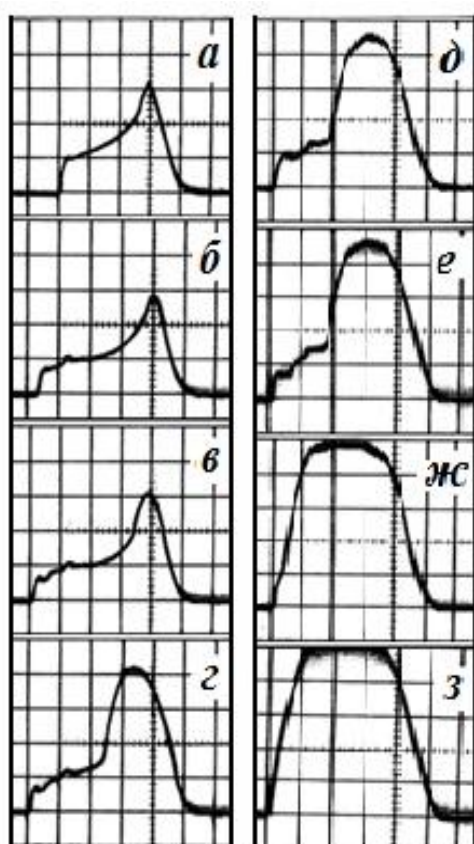


Рис. 5.4. Викривлення ВЧ імпульсів U_{PE3} , мультипакторними процесами й розрядами між торцями трубок дрейфу ЛПІ, при номінальних параметрах фази і амплітуди напруги ПЗЗР та регульованні амплітуд напруг ПЗЗФ з номінальною фазою.

а–ж: наповнення ВЧ імпульсів U_{PE3} , шляхом зміни кута повороту петлі у фідері від 20° до 70° , через кожні 10° .

з – ВЧ імпульс U_{PE3} , при довороті петлі від 70° до 90° . Масштаб: $U_{PE3} - 2\text{В/діл}$;

Масштаб по гориз.: – 50мкс/діл .

Викривлення імпульсів ВЧ напруг ЛПІ здійснюється в ручному режимі шляхом зміни кута повороту площини петлі у фідері (від 0° до 90° щодо його силових магнітних ліній) при номінальних фазах і амплітудах в ланцюгах з ПЗЗР. Характер викривлень імпульсів ВЧ напруг резонатора від $U_{PE3 \text{ мін}}$ до $U_{PE3 \text{ ном}}$ дозволяє зтверджувати, що при цьому здійснюється керування інтенсивністю множених електронів ВЕЕ.

При орієнтації петлі ПЗЗ, паралельно магнітним силовим лініям фідера й малих кутів до них ($\sim 20^\circ$), величини напруг, що наводяться на цій петлі, як зазначено вище, дуже малі (див. підрозділ 2.2). Тобто, у ЛПП, збуджуваного ВЧ системою із одним ПЗЗР, установлюються мультипакторні процеси й розряди, грубо спотворюючи нормальні форми імпульсів ВЧ напруг $U_{\text{РЕЗ}}$. Тому осцилограма імпульсу ВЧ напруги з мінімальним значенням, що мала бути попередю рис. 5.4(a) при максимальній чутливості осцилографа, не приводиться, оскільки збігається з лінією розгортання електронного променя.

Це відповідає методу “холодного” виміру розподілу електричних полів по прискорювальних зазорах на макеті резонатора ЛПП, де відбувається їхнє падіння до нуля при короткому замиканні металевим провідником, будь якої з трубок дрейфу з корпусом прискорювача.

При початковому наростанні (від нуля) напруги в контурі ПЗЗФ і, відповідно умов, що погіршилися до цього у режимі ПЗЗР, число множених електронів ВЕЕ між торцями трубок, з кожним актом їх опромінення, трохи зменшується. А збільшення наповнюваності ВЧ імпульсу результуючої напруги резонатора $U_{\text{РЕЗ}}$, доповнюється за рахунок напруги ПЗЗФ, що безперервно підсилюється ПК. При цьому погіршуються умови множення числа електронів ВЕЕ, що надходять у розряд.

У міру збільшення напруги на петлі у фідері $U_{\text{ПЗЗФ}} \approx 0,34 U_{\text{ПЗЗФ ном}}$, механізм множення електронів в електричних полях між електродами прискорювальних зазорів, порушується. І це видно по викривленню наступного ВЧ імпульсу у вигляді затримки запуску в часі на ~ 50 мксек.

На осцилограмах ВЧ напруг резонатора, рис. 5.4 (a–г), чітко видні відмітні ознаки (різний час затримки запуску й викривлення фронтальних сходів) їх нестійкого встановлення, супроводжуваних пригніченими умовами множення електронів ВЕЕ.

Відповідно до розгляду електронної мультипакції в ОРК зі зменшеною динамічною добротністю впливає, що при цьому змінюються діапазони енергій і інтервали фаз ВЕЕ в кожному півперіоду ВЧ електричних полів.

Тобто, у реальних умовах прискорювальної структури, обуреної мультипакторними розрядами, наростання її результуючих полів за рахунок сигналу ПЗЗФ, що збільшується, викликає подальше зменшення числа електронів, що поступає в розряд. Відбувається перехідний процес поліпшення параметрів резонатора та збільшення наповнюваності імпульсів результуючих ВЧ напруг. Це чітко видно по поліпшенню форм й тривалості їх передніх фронтів. ВЕ процеси і розряди тривають, але це не заважає умовам зменшення числа електронів ВЕЕ, що поступають в розряд.

Коли наростання результуючих напруг ще не встановилося, мультипакція у більшій своїй частині, втрачаючи умови множення електронів, забезпечує звичайну емісію електронів високих енергій.

А для триваючих перехідних процесів у ЛПП, забезпечуються умови стійкого встановлення імпульсних ВЧ напруг, що змінюються за законами експоненти. Це й впливає з наповнення імпульсів ВЧ напруг, що збільшуються, рис. 5.4 (д – ж).

При амплітуді напруги позитивному зворотному зв'язку ПЗЗФ, обумовленої співвідношенням $U_{ПЗЗФ} \approx 0,25U_{ПЗЗР\text{ ном}}$, амплітудні умови електронної мультипакції, у тому числі й розмноження електронів ВЕЕ, порушуються повністю, а стійкість перехідних процесів імпульсних ВЧ напруг у резонаторі визначається його експоненційно мінливими реальними параметрами в цілому, рис. 5.4 (з).

У міру досягнення номінального значення напруги зворотного зв'язку на петлі у фідері до величини $U_{ПЗЗФ\text{ ном}}$, ВЧ напруги резонатора в результаті, стають усе менш залежними від найшвидких ВЕ процесів у його прискорювальних зазорах (ДП).

При цьому сталість амплітуд результуючих ВЧ напруг між трубками дрейфу з паралельними торцями, необхідної для розвитку паразитної мультипакції, порушується із самого початку наростання цих полів.

Енергія інших вторинних електронів, що здобуваються у ВЧ електричних полях з амплітудами, що безупинно збільшуються, не можуть забезпечити в

часі розмноження електронів ВЕЕ через коефіцієнт ВЕЕ їх матеріалу менше одиниці. При цьому вихід вторинних електронів у вакуум, взаємодіючих протягом часу кожного півперіоду із прискорювальними ВЧ полями, мультипакторних процесів і розрядів не утворює.

ВЧ енергія, що розсіюється ВЕ процесами, характеризує в кожний момент часу, додаткові активні витрати енергії, що запасається у прискорювальної структури й, відповідно, зменшення її динамічної добротності, в діапазоні амплітуд ВЧ напруг полів, збуджуваних у Н-резонаторі прискорювача МЛПД-3.

При цьому форма ВЧ імпульсу Н-резонатора малогабаритного прискорювача, не містить будь-яких ознак грубого порушення його електродинамічних характеристик.

На рис. 5.5 представлена залежність часу затримки τ_z , на початку ВЧ імпульсу резонатора, від величини напруги ПЗЗ із фідера $U_{ПЗЗ\phi}$, вираженої у відносних одиницях.

На рис. 5.6 представлена залежність швидкості наростання фронтальної сходинки імпульсу ВЧ напруги резонатора, пропорційної тангенсу кута підйому фронту, при зазначених величинах напруг $U_{ПЗЗ\phi}$, виражених у відносних одиницях, позитивного зворотного зв'язку ПК з фідером.

Керування мультипакторними процесами в прискорювачі можливо також і при переході від стійкого встановлення збуджуваних ВЧ напруг ЛПД, до мультипактору з різними інтенсивностями множених електронів ВЕЕ.

При зворотній зміні коефіцієнта зворотного зв'язку з фідером й, відповідно, зменшення напруг на петлі 6 від максимальної величини (відповідної до кута положення петлі $\phi = 90^\circ$) до величини, що наближається до нуля (кут повороту петлі наближається до $\phi = 0^\circ$), вид викривлень ВЧ імпульсів напруг резонатора мал.5 4(з-а) може повторюватися, але залежить від динамічного стану ВЕ здібностей його електродів і поверхонь на даний момент.

Це проявляється в тому, що при відносно швидкому переході (протягом робочої зміни) від стійкого електронного навантаження до мультипактору у

резонаторі, що реально впливає на характеристики, перша фронтальна сходинка (рис. 5.4ж) з'являється при установці петлі 6 від $\varphi = 90^\circ$ до $\varphi = 33^\circ$, тобто при $U_{\text{ПЗЗ}\Phi} \approx 0,55 U_{\text{ПЗЗ}\Phi \text{ ном.}}$. А ВЧ імпульс контрольної напруги резонатора реально зникає з екрана осцилографа, коли кут повороту петлі 6 доводиться до кута $\varphi = 13^\circ$, тобто при $U_{\text{ПЗЗ}\Phi} \leq 0,225 U_{\text{ПЗЗ}\Phi \text{ ном.}}$.

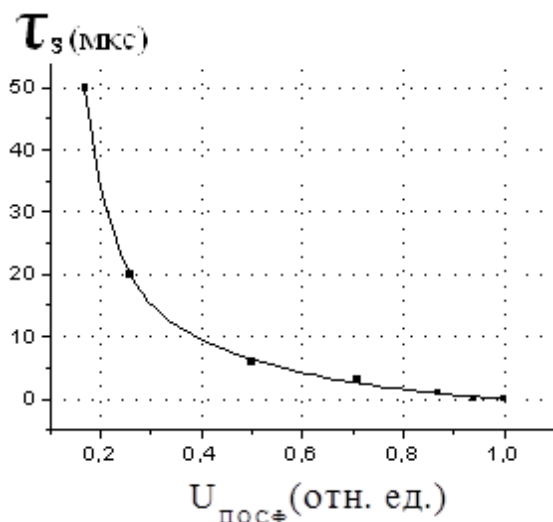


Рис. 5.5. Залежність часу затримки τ_z , на початку установлення імпульсів ВЧ напруг резонатора, обурюваного паразитними ВЕ розрядами, від значень напруг ПЗЗ з фідера.

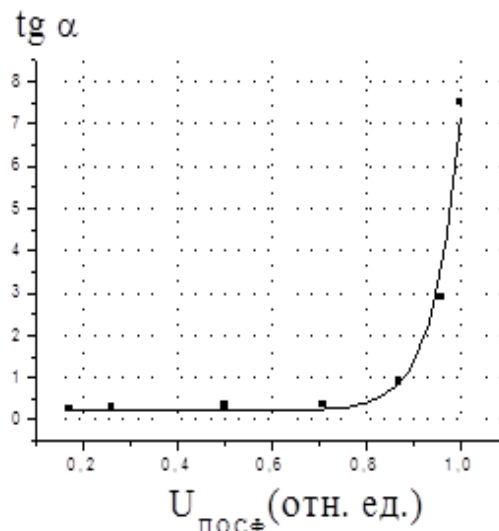


Рис. 5.6. Залежність швидкості росту фронтальної сходинки імпульсу ВЧ напруг резонатора, обурюваного паразитними ВЕ розрядами, від значень напруг ПЗЗ з фідера.

При тривалому (\sim декількох місяців) збудженні прискорювальної структури новою ВЧ системою, зменшення напруг на петлі 6 приводить до мультипактору безпосередньо при її положенні під кутом $\varphi \sim 13^\circ$, без яких-небудь викривлень форми ВЧ імпульсу, що й показано на рис. 5.4 (ж-а).

Експериментально показано, що безперервне наростання імпульсів результуючих значень ВЧ напруг і полів у багатозазорній структурі ЛПІ, збуджуваного новою ВЧ системою, автоматично забезпечує керування інтенсивністю мультипакторних явищ до їх повного переходу у звичайну ВЕЕ.

При цьому стабілізація наростаючих результуючих ВЧ напруг і полів, необхідних для прискорення іонів у ЛПП та звичайні струми електронів ВЕЕ більших енергій, що падають на торці електродів кожного півперіоду коливань, мультипакторних розрядів у прискорювальних зазорах не утворюють.

5.3 Вимір імпульсів ВЧ напруг резонатора та загальних струмів ВЕЕ, що виходять з нього при стабілізації параметрів ВЧ системи прискорювача МЛПД-3 в цілому

Перші результати експериментальних досліджень пригнічення мультипакторних процесів і розрядів в прискорювачі дейтронів МЛПД-3, показали, що стабілізація його ВЧ напруг і полів, є стійкою. Разом із цим становить інтерес дослідження загальної ВЕЕ з мідних трубок дрейфу ЛПП, збуджуваного нової ВЧ системою, без відомих систем автоматичного регулювання і стабілізації його параметрів та малоефективних методів пригнічення умов множення числа електронів ВЕЕ.

На рис. 5.7 (а,б,в) наведені осцилограми контрольних імпульсів стійких результуючих ВЧ напруг резонатора U_{PE3} (верхні) і струмів ВЕЕ I_{BEE} , при збудженні ЛПП новим ВЧ методом.

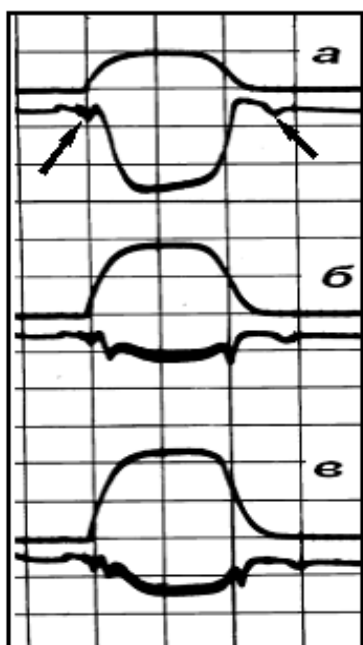


Рис. 5.7 Нормальні форми імпульсів ВЧ напруг резонатора U_{PE3} (верхні) і струмів ВЕЕ I_{BEE} (нижні) на виході ЛПП, збуджуваного новою ВЧ системою, при подавленій ініціації множення електронів ВЕЕ (мультипакторні сплески, зазначених стрілками), на початку переднього й майже наприкінці заднього фронтів імпульсу ВЧ напруги резонатора U_{PE3} .

Масштаб: U_{PE3} – 5В/справ; I_{BEE} – 20 мка/ діл.

Масштаб по горизонталі: – 100 мкс/діл.

З осцилограм рис. 5.7 (а–в) випливає, що із зростанням амплітуд результуючої напруги резонатора в інтервалі $\sim (0,5 \dots 1,5)U_{PE3 \text{ ном}}$, характер стійких імпульсів струмів ВЕЕ $I_{ВЕЕ}$ змінюється як за формою, так і амплітуді. На початку і в кінці імпульсів ВЧ напруг малих амплітуд, у резонаторі виникають однакові мультипакторні сплески ВЕ струмів малих значень (зазначених стрілками). Це показує на відсутність їх грубого впливу на нормальні форми імпульсів ВЧ напруг резонатора U_{PE3} і повних струмів ВЕЕ $I_{ВЕЕ}$, та, відповідно, на його резонансні параметри.

Тривалість ВЧ мультипакторних сплесків по підставі ~ 10 мксек, (для ясності треба знати, що це струми електронів найменших енергій). Початкове множення таких електронів у часі, на передніх фронтах зазначених імпульсів ВЧ напруг U_{PE3} , збігається для всіх осцилограм. А на задньому фронті імпульсу ВЧ напруги резонатора, час виникнення струмів $I_{ВЕЕ}$, пов'язаний із тривалістю часу витрати енергії, що запасується в резонаторі, і досягненні малих значень напруг, необхідних для існування умов множення електронів ВЕЕ. Тобто, чим більше амплітуда імпульсу ВЧ напруги U_{PE3} , з якого на задньому фронті закінчується процес його власного спадання, тем більший час необхідний для установалення тих малих амплітуд напруг, що забезпечують ініціацію мультипакторних процесів.

ВЕ здібності електродних поверхонь при цьому характеризуються їхнім матеріалом – міддю високої якості з коефіцієнтом ВЕ емісії $K_{ВЕЕ} > 1$, при типових умовах проведення повсякденних ВЧ тренувань.

Як випливає из осцилограм, нормальні форми імпульсів загальних струмів ВЕЕ $I_{ВЕЕ}$, визначаються числом електронів найменших і більших енергій, прискорених при відповідних ВЧ напругах по тривалості імпульсу U_{PE3} . Оскільки умови розвитку мультипакторних процесів, досягаються в міру зменшення ВЧ енергії, що запасується у резонаторі до мінімальних значень, то ця частина множення електронів ВЕЕ, виникає окремо від основної частини ВЧ імпульсу загального струму $I_{ВЕЕ}$.

І цей факт, не відзначений на початку розвитку прискорювальної техніки, (у тому числі й на початку цих досліджень) став досить переконливим приводом для розгляду потенційних енергій електронів, наприкінці спаду імпульсів ВЧ напруг резонатора U_{PE3} .

Також, була запропонована діагностика найменших і більших енергій електронів у повному імпульсу ВЕ струму I_{BEE} , за допомогою тонких алюмінієвих мішеней, установлюваних на шляху виходу електронів із прискорювача перед циліндром Фарадея (ЦФ), де й вони реєструвались.

Товщина мішені вибирається таким чином, щоб електрони більших енергій, втрачаючи частину енергії, продовжували рух до ЦФ, а електрони найменших енергій у цій мішені поглинались повністю [84]. Поглинання електронів низьких енергій у матеріалі мішені – алюмінієвій фользі товщиною 5мкм, чітко показано при вимірі імпульсів струмів ВЕЕ, за допомогою 2-ох проміневого цифрового осцилографа високої чутливості (розділ 3, рис.3.1).

Наведені парні осцилограми ВЧ імпульсів повних струмів ВЕЕ I_{BEE} , є експериментальним підтвердженням, розробленої в ННЦ ХФТІ, теорії ВЕЕ з паралельних електродів прискорювальних проміжків (ДП), шунтованого активним опором ВЕ мультипакції R_M , у складі Н-резонатора високої добротності ($Q \gg 1$) прискорювача іонів МЛПІ-3, при збудженні імпульсних ВЧ напруг і полів.

В умовах збудження ЛПІ новим ВЧ методом, при використанні електронного осцилографа, були проведені виміри імпульсів струмів ВЕЕ, в залежності від амплітуд ВЧ напруг U_{PE3} , що майже вдвічі перевищують номінальні значення напруг резонатора ($U_{PE3 \text{ ном}} \approx 8,5\text{В}$). На рис. 5.8 показано ріст напруг резонатора від $U_{PE3} \approx 15\text{В}$ до $U_{PE3} \approx 17\text{В}$, при часткових підвищеннях амплітуд постійних напруг імпульсного модулятора кінцевого ВЧ каскаду ПК. Збільшення амплітуд напруг у резонаторі U_{PE3} й, відповідно, напруженостей полів у прискорювальних зазорах різних довжин між торцями трубок дрейфу ЛПІ, приводить до різних значень імпульсів ВЧ струмів ВЕЕ I_{BEE} , емітуємих з торців трубок дрейфу передостаннього зазору.

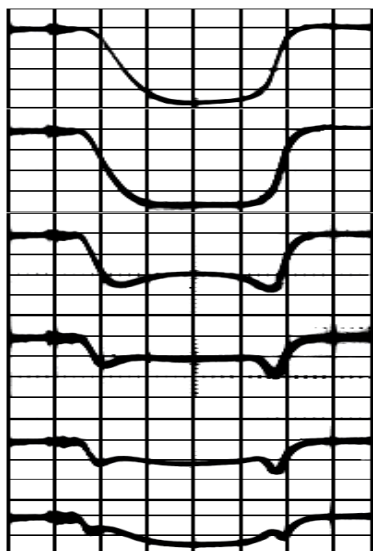


Рис. 5.8. Імпульси загальних струмів I_{BEE} на виході з ЛПП, збуджуваного новою ВЧ системою, при різних значеннях ВЧ напруг резонатора U_{PEZ} і подавлених умовах множення електронів BEE між торцями трубок дрейфу.

Масштаб по вертикалі: I_{BEE} – 20мкА/діл.

Масштаб по горизонталі: 50нкс/діл.

Таким чином, ВЕ струми у прискорювальних зазорах ЛПП, залежать від значень довжин зазорів між трубками дрейфу та значень напруженостей збуджуваних ВЧ полів. При цьому на краях імпульсів ВЕ струмів, відповідно до характеру наростання переднього фронту імпульсу ВЧ напруг резонатора, чітко видні слабкі прояви ВЕ сплесків найменших значень. На задніх фронтах ці сплески не показані, тому що з початку досліджень, були прийняті за паразитні наведення у вимірювальних ланцюгах.

Це може пояснюватися характером швидкої зміни амплітуд напруженістей полів між електродами прискорювальних проміжків і, відповідно, зміною величин струмів, пропорційних похідним мінливих ВЧ полів у часі [82,83]. Зменшення реєструємих загальних ВЕ струмів, зі збільшенням полів у зазорах, може пояснюватися тим, що електрони більших енергій, досягаючи на більших швидкостях осьової лінії прискорювального зазору, не захоплюються поздовжньої складової неоднорідних ВЧ електричних полів, спрямованих до виходу прискорювача.

З метою однозначного підтвердження характеру виникнення між ділянками паралельних торців трубок дрейфу, вимір ВЧ імпульсів ВЕ струмів, що виходять із прискорювача, здійснювалося у двох місцях розташування ЦФ – безпосередньо за резонатором, на відстані 200мм від центру останнього зазору, і при видаленні від нього на 700мм за допомогою патрубку довжини 500мм.

Графічні залежності величини струмів вторинних електронів, обмірюваних у середній частині ВЧ імпульсів $I_{ВЭЭ}$, від амплітуд ВЧ напруг у резонаторі, що збільшуються, та майже вдвічі перевищують його номінальні амплітуди, представлені на рис. 5.9.

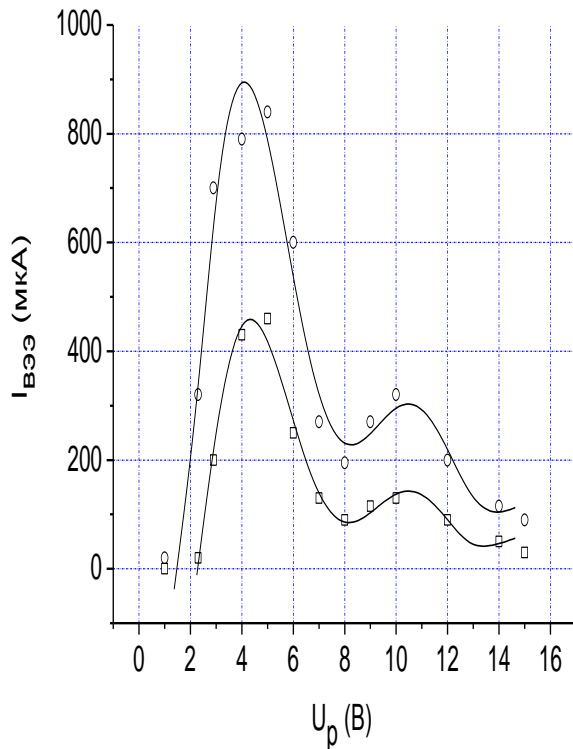


Рис. 5.9. Графічні залежності значень струмів ВЕЕ $I_{ВЭЭ}$, що виходять з ЛПІ, збуджуваного новою ВЧ системою, від результуючих ВЧ напруг резонатора.

○ – ЦФ перебуває на відстані 200мм від центру крайнього зазору;

□ – ЦФ перебуває на відстані 700мм від центру крайнього зазору.

По осі ординат відкладені значення напруг, вимірюваних на опіру $R = 10$ ком, при протіканні струмів ВЕЕ $I_{ВЭЭ}$, реєструємих циліндром Фарадея. Нижня крива з меншими величинами амплітуд імпульсів ВЕЕ $I_{ВЭЭ}$ характеризується інтенсивним розсіюванням вторинних електронів на додатково подовженій дистанції руху електронів у вакуумі, лише на 0,5м.

Максимуми наведених залежностей загальних ВЕ струмів з передостанніх прискорювальних зазорів від амплітуд ВЧ напруг резонатора, мають явно виражений характер, незалежно від місця виміру. Це вказує на те, що отримані залежності визначаються не фокусуючими властивостями зазорів з трубчастими електродами, а амплітудними умовами неоднорідних ВЧ електричних полів, в яких електрони емітують і рухаються. При цьому в будь-який час відключення від потужного підсилювача ПЗЗ з фідером, на початку імпульсів ВЧ напруг резонатора, що збуджується ПП з ПЗЗ із резонатором, між

паралельними торцями трубок дрейфу виникає емісія електронів малих енергій, що автоматично характеризує коефіцієнти ВЕЕ мідних трубок, як $K_{ВЕЕ} > 1$).

При початково повільному наростанні амплітуд ВЧ напруг, збуджуваних за законами експоненти, така емісія може досягати в часі мультипакторних розрядів з паразитними наслідками для елементів резонаторної структури ЛПП і збуджуваних у ньому ВЧ напруг і полів, коли прискорювання протонів або дейтронів стає неможливим.

У відсутності умов множення електронів ВЕЕ між торцями трубок дрейфу прискорювача, збуджуваного новою ВЧ системою, його високі електродинамічні параметри забезпечуються автоматично. Це підтверджується нормальними формами імпульсів ВЧ напруг основних систем прискорювача МЛПД-3 в цілому (див. рис. 5.1).

5.4. Висновки до розділу

Основним результатом проведених досліджень є стабілізація збуджуваних ВЧ полів у прискорювальному Н-резонаторі з високими електродинамічними характеристиками.

Використовані в роботі методи керування мультипакторними явищами, дозволяють за короткий час настроїти стабілізацію результуючих ВЧ напруг і полів, що ефективно пригнічують умови розвитку мультипакторних процесів і розрядів між торцями трубок дрейфу.

Н-резонатор прискорювача МЛПД-3, з суворо заданим розташуванням мідних трубок дрейфу по осі, їх точними геометричними розмірами й довжинами зазорів між ними, дозволяють оперативно формувати необхідні режими роботи прискорювального каналу, для експериментальних досліджень існування мультипакторних процесів і розрядів та їх ефективного пригнічення новою ВЧ системою.

Відмітні ознаки імпульсів ВЧ напруг і полів нормальних форм, у Н-резонаторі високої добротності прискорювача МЛПД-3, збуджуваного новою

ВЧ системою, якісно характеризують механізм керування мультипакторними процесами й розрядами між трубками дрейфу, поперечні розміри торців, яких більше довжини зазорів між ними. При цьому простота технічного обслуговування лінійного прискорювача іонів не викликає сумніву.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано важливе наукове завдання зі збудження стабілізованих ВЧ напруг і полів та отримання інтенсивних пучків іонів на малогабаритному лінійному прискорювачі протонів або дейтронів МЛПД-3, що використовується для електроядерних технологій. При цьому автоматично забезпечуються умови пригнічення множення електронів в однорідних ВЧ полях між паралельними торцями трубок дрейфу, забезпечуючи максимальний коефіцієнт корисної дії прискорювального Н-резонатора. Зокрема, виконано фізичне обґрунтування вибору ВЧ системи формування та прискорення пучків заряджених іонів у 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. Розроблена ВЧ система для стабілізації збуджуваних 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 частково відгалужені з резонатора та коаксіального фідера. Напруги зазначених ПЗЗ складаються у ВЧ пристрою та надходять в узгоджених умовах на вхід ПК. При цьому беззупинне зростання стійких напруг у Н-резонаторі ефективно пригнічує умови множення електронів ВЕЕ найменших енергій між паралельними торцями трубок дрейфу, що й стабілізує між ними результуючі ВЧ поля лінійного прискорювача іонів,.

2. Запропоновано експериментальний метод дослідження конкуренції стабілізованих ВЧ коливань та умов розвитку паразитних мультипакторних процесів і розрядів у різних областях малогабаритного лінійного прискорювача дейтронів МЛПД-3 збуджуваного новою ВЧ системою. При цьому такий метод дозволив:

– на основі аналізу викривлених імпульсів ВЧ напруг та повних стумів ВЕЕ, що виходять з передостаннього зазору ЛПІ, 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 з найменших значень ВЧ напруг резонатора і полів між трубками дрейфу.

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

– загальні вирази ВЧ напруг і полів, збуджуваних у контурі та між електродами діодного проміжка і кругової частоти коливань.

– вирази відносних значень потенціальних енергій електронів вторинно-електронної емісії, що емітують з одного електрода ДП та падають (у статусі первинних) на другий, при різних різницях ВЧ потенціалів, у кожному з напівперіодів наростаючих або спадаючих у контурі.

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

3. Встановлено, що між паралельними електродами умови множення електронів за межами їх найменших енергій, відсутні. При цьому показано, що у складі ВЧ імпульсу загального струму ВЕЕ, що виходить з передостаннього зазору ЛПІ та реєструється циліндром Фарадея, присутні:

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

- – струми зміщення з більшими енергіями електронів, що обумовлено крутістю переднього та заднього фронтів імпульсу ВЧ напруг резонатора;
- – звичайні струми електронів з високими енергіями, що обумовлено максимальними значеннями ВЧ напруг резонатора.

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

Таким чином доведено, що множення електронів ВЕЕ між електродами діодного проміжку з корисними паралельними торцями, в інтервалах фаз ($0-65^\circ$) напівперіодів збуджуваних ВЧ напруг і полів у окремому резонансному контурі є реальним фізичним явищем, що потребує практичного керування.

В остаточному підсумку вирішена важлива наукова задача – ефективне прискорення інтенсивних пучків іонів у малогабаритному резонансному лінійному прискорювачі іонів на базі Н-резонатора, забезпечується стабілізацією аксіально-симетричних ВЧ полів у зазорах прискорювального резонатора з високими електродинамічними характеристиками. При цьому відмова від малоефективних методів пригнічення умов множення електронів вторинно-електронної емісії, сприяла збільшенню значень 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, а також для удосконалення існуючих ВЧ приладів, елементів і систем для народного господарства.

При розробці радіофізичних структур і установ та їх елементів, можливо застосування традиційних технологій виготовлення корисних ДП з паралельними торцями електродів.

Висловлюю щирю подяку своєму науковому керівникові к. ф.-м. н., с.н.с., нач. відділу М.Г. Шулики, д. ф.-м. н., проф. Є.О. Корнілову, д. ф.-м. н., проф. В.О. БУЦ за підтримку роботи, д. ф.-м. н., проф. І.І. Магді за корисні консультації, а також к. ф.-м. н., с.н.с. О.П. Толстолужському, за обговорення наукових результатів, співробітникам В.І Бутенко, В.М. Белан, В.П. Прищепову, В.Ф. Коваленко, за допомогу у підготовці і проведенні експериментальних досліджень, а також к. ф.-м. н. О.В. Мануйленко за участь в обговоренні результатів дисертації.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Линейные ускорители ионов. Т.1. Проблемы и теория. Под ред. Б.П. Мурина. // М.: «Атомиздат». 1978. 264 с.
2. Линейные ускорители ионов. Т.2. Основные системы. Под ред. Б.П. Мурина. // М.: «Атомиздат». 1978. 320 с.
3. Лебедев А.И., Шальнов А.В. Основы физики и техники ускорителей. // М.: «Энергоатомиздат». 1971. 527 с.
4. Хижняк Н.А. Пути создания экологически чистой атомной энергетики в Украине. // Препринт ННЦ «Харьковский физико-технический институт» (1994-8). Харьков. 1994. 22 с.
5. Хижняк Н.А. Плазменная электроника в электроядерной энергетике // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения (2). 2000. №1. С. 13-142.
6. Рябухин Ю.С., Шальнов А.В. Ускоренные пучки и их применение. // Москва: «Атомиздат». 1980. 182 с.
7. Гусев Е.В., Николайчук Л.И., Мигаленя В.Я. Использование протонных пучков для дистанционного зондирования элементного состава небесных тел. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-физические исследования. 1977. Т.2. № 4,5(31,32). С. 175-177.
8. Воронко В.А., Мигаленя В.Я., Нагайченко В.И. Обнаружение азотосодержащих веществ с помощью малогабаритных ускорителей протонов. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-физические исследования. 1977. Т.2. № 4,5(31,32). С. 193-201.
9. Демченко П.А., Воронко В.А., Мигаленя В.Я. Применение малогабаритных линейных ускорителей ионов для медицинских целей. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-физические исследования. 1977. Т.2. № 4,5(31,32). С. 193-201.
10. Доклады третьего всесоюзного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве. // Ленинград. Т.2. 1979. 312 с.

11. Ауслендер В.Л., Баженов О.Ю., Брызгин А.А. Новые разработки мощных ускорителей типа ИЛУ с энергией 5 МэВ и более. // Труды 10-го международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. Санкт-Петербург. 2001. С. 51-55.
12. Белей А.С., Гусев Е.В., Дереповский В.Н., Каплин С.С., Кривуля С.Ю., Шестопад С.А., Шулика Н.Г. Проект реконструкции ускоряющей структуры малогабаритного линейного ускорителя ионов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Техника физического эксперимента. 1987. Вып. 4(35). С. 8-10.
13. Гусев Е.В., Каплин С.С., Кривуля С.Ю., Приходько О.А., Шулика Н.Г. Особенности распределения напряженностей полей в резонансных структурах линейных малогабаритных ускорителей // Украинский физический журнал. 1988. Т.33. №6. С. 813-817.
14. Гусев Е.В., Хижняк Н.А., Шулика Н.Г. Ускоряющие Н-резонаторы с высокими электродинамическими характеристиками. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-физические исследования. 1997. Т.1. Вып. 2,3(29,30). С.187-189.
15. Ковпак Н.Є., Баранов Л.М., Зейдліц П.М. Лінійний прискорювач протонів з енергією 2,5 МэВ на хвилі H_{11n} // Український фізичний журнал. 1968. Т.13. № 34. С.553-556.
16. Ковпак Н.Є., Папкович В.Г., Хижняк Н.А., Шулика Н.Г. Исследование дисперсионных характеристик нагруженных резонаторов Н-типа // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика высоких энергий и атомного ядра. Харьков. 1973. Вып.3(5). С. 29-34.
17. Мурин Б.П. Стабилизация и регулирование ВЧ полей в линейных ускорителях ионов // Москва: «Атомиздат». 1971. 334 с.
18. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы // Москва: Изд-во «Сов. Радио». 1964. 696 с.

19. Каретников Д.В., Сливков И.Н., Тепляков В.А., Федотов А.П., Шембель Б.К. Линейные ускорители ионов // Москва: «Госатомиздат». 1962. 208 с.
20. Попов В.А. Возбуждение резонатора линейного ускорителя ЛУ-20 ЛВЭ ОИЯИ // Препринт 9-9061. Дубна. 1975. С. 3-11.
21. Попов В.А. Положительная обратная связь ВЧ системы линейного ускорителя ЛУ-20 ЛВЭ ОИЯИ // Препринт 9-9192. Дубна. 1975. С. 3-11.
22. Попов В.А. Система ВЧ возбуждени резонатора ЛУ-20 синхрофазотрона ОИЯИ // Препринт 9-11835. Дубна. 1978. С.3-11.
23. Бобылёв В.И., Иванов Ю.Д., Мищенко А.В., Невяжский И.Х., Поляков Б.И. Линейный ускоритель протонов И-2. Система высокочастотного питания // Приборы и техника эксперимента. 1967. №5. С. 34-39.
24. Кравчук Л.В., Пунтус В.А., Романов Г.В. Тарасов С.Г. Мультипакторный разряд в ускоряющей системе линейного ускорителя Московской мезонной фабрики // Труды XIII Совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 13-15 октября 1992г. Т.2. Дубна. 1993. С. 247-252.
25. Puntus V.A., Romanov G.V. Multipacting in the phase beam monitor of MMF // EPAC-98.–Stockholm. 1998. P. 1583-1585.
26. Geng R.L., Padamsee H., Belomestnykh S., Goudket P., Dykes D.M., Carte R.G. Suppressing of multipacting in rectangular coupler waveguides // Nuclear Instruments and Methods in Physics Rescarch. Section A. 2003. № 508. P. 227-238.
27. Капчинский И.М. Динамика частиц в линейных резонансных ускорителях // Москва: «Атомиздат». 1966. 310 с.
28. Файнберг Я.Б. Переменно-фазовая фокусировка в линейных ускорителях // ЖТФ. Т. XXIX. 1959. №5. С. 568-579.
29. Вещерович В.Г., Седяров И.К., Шемелин В.Д. О подавлении вторично-электронного ВЧ разряда в тороидальном резонаторе накопителя ВЭПП-3

- // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Линейные ускорители. 1976. Вып.1(2). Харьков. С. 77-79.
30. Андреев В.Г., Зайдин Д.Г. Способ подавления ВЭ резонансного разряда // БИ №8. АС СССР. № 263767. 1970г.
31. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы // Москва: «Высшая школа». 1988. 233 с.
32. Алимов А.С., Грибов И.В., Шведун В.И. Способ ввода СВЧ мощности в секцию линейного ускорителя непрерывного действия // АС СССР. №1709887. 1990г.
33. Ауслендер В.Л., Чернов К.Н., Ческидов В.Г., Факторович Б.Л., Горбунов В.А., Горнаков И.В., Казарезов И.В., Коробейников М.В., Кузнецов В.И., Лукин А.Н., Макаров В.Г., Матяж И.Г., Острейко Г.Н., Панфилов А.Д., Сердобинцев Г.В., Тарнецкий В.В., Тиунов М.А., Ткаченко В.О., Тувик А.А. Статус работ по электронному ускорителю на 5 МэВ, 300 кВт // Тезисы докладов XIX Международного семинара по ускорителям заряженных частиц, 12-18 сентября 2005г. Алушта, Крым. Харьков. 2005. С. 31.
34. L. W. Alvarez, H. V. Franck, Hayden Gordon, Donald J. Gow, Lauriston C. Marsall, Oppenheimer Frank, Wolfgang R.H. Hanofsky, Chaim Richman, and John R.Woodyard. Berkeley Proton Linear Accelerator // Review of Scientific Instruments. 1955. Vol. 26. №2. P. 111-133.
35. Хаббард, Бэйкер, Элерс и др. Линейный ускоритель тяжелых ионов // Приборы для научных исследований. 1961. Т.32. № 6. С. 3-17.
36. Linear Accelerators edited by Pierre M. Lapostolle and Albert L. Septier // Amsterdam. 1970. 1204 p.
37. Пеплов В.В., Шараментов С.И. Система быстрого аварийного выключения мощности в каналах ВЧ питания основной части ЛУМФ // XIV Совещание по ускорителям заряженных частиц. ИФВЭ, Протвино 25-27 октября 1994г. Сборник докладов. в 4-х томах. Т.1. Протвино. 1994. С.256-259.

38. Кваша А.И., Лопатников Ю.М. Результаты испытаний последовательной защиты системы ВЧ питания начальной части ускорителя ИЯФ РАН // Тезисы XXI Международного Совещания по ускорителям заряженных частиц 6-12 сентября 2009, Алушта. Крым. Харьков. 2009. С. 26.
39. Венгров Р.М., Кузьмичев В.Г., Лякин Д.А. Применение дополнительного контура обратной связи при возбуждении резонатора ускорителя тяжелых ионов в режиме автоколебаний // XVII Совещание по ускорителям заряженных частиц, ИФВЭ, Протвино. Сборник докладов в 2-х томах. Т.1. Протвино. 2000. С. 130-133.
40. Жигло В.Ф. Электрофизические процессы при реализации высоких темпов ускорения электронов // Диссертация канд. физ.-мат. наук по специальности 01.04.20. ННЦ ХФТИ. Харьков. 1999. 124 с.
41. Леонтьев В.В., Пеплов В.В. Акустический датчик в системе защиты от пробоев в волноводном тракте линейного ускорителя ИЯИ РАН // Тезисы XX международного семинара по ускорителям заряженных частиц 9-15 сентября 2007г., Алушта. Крым. Харьков. 2007. С. 90.
42. В.Н. Алферов, А.М. Вишневская, М.Б. Владимирцов и др. Исследование паразитных колебаний в клистроне КИУ-12, возникающих при увеличении длительности модулирующего импульса // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. 1969. №6. С. 37-42.
43. Лебедев В.Н., Парышкуро Л.А., Пителин А.П. Подавление паразитных колебаний в отражательном клистроне // Электронная техника. Серия.1. Электроника СВЧ. 1975. №6. С. 100-103.
44. Белоглазов В.И., Сдобнова Л.Н.. Стабилизирующий резонатор мощного клистронного автогенератора // ПТЭ. 1979. №1. С. 26-28.
45. Белоглазов В.И., Завада Л.М., Кушнир В.А., Сдобнова Л.Н. Синхронизируемый автогенератор на мощном усилительном клистроне // ПТЭ. 1987. №5. С. 101-102.
46. Ковпак Н.Е. Разработка и экспериментальное исследование ускоряющей системы для малогабаритного ускорителя ионов. Диссертация кандидата

- технических наук по специальности 05280. ННЦ ХФТИ. Харьков. 1974. 125 с.
47. Федотов А.П., Шембель Б.К. К вопросу о возбуждении колебаний в высокочастотном объемном резонаторе от автогенератора // Радиотехника и Электроника. 1956. Т.1. №12. С. 1474-1477.
 48. А.с 1366033 А1 СССР, МКИЗ Н 05 Н 1/00. Устройство для нагрева плазмы // О.М. Швец, В.Е. Моисеенко, В.Б. Коровин. ХФТИ (СССР). №3848749 / 24-25; заявл. 24.01.85.
 49. Ямницкий В.А., Павловский В.Г., Овечкин В.В. Разработка системы управления для автоматического регулирования температуры теплоносителя при термостатировании резонатора и трубок дрейфа в линейном ускорителе // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Автоматизация и математическое обеспечение физического эксперимента. Харьков. 1976. Вып.1(6). С. 27-30.
 50. Хижняк Н.А., Скоромный Г.М., Павловский В.Г. Эксплуатационные характеристики электрофизического оборудования // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Техника физического эксперимента. ХФТИ. Харьков. 1984. Вып.2(19). С. 67-68.
 51. Зайдин Д.Г. Мультипакторные разряды и некоторые способы их устранения // Труды РТИ АН СССР. Москва. 1964. Т.6. Вып.4. С. 136.
 52. Добрецов Л.Н. Электронная и ионная эмиссия // М.-Л.: Госиздательство технико-теоретической литературы, «Госатомиздат». 1952. 209 с.
 53. Cornelius W.D. CW operation of the FMIT RFQ accelerator // IEEE Transaction on Nuclear Science. 1985. V. NS-32. № 5. P. 3139-3143.
 54. Нэпп Е.А., Нэпп Б.С., Поттер Д.М. Ускоряющие структуры со стоячей волной для линейных ускорителей на большие энергии // Приборы для научных исследований. 1968. №7. Москва: Издательство «Мир». С. 31-43.
 55. Поляков Б.И., Зарубин Б.Т., Кушин В.В. Электрическая прочность малого ускоряющего промежутка // Научные труды РТИ АН СССР. 1959. Т.1. Вып.2. С. 93-103.

56. Белан В.Н., Бутенко В.И., Егоров А.М., Иванов Б.И. Модернизированный линейный ускоритель протонов на энергию 5 МэВ УРАЛ-5, для исследований фокусировки плазменной линзой // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-физические исследования. 1997. Т.2. Вып. 4,5(31-32). С. 146-148.
57. Auslender V.L. ILU-type electron accelerators for industrial technologies // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 1994. North-Holland. V. 89. P. 46-48.
58. Ауслендер В.Л., Букин А.Д., Воронин Л.А. Рентгеновский конвертор электронного пучка мощностью 60 кВт для ускорителя ИЛУ-10 // Труды 10-го международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. Санкт-Петербург, 1-4 октября 2001г. С. 47-55.
59. Ауслендер В.Л., Брызгин А.А., Горбунов В.А., Горнаков И.В., Кузнецов Г.И., Макаров И.Г., МАтяж Н.В., Острейко Г.Н., Панфилов А.Д., Сердобинцев Г.В., Тарнецкий В.В., Тиунов М.А., Факторович Б.Л., Чернов К.Н., Ческидов В.Г. 100 кВт линейный ускоритель модульного типа для промышленных применений, с энергиями электронов 7,5–10 МэВ. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-физические исследования. 2010. №2(66). Вып.53. С. 9-13.
60. Вдовин С.А. Гусев Е.В., Демченко П.А., Шулика Н.Г. Линейный ускоритель дейтронов для элементного анализа // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-физические исследования. 2010. №2(66). Вып.53. С. 29-33.
61. Загер Б.А., Тишин В.Г. Резонансный ВЧ разряд и возможности его подавления // ЖТФ. 1964. Т.34. №2. С. 297-306.
62. Зайдин Д.Г., Кушин В.В. Исследование низковольтного ВЧ разряда в откачиваемом объемном резонаторе // Труды РТИ СССР. 1960. Т.2. Вып.4. С. 85-100.

63. Albert J. Hatch and H. Bartel Williams. The Secondary Electron Resonance Mechanism of Low-Pressure High Frequency Gas Breakdown. // J. Appl. Phys. 1954. V.25. № 4. P. 417-423.
64. Albert J. Hatch and H. Bartel Williams. Multipactoring Modes of High-Frequency Gaseous Breakdown // Phys. Rev. 1958. V.112. № 3. P. 681-685.
65. Miller A., H. Bartel Williams and O. Theimer. Secondary-Electron-Emission Phase-Angle Distributions in High-Frequency Multipactoring Discharges // J. Appl. Phys. Vol.14. №6. 1963. P. 1673-1679.
66. J. Rodney M. Vauchan. Multipactor // IEEE Transaction on Electron Devices. V.35. №7. 1988. P. 1172-1180.
67. Каминский В.И., Лалаян М.В., Собенин Н.П. Ускоряющие структуры // Учебное пособие. МИФИ. 2005. 294 с.
68. Добрецов Л.Н., Гомоюнова М.В. Эмиссионная электроника // Москва: Издательство «Наука». 1966. 564 с.
69. Брюининг Г. Физика и применение вторичной электронной эмиссии. Перевод с англ. под ред. Фаворина В.Н. // Москва: Издательство «Советское радио». 1958. 192 с.
70. Вальднер О.А., Власов А.Д., Шальнов А.В. Линейные ускорители // Москва: «Атомиздат». 1969. 248 с.
71. Безродный Ю.Г., Репалов Н.С., Хижняк Н.А., Шулика Н.Г. Взаимодействие электромагнитных колебаний в Н-резонаторе, нагруженном пассивным резонансным элементом типа "металлическая петля с сосредоточенной ёмкостью" // Вопросы атомной науки и техники. 1976. Вып.2(3). С. 40-42.
72. Беляев О.К., Гладков А.В., Масаев А.Б., Семизоров А.Н., Степанов В.Б., Гамарский В.П., Иванов Р.Ю., Малынин Ю.Г., Пузанов С.В., Хмара В.А., Яшнов Ю.М. Об электронной подгрузке резонатора на высоком уровне мощности // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-физические исследования (Теория и эксперимент). 1990. Вып. 10(18). С. 38-41.

73. Беляев О.К., Степанов В.Б. Электронная нагрузка в ускорителе с ВЧК фокусировкой // XVI Совещание по ускорителям заряженных частиц, Институт физики высоких энергий, Протвино, 20-22 октября 1998г. Сборник докладов в двух томах. Протвино. Т.1. С. 298-231.
74. Демченко П.А., Шулика Н.Г. Эмиссионные токи в ускорителе ионов с переменного-фазовой фокусировкой // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Техника физического эксперимента (научно-технический сборник). Москва: 1984. Вып.1(18). С. 57-59.
75. Демченко П.А., Ковальчук И.К., Митроченко В.В., Шулика Н.Г. Радиальные электронные потоки в ускоряющей структуре на Н-волне // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Техника физического эксперимента (науч-технич сб.). М.: 1986. Вып.2(28). С. 31-33.
76. Белоцерковский Г.Б. Антенны // М.: Государственное научно-техническое издательство «Оборонгиз». 1962. 492 с.
77. Немец О.Ф., Гофман Ю.В. Справочник по ядерной физике // Киев. 1975. С. 90.
78. Кравчук Л.В., Пунтус В.А., Романов Г.В., Тарасов С.Г. Разработка программы расчета мультипакторного разряда // Тезисы докладов 12-го Всесоюзного семинара по линейным ускорителям заряженных частиц 28-30 мая 1991. г. Харьков. 1991. С. 22.
79. Gusarova M.A., Kaminsky V.I., Krabchuk L.V. Evolution of 3D simulation multipacting code MultP // Problems of Atomic Sciences and Technology. Ser.: «Nuclear Physics Investigations». 2008. №3(49). P. 123-127.
80. Гусарова М.А., Лалаян М.В., Куцаев С.В., Исаев И.В., Болгов Р.О. Расчет мультипакторного разряда в ускоряющих резонаторах с учетом внешнего магнитного поля // Вопросы Атомной Науки и Техники. Серия: Ядерно-физические исследования (53). 2010. №2(66). С. 71-73.
81. Гусарова М.А. Мультипакторный разряд в элементах и узлах линейных ускорителей. Автореферат диссерт. на соиск. уч. степ. канд. физ.-мат. наук

по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника. Москва. 2009. 20 с.

82. Айнбунд М.Р., Поленов Б.В. Вторично-электронные умножители открытого типа и их применение // Москва: «Энергоиздат». 1981. 139 с.
83. Бокринская А.А., Скорик Е.Т. Методы измерения мощности СВЧ // Государственное издательство технической литературы УССР. Киев. 1962. 171 с.
84. Кузнецов В.А., Долгов В.А. Измерения в электронике. Справочник под редакцией Кузнецова В.А. // Москва: «Энергоиздат». 1987. 512 с.
85. Федоров Н.Д. Электрические приборы СВЧ и квантовые приборы // Москва: «Атомиздат». 1979. 288 с.
86. Бронштейн И.М., Фрайман Б.С. Вторичная электронная эмиссия // Москва: Издательство «Наука». 1969. 407 с.
87. Шульман А.Р., Фридрихов С.А. Вторично-эмиссионные методы исследования твёрдого тела // Москва: Издательство «Наука». 1977. 551 с.
88. Браун С.С. Элементарные процессы в плазме газового разряда. Перевод с англ. под редакцией Д.А. Франк-Каменецкого // Москва: Государственное издательство в области атомной науки и техники. 1961. 323 с.
89. Петрунин В.И. Некоторые вопросы теории низковольтного резонансного электронного разряда (мультипакции). Электрофизическая аппаратура // Москва: «Атомиздат». 1963. Вып.1. С. 97-118.
90. Волков В.А., Ганичев Д.А. Стационарное состояние вакуумного вторично-электронного разряда // ЖТФ. 1964. Т.52. №8. С. 1559-1564.
91. Сливков И.Н. Процессы при высоком напряжении в вакууме // Москва: «Энергоатомиздат». 1986. 266 с.
92. Бычков С.И. Вопросы теории и практического применения приборов магнетронного типа // Москва: Издательство «Соврадио». 1967. 216 с.
93. Gilardini Aldo L. Multipacting discharges: Coustant – k theory and simulation results // J. Appl. Phys. 1995. V.78. № 2. P. 783-795.

94. Riyopoulos S., Chernin D. and Dialetis D. Theory of electron multipactor in crossed fields // *Physics of Plasmas*. 1995. Vol.2. P. 3194-3213.
95. Kishek R.A., Lau Y.Y., Ang L.K. et al. Multipactor discharge on metals and dielectrics: Historical review and recent theories // *Physics of Plasmas*. – 1998. Vol.5. № 5. P. 2120-2126.
96. Kishek R.A. and Lau Y.Y. Interaction of Multipactor Discharge and RF Circuit // *Physical Review Letters*. 1995. Vol.75. №6. P. 1218-1221.
97. Kishek R.A. and Lau Y.Y. A novel phase focusing mechanism in multipactor discharge // *Physics of Plasmas*. 1996. Vol.3. № 5. P. 1481-1483.
98. Agust V., Kishek R.A., Lau Y.Y. Frequency response of multipactor discharge // *Physics Plasmas*. Vol.5. №1. 1998. P. 300-304.
99. Физический энциклопедический словарь. Под ред. А.М. Прохорова // Москва: «Советская энциклопедия». 1983. С. 9.
100. Харкевич А.А. Теоретические основы радиосвязи // Москва: Госиздательство технико-теоретической литературы. 1957. 347 с.
101. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика. Том.1 // Москва: Издательство «Наука». Главная редакция физико-математической литературы. 1965. 203 с.
102. Зинченко Н.С. Курс лекций по электронной оптике // Харьковский государственный университет им. А.М. Горького. Харьков. 1958. 275 с.
103. Рухтерхольц А. Электронная оптика. Основы теоретической электронной оптики. Пер. с нем. И.В. Родниковой под ред. акад. П.И. Лукирского // Москва: Издательство иностранной литературы. 1952. 263 с.
104. Кельман В.М., Явор С.Я. Электронная оптика // Издательство «Наука», Ленинградское отделение. Ленинград. 1968. 487 с.
105. Федоров Н.Д. Электрические приборы СВЧ и квантовые приборы // М.: «Атомиздат». – 1979, – 288 с.
106. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы // Москва: «Наука». 1973. С. 88.

ДОДАТОК А. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.

Список публікацій, у яких опубліковані основні результати 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). Kharkov. 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). Kharkov. 2002. № 2. P. 93-94.
3. Лобзов Л.Д., Демченко П.А., Шулика Н.Г., Макарова Л.Н., Овчинников А.В. Влияние мультипакторных разрядов, на устойчивость установления автогенераторных ускоряющих полей однорезонаторного линейного ускорителя ионов // Вісник Харківського національного університету ім. В.Н Каразіна. Серія фізична «Ядра, частинки, поля». 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 Харківського національного університету ім. В.Н Каразіна. Серія фізична «Ядра, частинки, поля». 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. Институт Радиофизики и Электроники им. А.Я Усикова. Харьков. 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-физические исследования» (53). ННЦ ХФТИ. №2(66). 2010. P. 44-47.
7. Лобзов Л.Д. Параметры вторично-электронных процессов в однородных ВЧ-электрических полях резонаторных структур // Радиофизика и Электроника.

Институт Радиофизики и Электроники им. А.Я Усикова НАН Украины. Харьков. 2011. Т.2 (16). №1. С. 70-76.

8. Лобзов Л.Д., Шулика Н.Г., Коваленко В.Ф., Белан, Шулика О.Н., Подоляк А.П., Макарова Л.Н. Мультипакторные разряды в зазорах ускоряющего канала и других областях резонаторной структуры линейного ускорителя ионов // Радиофизика и Электроника. Институт Радиофизики и Электроники им. А.Я Усикова НАН Украины Украины. Харьков. 2014. Т.5 (19). №2. С. 68-76.

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

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

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

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

12. Гусев Е.В., Лобзов Л.Д., Логвин В.В., Коваленко В.Ф., Мазалов Ю.П., Шулика Н.Г. Высокочастотный автогенератор линейного ускорителя ионов // Тезисы докладов 12-го Всесоюзного семинара по линейным ускорителям заряженных частиц 28-30 мая 1991г. Харьковский физико-технический институт и Харьковский государственный университет им. В.Н. Каразина. Харьков. С. 51.

13. Лобзов Л.Д., Гусев Е.В., Шулика Н.Г. Исследование мультипакторных разрядов в резонаторе Н-типа линейного ускорителя ионов // XIII Совещание по ускорителям заряженных частиц, ОИЯИ, Дубна 13-15 октября 1992г. Аннотации докладов. Дубна. 1992. С.73.

14. Лобзов Л.Д., Шулика Н.Г. Мультипакторные разряды в резонаторе Н-типа линейного ускорителя ионов // XIV Собрание по ускорителям заряженных частиц, ИФВЭ, Протвино, 25-27 октября 1994г. Аннот. Докладов. 1994. С.31.
15. Лобзов Л.Д., Шулика Н.Г., Толстолужский А.П. Мультипакторный разряд в электрических полях вакуумированной ячейке ускорителя // Тезисы XIX Международного семинара по ускорителям заряженных частиц, 12–18 сентября 2005г., Алушта. Крым. Харьков. 2005. С. 71.
16. 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. ННЦ ХФТИ и ИФВЭ. Харьков. 2008г. С. 94.
17. Лобзов Л.Д., Шулика Н.Г. Автоколебательная система ВЧ возбуждения 2-х резонаторного линейного ускорителя дейтронов // Тезисы докладов XXI Международного семинара по ускорителям заряженных частиц, 6-12 сентября 2009г., Алушта. Крым. Харьков. 2009. С. 27.
18. Лобзов Л.Д., Шулика Н.Г., Коваленко В.Ф., Белан В.Н., Шулика О.Н., Подоляк А.П., Макарова Л.Н. Мультипакторные разряды в зазорах ускоряющего канала и на периферии резонаторной структуры ЛУИ // Тезисы докладов XXIII Международного семинара по ускорителям заряженных частиц, 8-14 сентября 2013г. Алушта. Крым. Харьков. 2013. С. 80.
19. Лобзов Л.Д. Энергетические параметры вторично-электронных процессов в однородных электрических полях ВЧ-СВЧ резонаторной структуры линейного ускорителя ионов // Тезисы докладов XXIII Международного семинара по ускорителям заряженных частиц, 8-14 сентября 2013г. Алушта. Крым. Харьков. 2013. С. 78.

Список публікацій, які додатково відображають наукові результати дисертації:

20. 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. ОИЯИ. Дубна 13-15 октября 1992 г. С. 269-273.

21. Лобзов Л.Д., Шулика Н.Г. Мультипакторные разряды в резонаторе Н-типа линейного ускорителя ионов // XIV Совещание по ускорителям заряженных частиц. ИФВЭ. Протвино 25-27 октября 1994 г. Сборник докладов в 4-х томах. Т.1. 1994. С. 209-212.