

**Л. Д. Лобзов, Н. Г. Шулика, В. Ф. Коваленко, В. Н. Белан,
О. Н. Шулика, А. П. Подоляк, Л. Н. Макарова**
Национальный научный центр Харьковский физико-технический институт
1, ул. Академическая, Харьков, 61108, Украина
E-mail: lobzov@kipt.kharkov.ua

МУЛЬТИПАКТОРНЫЕ РАЗРЯДЫ В ЗАЗОРАХ УСКОРЯЮЩЕГО КАНАЛА И ДРУГИХ ОБЛАСТЯХ РЕЗОНАТОРНОЙ СТРУКТУРЫ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИОНОВ

Мультипакторные разряды, сопровождаемые размножением электронов вторично-электронной эмиссии (ВЭЭ), достигающих электронного замыкания электродов линейного ускорителя ионов (ЛУИ), – нежелательные явления, что требует их обязательного устранения. Замыкания возможны и между электродами других его промежутков. Однако в научной литературе отсутствуют сведения, указывающие на нарушения характеристик ускорителя, искажаемых разрядами в разных его областях. В таких случаях визуально выявляют области разрядов за пределами ускоряющего канала и устраняют их. Если и после этого в ускоряющих зазорах происходят электронные замыкания электродов, то их устраняют известными доступными методами. В данном исследовании использована современная схема возбуждения ускорителя двумя идентичными ВЧ-источниками с независимыми положительными обратными связями. Их совместная работа на одну и ту же резонансную нагрузку (основной или возмущенной частоты) позволяет обеспечивать в ней как устойчивое возбуждение ВЧ-напряжений, так и подавление мультипакторных процессов и разрядов. На практике это подтверждается тем, что при малых величинах напряжений и, соответственно, на переднем и заднем фронтах импульса электронного тока ВЭЭ присутствует лишь инициация размножения электронов (мультипакторные всплески). Однако и такая устойчивая работа ускорителя была неожиданно нарушена грубыми искажениями импульсов напряжений и токов ВЭЭ. Осмотр внутренностей структуры показал, что там происходят интенсивные светящиеся разряды в разных областях – на входе ускорителя и на его периферии. На входе – это расчетный зазор длины 1,353 см с участками параллельных торцевых поверхностей первых трубок дрейфа. На периферии – это паразитная щель ~ 0,1...0,2 мм (измеренная при вскрытом вакуумном кожухе), образованная поверхностью структуры и концом медной пластины (заплаты, закрывающей ненужное сквозное отверстие), оловянный припой между которыми частично сублимировался. Из искажений импульсов контрольных напряжений и общих токов ВЭЭ стало понятно, что при этом соблюдаются основные закономерности, соответствующие теме данных исследований. Визуальное обозрение светимости областей разрядов и анализ характера искажений во времени форм импульсов указанных напряжений и электронных токов позволили однозначно характеризовать оба указанных разряда как мультипакторные, что существенно облегчает их исследование и выбор методов подавления. Результаты исследования расширяют знания об условиях развития и управления мультипакторными процессами и разрядами в высокодобротных ($Q_0 \gg 1$) резонаторных структурах, что является необходимым для обеспечения постоянства во времени характеристик ЛУИ. Ил. 5. Библиогр.: 18 назв.

Ключевые слова: ускоряющий промежуток резонаторной структуры, экспоненциальное изменение ВЧ-колебаний во времени, вторично-электронная эмиссия, гибельный мультипакторный разряд.

Исследование в Национальном научном центре «Харьковский физико-технический институт» вторично-электронной эмиссии (ВЭЭ), с неоднозначными вторично-электронными (ВЭ) эмиссионными свойствами собственных электродов резонансной структуры высокочастотного (ВЧ) линейного ускорителя ионов (ЛУИ), при возбуждении переменных напряжений, стало возможным в связи с реконструкцией автоколебательной системы (АС) однорезонаторного малогабаритного линейного ускорителя дейтронов МЛУД-3 [1].

Так как применяемые в ускорительной технике конца 1970-х гг. однокаскадные ВЧ-автогенераторы с балластным («гасящим») сопротивлением [2, 3] были отменены для практического использования, то было принято предложение перейти к АС с известными ВЧ-обратными связями [4]. Такая система ускорителя с одной положительной обратной связью (ПОС) из резонатора (ПОСР), подключаемой ко входу 3-каскадного усилительного канала, и была изначально разработана, изготовлена и настроена в рабочий режим.

Однако после подачи постоянного напряжения импульсного модулятора на аноды генера-

торных ламп, нормальная устойчивость установления ВЧ-напряжений, возбуждаемых АС в резонансной структуре ускорителя, сохраняется только в течение первых 10...11 мин.

Затем величины амплитуд возбуждаемых напряжений ускорителя быстро уменьшаются до минимальных значений при одновременном смещении резонансной частоты резонатора высокой добротности за пределы собственной полосы пропускания.

Такое расстроенное во времени состояние ЛУИ с минимальными напряжениями, которые обеспечивают условия развития ВЧ-разрядов между электродами и электродными поверхностями ускоряющей структуры, может продолжаться достаточно долго [5].

Поскольку какие-либо другие разряды в резонаторной структуре ЛУИ устранялись предварительно (без выяснения их типов и исследования влияния на резонансные характеристики), то естественно было согласиться с тем, что и в ускорителе *H*-типа между параллельными торцевыми поверхностями трубок дрейфа имеют место резонансные ВЭ-разряды (в английской терминологии – *multipactor effect, discharge* [6, 7]).

Следует отметить, что ВЭ-процессы обычной эмиссии электронов и их размножение до разрядных состояний, хаотически возникающих между произвольными участками поверхностей, обращенных друг к другу торцов трубок дрейфа, – это грубые локальные нарушения фокусирующего действия симметрично-азимутальных электрических полей на оси ускорителя [8, 9].

Детальный анализ свойств автогенераторов и АС с внутренними и внешними цепями ПОС [10–12] послужил основой разработки новой ВЧ-системы ускорителя с двумя независимыми автоколебательными контурами [13]. Цепи положительных обратных связей (на коаксиальных кабелях типа РК-75-9-12) этих контуров вынесены за пределы мощного усилительного канала и энергоемкой резонаторной структуры ускорителя. Управление параметрами такой структуры регулируется амплитудно-фазовыми элементами в этих цепях.

Сущность работы новой АС состоит в одновременном возбуждении в резонансной структуре ускорителя двух ВЧ-напряжений на его основной частоте. Параметры одного из напряжений, в отличие от другого, зависят от паразитного воздействия мультипакторных процессов и разрядов в резонаторе. При этом синхронное наложение во времени этих напряжений в ускорителе, приводит к непрерывному увеличению их суммы, экспоненциально нарастающей с минимальных величин.

Нарушение условий, которые обеспечивают размножение эмиссии вторичных электронов при малых величинах напряжений, прикладываемых электродам зазоров ускоряющего канала, подавляет начальное развитие размножения электронов ВЭЭ в зазорах ускоряющего канала ЛУИ.

Основным достоинством нового метода ВЧ-возбуждения ускорителя является то, что при этом полностью сохраняется картина аксиальных симметричных ВЧ-полей ускоряющих зазоров и резонаторной структуры в целом. При этом амплитуды напряжений, прикладываемых к зазорам ускоряющих электродов, определяют их ВЭ-эмиссионные свойства и реальные токи вторичных электронов, величины которых могут быть измерены экспериментально.

Выбрав в качестве контрольных параметров ускорителя импульсы напряжений на оси и электронных токов ВЭ-эмиссии в ускоряющих зазорах на выходе ускорителя, можно однозначно характеризовать его нормальную или искаженную работу.

Осциллограммы нормальных форм контрольных импульсов напряжений и общих токов ВЭЭ, определяющих номинальные характеристики ЛУИ, которые приведены в работе [14], здесь представлены для наглядности на рис. 1.

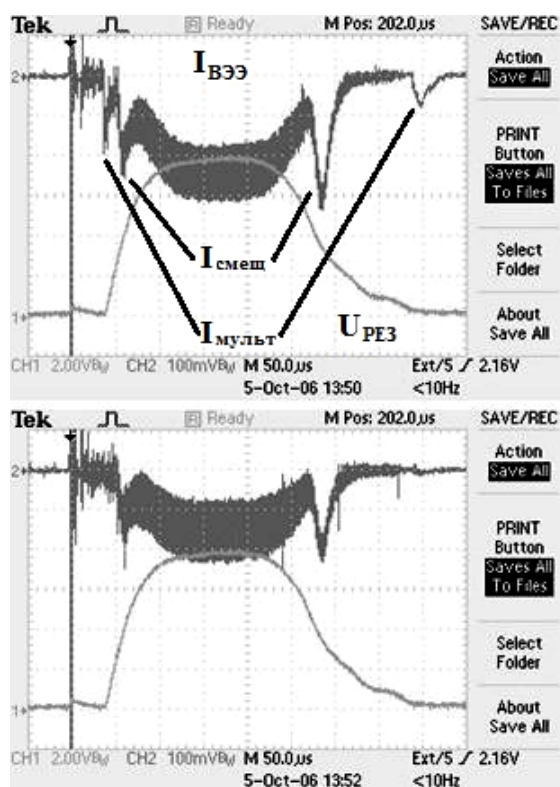


Рис. 1. Осциллограммы импульсов нормальных форм контрольных напряжений резонатора U_{PE3} (CH1) и общих токов ВЭЭ $I_{BЭЭ}$ (CH2), измеренных цилиндром Фарадея (верхняя пара) на выходе ускоряющего канала ЛУИ и предварительно задержанных алюминиевой фольгой 5 мкм (нижняя пара), установленной перед цилиндром Фарадея

Из него следует, что устойчивое возбуждение ЛУИ двумя независимыми ВЧ-автоколебательными контурами – это парные контрольные импульсы ВЧ-напряжений U_{PE3} и общих токов ВЭЭ $I_{BЭЭ}$, эмитируемых с торцов предпоследних ускоряющих зазоров и выходящих из ускорителя. Здесь $I_{BЭЭ}$ – общий ток электронов ВЭЭ; $I_{МУЛЬТ}$ – мультипакторные токи подавленного размножения электронов при минимальных напряжениях U_{PE3} ; $I_{СМЕЩ}$ – электронные токи смещения ($I_{СМЕЩ} = dU/dt$).

Наличие на общем импульсе тока $I_{BЭЭ}$, подавленного размножения эмиссии вторичных электронов во времени может считаться нормальной физической характеристикой свойств электродов ускоряющего канала ЛУИ при приложенных переменных напряжениях.

1. Условия развития мультипакторных разрядов в разных областях ЛУИ. Структурная схема возбуждения переменных ВЧ-напряжений и подавления размножения электронов ВЭЭ в области ускоряющих зазоров однорезонаторного ЛУИ с одним ВЧ-источником и двумя независимыми автоколебательными контурами описана в работе [14].

Здесь же, на рис. 2 приводится идентичная схема возбуждения резонаторной структуры ускорителя ионов двумя независимыми АС, образуемыми отдельными идентичными мощными ВЧ-усилительными каналами с разными ПОСР и фидера (ПОСФ): R – резонатор ускорителя; $f_{\text{РЕЗ}} = 100$ МГц; $Q_0 = 5\,000$; 1 – ВЧ-источник; 2 – модулятор; 3 – согласованный ВЧ-ввод; 4 – элемент положительной обратной связи резонатора с входом одного из ВЧ-источников; 5 – амплитудно-фазовый регулятор; 6 – переключатель фидерный; 7 – механический привод переключателя фидерного; 8 – мощная активная нагрузка; 9 – рефлектометр фидерный; 10 – элемент положительной обратной связи фидера с входом другого ВЧ-источника; 11 – петля контрольного результирующего напряжения ЛУИ; 12 – цилиндр Фарадея; 13 – сопротивление измерительное; 14 – осциллограф цифровой; 15 – смотровое окно. Это необходимо для упрощения понимания взаимодействия результирующих напряжений, синхронно возбуждаемых в ВЧ-структуре и общих ВЭ-эмиссионных свойств электродов, находящихся в электрических полях.

Каналы усиления ВЧ-напряжений представлены как автономные с одинаковыми модуляторами, ВЧ-каскадами, согласованными ВЧ-вводами и элементами фидерных линий. Величины напряжений $U_1 \sin(\omega t + \varphi)$ и $U_2 \sin(\omega t + \varphi)$ суммируются непосредственно в резонаторной структуре ускорителя.

Ускоритель представлен единичной ячейкой тороидального резонатора с одним ускоряющим зазором длины d_1 . Электроды и электродные поверхности ЛУИ изготовлены из меди высокого качества.

Однородные электрические поля ускоряющего зазора указаны силовыми линиями, нормальными к параллельным торцевым поверхностям трубчатых электродов. Неоднородные электрические поля в зазоре указаны провальными к оси силовыми линиями, которые начинаются и заканчиваются на обращенных друг к другу кромках электродов.

Продольные составляющие осевых электрических полей, предназначенные для пролетающих ионов, обеспечивают ускорение и электронов ВЭЭ, эмитируемых в зазор с торцевых поверхностей, которые обращены как к выходу, так и входу ускорителя.

Так как величины напряжений, генерируемые АС с ПОСФ и ПОСР находятся в соотношении $U_{\text{ПОСФ}} \sim 0,25U_{\text{ПОСР}}$, то начальный рост во времени результирующих напряжений структуры ЛУИ обеспечивается АС с ПОСР.

Медленное изменение этих малых напряжений обеспечивают малые энергии ускоренных электронов, эмитируемых с одних элект-

родов и приобретающих статус первичных при соприкосновении с другими электродами. При этом коэффициент ВЭ-эмиссии δ электродов и поверхностей ускорителя в начальной части каждого полупериода возбуждаемого напряжения предварительно характеризуется коэффициентом ВЭЭ δ как $\delta > 1$. В оставшихся частях полупериодов коэффициент δ этих электродов характеризуется как $\delta < 1$. В этих условиях и начинается как инициация размножения электронов ВЭЭ, так и обычная их эмиссия с электродов ускоряющих и других полезных диодных промежутков ЛУИ [15, 16]. И в первую очередь такое размножение электронов может достигать устойчивого электронного замыкания электродов, которые образуют зазоры наименьших длин на входе ускорителя [17, 18].

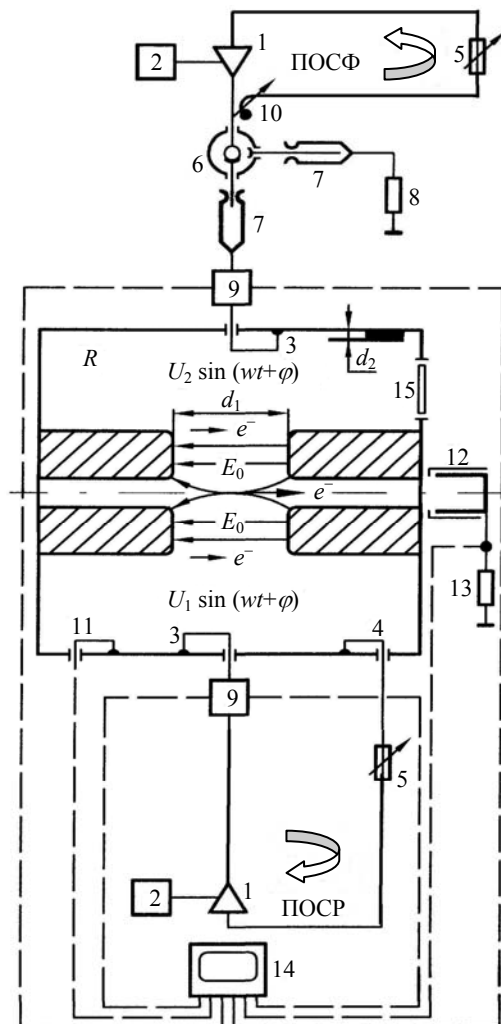


Рис. 2. Структурная схема однорезонаторного ЛУИ, возбуждаемого двумя независимыми автоколебательными источниками, обеспечивающих как генерацию переменных ВЧ-напряжений, так и мультипакторных процессов размножения электронов ВЭЭ, достигающих во времени электронного замыкания зазоров наименьших длин ускоряющего канала и в паразитном зазоре на периферии

Однако, как указано выше, генерация напряжений АС с ПОСР + ПОСФ непрерывно увеличивает величину нарастающего результирующего напряжения резонаторной структуры, что вызывает срыв постоянства амплитудных условий размножения электронов ВЭЭ. При этом все электроны, эмитируемые и ускоряемые во всех зазорах ускоряющего канала при увеличивающихся напряжениях текущих полупериодов, обеспечивают обычную ВЭЭ и интенсивное нагревание электродов во времени.

В таких условиях эффективной ВЧ-тренировки структуры ускорителя, на его цилиндрической поверхности и возник нежелательный диодный промежуток на периферии. Один конец медной плоской пластины (заплаты) с габаритами 20×200 мм, оказавшись на длине ~ 40 мм без оловянного припоя, образовал с поверхностью резонатора паразитную щель ~ 0,1 мм (измеренной щупом при комнатной температуре). При этом поверхность пластины, при толщине 2 мм, не была искажена в течение предыдущих ВЧ-тренировок и нагрева.

Поскольку тип разряда в первых зазорах ускоряющего канала ускорителя был выявлен ранее, то в указанном случае появилась возможность определения типа другого вакуумного разряда и метода его устранения.

Диагностика параметров ВЧ-источников, характеризующих их режимы работ на согласованные активные нагрузки, сосредоточена на напряжениях падающих и отраженных волн ($U_{\text{пад}}$, $U_{\text{отр}}$), а основных характеристик ЛУИ – на величинах амплитуд и формах импульсов контрольных напряжений на оси ускоряющего канала резонатора ($U_{\text{РЕЗ}}$) и общих ВЭ-токов на выходе ускорителя ($I_{\text{ВЭЭ}}$).

2. Исследование во времени искажений контрольных импульсов ЛУИ при мультипакторных разрядах в разных его областях. Нарушение нормального ВЧ-возбуждения ускорителя МЛУД-3 в начале очередной ВЧ-тренировки было обнаружено по искажению нормальных форм контрольных импульсов напряжений резонатора $U_{\text{РЕЗ}}$ и общих ВЭ-эмиссионных токов с электродов ускоряющего канала $I_{\text{ВЭЭ}}$.

При осмотре динамического состояния внутреннего объема возмущенного ЛУИ было выявлено интенсивные свечения, происходящие от электронных разрядов как в начальных зазорах ускоряющего канала, так и у поверхности резонатора вблизи торца верхнего гребенчатого держателя (см. рис. 2). Происходит это в полной тишине, указывая на то, что при таком электронном замыкании электродов расстроенного ускорителя электрическая прочность его внешних ВЧ-систем и фидерных элементов достаточно высока.

В соответствии с реальной угрозой от происходящего и во избежание аварийной ситуации в рассогласованных ВЧ-системах ЛУИ время подачи постоянного высоковольтного напряжения было ограничено. Подобная ситуация горения указанных вакуумных разрядов после достижения рабочего вакуума в ускорителе повторялась и в течение ВЧ-тренировок следующих рабочих дней.

Оценив относительно безопасное поведение ускоряющей структуры при таких тихих разрядах, и была проведена регистрация контрольных импульсов $U_{\text{РЕЗ}}$ и $I_{\text{ВЭЭ}}$.

В работе представлены 12 осциллограмм парных импульсов контрольных напряжений резонатора $U_{\text{РЕЗ}}$ (нижние кривые) и токов ВЭ-эмиссии в вакууме $I_{\text{ВЭЭ}}$ (верхние кривые), измеренных в течение 15 мин ВЧ-тренировки (11:54...12:08). Частота следования импульсов 1 имп/с. Масштабы исследуемых сигналов по горизонтали и вертикали указаны в рамках экрана цифрового осциллографа.

На рис. 3 показаны осциллограммы парных импульсов указанных напряжений $U_{\text{РЕЗ}}$ и общих токов ВЭ эмиссии $I_{\text{ВЭЭ}}$ в течение времени от 11:54 до 11:57 начала ВЧ-тренировки.

Общим для парных осциллограмм 1–4 являются почти нормальные формы передних фронтов импульсов возбуждаемых напряжений, а для осциллограмм 1–3 нормальными по форме и времени спада являются задние фронты указанных напряжений. Однако нормальными по общим формам и времени их запуска являются только импульсы $U_{\text{РЕЗ}}$ и $I_{\text{ВЭЭ}}$, представленные на осциллограмме 2. Нормальная инициация подавленных мультипакторных токов (указаны стрелками) в начале и конце импульса $I_{\text{ВЭЭ}}$ соответствует коротким интервалам времени минимальных величин напряжений переднего и заднего фронтов контрольного импульса напряжения $U_{\text{РЕЗ}}$.

Запуск импульсов $U_{\text{РЕЗ}}$ в течение времени 11:54...11:57 ВЧ-тренировки не устойчив. На осциллограммах 1 и 3 это отмечено как укорочение их длительности по основанию на время Δt .

Можно полагать, что нарушение времени запуска импульса напряжения $U_{\text{РЕЗ}}$ обусловлено начальным изменением форм и амплитуд импульсов ВЭ токов $I_{\text{ВЭЭ}}$ на осциллограммах 1 и 3. Это полностью подтверждается искаженными формами импульсов $U_{\text{РЕЗ}}$ и $I_{\text{ВЭЭ}}$ на последующей осциллограмме 4.

Объяснением такому поведению указанных импульсов резонаторной структуры, в прошлом устойчиво возбуждаемой в течение ряда лет, может быть только резкое изменение ВЭ-эмиссионных свойств электродов и электродных поверхностей за пределами осевых ускоряющих зазоров.

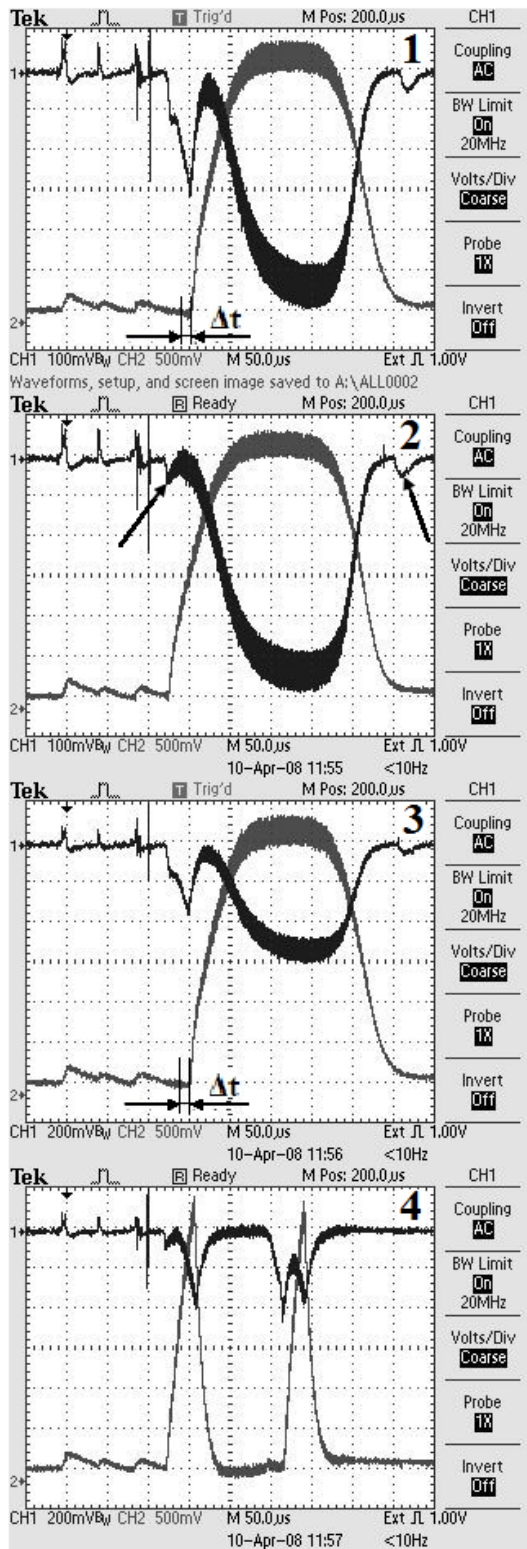


Рис. 3. Осциллограммы искаженных форм импульсов напряжений U_{PE3} (CH2) и общих токов $I_{BЭЭ}$ (CH1) при начальных процессах размножения электронов ВЭЭ, достигающих электронного замыкания первых ускоряющих зазоров и паразитного зазора на периферии (11:54...11:57)

Можно также предполагать, что продолжительность времени переднего и заднего фрон-

тов импульса напряжения U_{PE3} (осциллограмма 4) оказалась достаточной для размножения ВЭЭ до достижения нежелательного вакуумного разряда на периферии. При этом резкое уменьшение амплитуды импульса напряжения U_{PE3} , в том числе и на периферии структуры, также обеспечило размножение электронов ВЭЭ до электронных разрядов в паразитном зазоре. Таким образом, условия развития вакуумных разрядов в зазорах ускоряющего канала и на периферии ЛУИ, могут считаться идентичными.

На рис. 4 (осциллограммы 5–8) показано продолжение этапа ВЧ-тренировки ускоряющей резонаторной структуры ЛУИ в условиях существования ВЭ-эмиссионных разрядов. Общим для этой группы осциллограмм является отсутствие задержки запуска импульсов U_{PE3} , что отчетливо видно по нормальным формам подавленных всплесков размножения электронов на импульсе общего электронного тока $I_{BЭЭ}$ при малых величинах экспоненциально нарастающих напряжений U_{PE3} . Однако условия малых напряжений в резонаторе и размножения электронов ВЭЭ до электронного замыкания электродов на периферии – это моменты срыва нарастания импульсов напряжений на осциллограмме 5. Относительно длительное время их спада – это процессы резкого уменьшения или увеличения интенсивности указанных разрядов. Конкуренцию этих процессов мы наблюдаем при трех неудавшихся попытках восстановления нормального переднего фронта импульса возбуждаемого ВЧ-напряжения U_{PE3} . Последний его всплеск (регистрируемый на выходе ЛУИ) иллюстрирует интенсивные ВЭ-токи в зазорах ускоряющего канала.

На осциллограмме 6 (12:00) мы видим промежуточный результат интенсивных ВЭ-процессов при ВЧ-тренировке – нормальный запуск импульса напряжения U_{PE3} и форм его переднего и заднего фронтов.

Форма стола импульса $I_{BЭЭ}$ указывает на то, что обычная ВЭЭ при максимальных амплитудах напряжений, возбуждаемых в резонаторной структуре ЛУИ, лишь уменьшилась по величине, а при минимальных амплитудах напряжений на переднем и заднем фронтах импульса U_{PE3} мультипакторные всплески на импульсе общего электронного тока $I_{BЭЭ}$ нормально подавлены. Надо полагать, что условия развития токов ВЭЭ в паразитном зазоре на периферии не обеспечили их длительного размножения до величины ВЭ-разряда и импульсы U_{PE3} и $I_{BЭЭ}$ не были искажены.

Другими словами, в отсутствие ВЭ-разрядов в других областях резонаторной структуры, проблемы мультипакторных процессов и разрядов в ускоряющих зазорах, расположенных на оси линейного ускорителя ионов и возбуждаемого АС с ПОСР + ПОСФ, не существует.

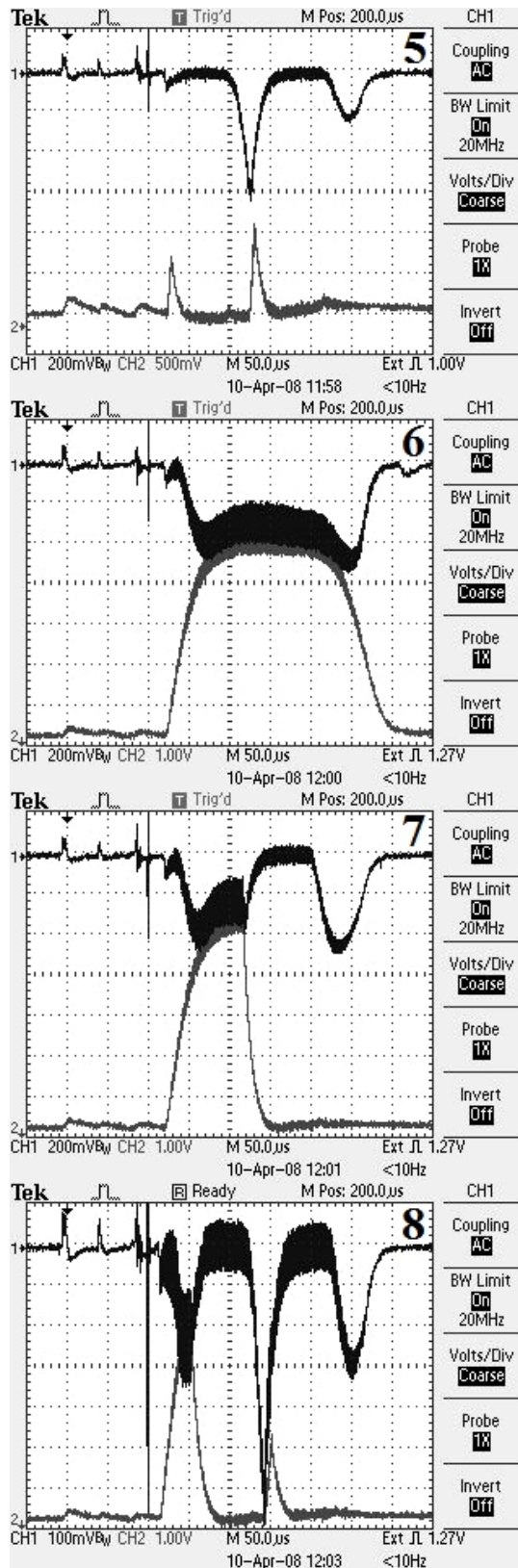


Рис. 4. Осциллограммы искаженных форм импульсов напряжений U_{PE3} и общих токов $I_{BЭЭ}$ при продолжающихся процессах размножения электронов ВЭЭ, достигающих электронного замыкания первых зазоров ЛУИ и паразитного зазора на периферии (11:58...12:03)

Действие происходящих ВЭ-процессов наблюдается и на осциллограмме 7, где начальные части (передние фронты) импульсов U_{PE3} и $I_{BЭЭ}$ также нормальной формы.

Это подтверждается последующей частью импульса U_{PE3} на осциллограмме 7, из которой следует, что при минимальных величинах быстро спадающих напряжений, почти постоянных во времени, интенсивность размножения электронов в течение конечной части импульса $I_{BЭЭ}$ достаточно велика.

О том, что в резонаторной структуре одновременно наблюдаются ВЧ-вакуумные разряды на оси и периферии, указывают хаотические срывы возбуждаемых напряжений на импульсе U_{PE3} и интенсивные электронные всплески размножающейся ВЭЭ в течение импульса $I_{BЭЭ}$ на осциллограмме 8 (12:03). Заметим, что характер искажений импульсов напряжений и электронных токов ВЭЭ разный. При неоднократном искажении нарастающих фронтов импульсов U_{PE3} всплесков ВЭЭ-токов на общем импульсе $I_{BЭЭ}$ может быть несколько. При спадающих напряжениях и квазипостоянстве амплитуд, обеспечивающих размножение электронов ВЭЭ, имеем один токовый всплеск.

На рис. 5 показаны осциллограммы последующих искажений возбуждаемых ВЧ-напряжений (нарушаемых общими мультипакторными процессами), обусловленных одновременным электронным замыканием электродов ускоряющего канала и зазора на периферии в течение продолжающегося времени ВЧ-тренировки (12:04...12:08).

На осциллограммах 9–11 отчетливо виден нормальный запуск начальных частей передних фронтов импульсов напряжений U_{PE3} и соответствующих мультипакторных всплесков в самом начале импульсов тока $I_{BЭЭ}$.

На осциллограмме 12 запуск импульса напряжения U_{PE3} задержан на время Δt . При этом интенсивности развивающихся в двух областях ВЧ-разрядов достигают максимальных величин электронных мультипакторных токов, которые расстраивают резонансные свойства высокодобротной резонаторной структуры.

Как следует из этой группы осциллограмм, минимальные величины напряжений в резонаторной структуре возмущенного ЛУИ, обеспечивают интенсивное размножение электронов ВЭЭ с электродов ускоряющих зазоров наименьших длин на входе ускоряющего канала и паразитного зазора на периферии. В более длинных ускоряющих зазорах при указанных напряжениях и обычных условиях ВЭЭ, величины общих электронных токов в структуре ЛУИ невелики, что не может обеспечивать во времени высокую эффективность ВЧ-тренировки его электродов и поверхностей.

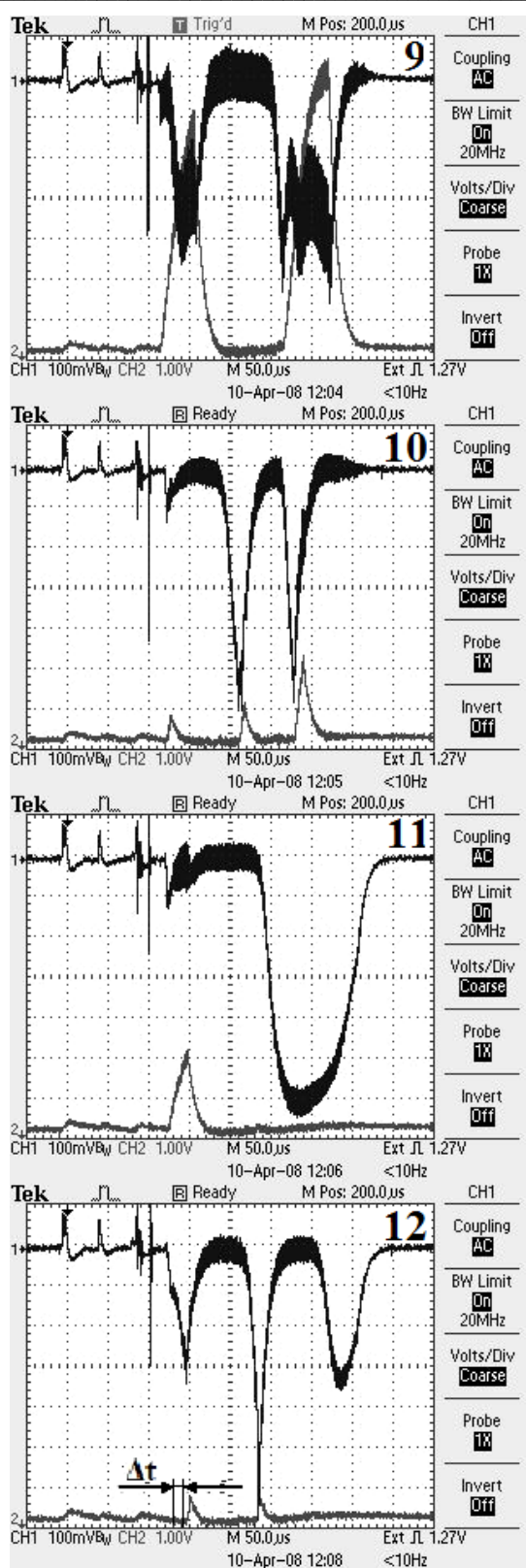


Рис. 5. Осциллограммы искаженных форм импульсов напряжений U_{PE3} и общих токов ВЭ эмиссии $I_{BЭЭ}$ при продолжающихся процессах размножения электронов, достигших одновременно устойчивого электронного замыкания первых зазоров ускоряющего канала и паразитного зазора на периферии ЛУИ, возбуждаемого двумя независимыми АС (12:04...12:08)

Таким образом, наличие в периферийных областях ЛУИ узких диодных промежутков, образуемых как нарушением технологии монтажа элементов структуры, так и неплотным прилеганием подвижных контактов устройств, регулирующих параметры структуры, приводит к возникновению ВЭ-разрядов не только в этих промежутках, но и на оси структуры. Во времени это сопровождается грубым искажением форм контрольных импульсов возбуждаемых напряжений, не давая возможности проводить экспериментальные работы по ускорению ионов.

По окончании регистрации грубо нарушенной работы ЛУИ, искаженной мультипакторными разрядами, замыкающих зазоры наименьших длин как полезных, так и паразитных промежутков, был проведен демонтаж днища резонаторной структуры и осмотр образовавшегося в нем другого зазора, длина которого почти на два порядка меньше длины первого зазора.

Причина искажения контрольных сигналов U_{PE3} и $I_{BЭЭ}$ ускорителя оказалась очевидной, обусловленной нарушением технологии соединения медной заплаты с цилиндрической поверхностью резонатора. В связи с этим метод устранения паразитного разряда был предложен наиболее простой – мягкий оловянный припой, соединяющий медную заплату с поверхностью резонатора, был полностью заменен твердым медно-фосфорным. При этом устойчивость ВЧ-возбуждения резонаторной структуры ускорителя МЛУД-3 и подавленные условия размножения числа низкоэнергетических электронов ВЭЭ (мультипакторных разрядов, достигающих ВЧ-пробоев) при сохранении обычной эмиссии вторичных электронов с параллельных электродов, находящихся в электрических полях, была восстановлена.

Выводы. Проведенные исследования показывают, что нежелательное возникновение в периферийных областях резонаторной структуры ускорителя ионов, других вакуумных ВЧ-разрядов может также инициировать условия развития интенсивных мультипакторных разрядов между торцевыми поверхностями кольцевых трубчатых электродов ускоряющего канала ЛУИ.

Устранение ВЧ-разрядов в ЛУИ, в том числе и мультипакторных, необходимо для устранения дефокусирующего действия аксиально-симметричных ВЧ-полей на оси ускорителя, нарушаемых хаотически возникающими точечными электронными замыканиями торцевых поверхностей трубок дрейфа.

Из анализа искажений во времени форм контрольных импульсов напряжений и общих токов ВЭ-эмиссии экспериментально подтверждается, что скорости электронных мультипакторных процессов и разрядов гораздо больше на-

чальных скоростей возбуждаемых ВЧ-напряжений, экспоненциально нарастающих во времени с минимальных величин в высокодобротной резонаторной структуре линейного ускорителя.

Следует особо отметить, что подавление условий размножения электронов ВЭЭ при малых величинах напряжений в зазорах ускоряющего канала и других областях резонаторной структуры ЛУИ, весьма необходимо для успешной реализации метода переменного-фазовой фокусировки и достижения одновременной радиальной фазовой устойчивости движения ускоренных пучков ионов.

В заключение следует напомнить, что при изготовлении элементов энергоемких резонаторных структур (экспериментальных, технологических) и ускорителей для фундаментальных исследований, использование разнородных металлов и мягких припоев не допустимо.

Библиографический список

1. Проект реконструкции ускоряющей структуры малогабаритного линейного ускорителя дейтронов / А. С. Белей, Е. В. Гусев, В. Н. Дериповский и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Техника физ. эксперимента. – 1987. – Вып. 4(35). – С. 8–10.
2. Федотов А. П. К вопросу о возбуждении колебаний в высокодобротном объемном резонаторе от автогенератора / А. П. Федотов, Б. К. Шембель // Радиотехника и электрон. – 1956. – № 12. – С. 1474–1477.
3. Линейные ускорители ионов / Д. В. Каретников, И. Н. Сливков, В. А. Тепляков и др. – М.: Госатомиздат, 1962. – 208 с.
4. Линейные ускорители ионов: в 2 т. Т. 2. / под ред. Б. П. Мурина. – М.: Атомиздат, 1978. – 320 с.
5. Лобзов Л. Д. Мультипакторные разряды в резонаторе Н-типа линейного ускорителя ионов / Л. Д. Лобзов, Н. Г. Шулика // XIV Совещание по ускорителям заряженных частиц. – Протвино, 1994. – Т. 1. – С. 209–212.
6. Berkeley Proton Linear Accelerator / L. W. Alvarez, H. Bradner, J. V. Franck et al. // Review of Scientific Instruments. – 1955. – 26, iss. 2. – P. 128.
7. Linear accelerators / Ed. by P. M. Lapostolle and A. L. Septier. – Amsterdam, 1970. – 1204 p.
8. Файнберг Л. Я. Переменно-фазовая фокусировка в линейных ускорителях / Л. Я. Файнберг // Журн. техн. физики. – 1959. – 29, № 5. – С. 568–579.
9. Капчинский И. М. Динамика частиц в линейных резонансных ускорителях / И. М. Капчинский. – М.: Атомиздат, 1966. – 310 с.
10. Попов В. А. Возбуждение резонатора линейного ускорителя ЛУ-20 ЛВЭ ОИЯИ / В. А. Попов. – Дубна: Объединенный ин-т ядерных исследований, 1975. – 11 с. – (Препр. / ОИЯИ № 9-9061).
11. Вещерович В. Г. О подавлении вторично-электронного ВЧ-разряда в вакуумированном резонаторе накопителя ВЭПП-3 / В. Г. Вещерович, В. К. Седяров, В. Д. Шемелин // Вопросы вакуумной науки и техники. Сер. Линейные ускорители. – 1976. – Вып. 1(2). – С. 77–79.
12. Венгров Р. М. Применение дополнительного контура обратной связи при возбуждении резонатора ускорителя тяжелых ионов в режиме автогенерации / Р. М. Венгров, В. Г. Кузмичев, Д. А. Лякин // XVII Совещ. по ускорителям заряженных частиц. – Протвино, 2000. – Т. 1. – С. 130–133.
13. Пат. SU №1700783 А1. Высокочастотный генератор / Л. Д. Лобзов, Ю. П. Мазалов, Н. Г. Шулика. – БИ № 47. – 1991. – С. 239.
14. Влияние мультипакторных разрядов на устойчивость установления автогенераторных ускоряющих полей однорезонаторного линейного ускорителя ионов / Л. Д. Лобзов, П. А. Демченко, Н. Г. Шулика и др. // Вісн. Харків. ун-ту. Сер. фізична. Ядра, частинки, поля. – 2003. – № 585, вып. 1(21). – С. 78–84.
15. Лобзов Л. Д. К теории электронного мультипакторного разряда в вакуумированной ячейке линейного ускорителя / Л. Д. Лобзов, А. П. Толстолужский, Н. Г. Шулика // Вісн. Харків. ун-ту. Сер. фізична. Ядра, частинки, поля. – 2005. – № 657, вып. 1(26). – С. 36–46.
16. Лобзов Л. Д. Параметры вторично-электронных процессов в однородных ВЧ-СВЧ электрических полях резонаторных структур / Л. Д. Лобзов // Радиофизика и электрон. – 2011. – 2(16), № 1. – С. 70–76.
17. Лобзов Л. Д. Управление мультипакторными разрядами в высокодобротной структуре линейного ускорителя ионов / Л. Д. Лобзов, Н. Г. Шулика, В. Н. Белан // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2007. – 12, № 3. – С. 598–609.
18. Duration of multipacting processes and discharges in the linac of ions / L. D. Lobzov, N. G. Shulika, O. N. Shulika, V. N. Belan // Problems of atomic science and technology. Ser. Nuclear Physics Investigations. – 2009. – Iss. 52, N 5(63). – P. 154–158.

Рукопись поступила 10.12.2013.

L. D. Lobzov, N. G. Shulika, V. F. Kovalenko,
V. N. Belan, O. N. Shulika,
A. P. Podolak, L. N. Makarova

MULTIPACTOR DISCHARGES IN GAPS OF THE ACCELERATION CHANNEL AND OTHER AREAS OF RESONATOR STRUCTURE OF THE LINEAR ION ACCELERATOR

Multipactor discharges, accompanied by electron reproduction of secondary electron emission (SEE) and reaching electron close of electrodes in linear ion accelerator (LINAC) are undesirable phenomena that must be removed. The closes are possible between the electrodes of its other areas. However, in the scientific literature there is no information on disruption of the accelerator characteristics, distorted by discharges in its different areas. In such cases, discharge areas outside the acceleration channel are identified and eliminated. If after that the electron closes of the electrodes in accelerating gaps still occur, they are eliminated by the known and available methods. In this study a modern accelerator excitation circuit, with two identical RF-sources with independent positive feedbacks is used. They work together on the same resonant load (primary or perturbed frequency) which allows to provide both sustainable RF excitation voltages and suppression of multipactor processes and discharges. In practice, this is confirmed by the fact that for small values of voltages and, consequently, on the leading and trailing edges of the current pulse of SEE, there is only the initiation of electron multiplication (multipactor splash). However, such a stable operation of the accelerator was disturbed by gross distortion of pulse voltages and currents of SEE. Examination of the internal structure showed that there are intense glow discharges in other areas of the accelerator – at the entrance and its periphery.

At the entrance it is the calculated gap of length 1.353 cm with sections of parallel end surfaces of the first drift tubes. In the periphery it is a parasitic slot ~ 0.1...0.2 mm (at opening vacuum jacket), formed by the surface structure and the end of the copper plate (patch that closes the unnecessary through hole); the tin solder between them was partially sublimated. From the analysis of pulse distortion of control voltages and common currents of

SEE, it became clear that the basic rules relevant to the research subject are observed. Visual display of the time luminosity of the discharge and a character of these distortions forms of voltages and currents electronic, allowed to characterize uniquely both discharges as the multipactor, which greatly facilitates their research and selection of methods for removal. Results of the investigations extend knowledge of the conditions of development and control of multipactor processes in high- Q ($Q_0 \gg 1$) resonator structures, which is essential for provision constancy in time characteristics of a linear ion accelerator.

Key words: accelerating gap resonator structure, exponential change in RF oscillations in time, secondary electron emission, dangerous multipactor discharge.

Л. Д. Лобзов, Н. Г. Шуліка, В. Ф. Коваленко,
В. Н. Белан, О. Н. Шуліка,
А. П. Подоляк, Л. Н. Макарова

МУЛЬТИПАКТОРНІ РОЗРЯДИ
В ЗАЗОРАХ ПРИСКОРЮЮЧОГО КАНАЛУ
ТА ІНШИХ ОБЛАСТЯХ
РЕЗОНАТОРНОЇ СТРУКТУРИ ЛІНІЙНОГО
ПРИСКОРЮВАЧА ІОНІВ

Мультипакторні розряди, що супроводжуються розмноженням електронів вторинно-електронної емісії (ВЕЕ), досягаючи електронного замикання електродів лінійного прискорювача іонів (ЛПІ), – небажані явища, що вимагають їх обов'язкового усунення. Замикання можливі й між електродами інших його проміжків. Однак у науковій літературі відсутні відомості, що вказують на порушення характеристик прискорювача, спотвореного розрядами в різних його областях. У таких випадках візуально виявляють області розрядів за межами прискорюючого каналу й усувають їх. Якщо й після

цього в його зазорах відбуваються електронні замикання електродів, то їх усувають відомими доступними методами. У даному дослідженні використано сучасну схему збудження прискорювача двома ідентичними ВЧ-джерелами з незалежними позитивними зворотними зв'язками. Їх спільна робота на одне й те ж резонансне навантаження (основної або збуреної частоти) дозволяє забезпечувати в ній як стійке збудження ВЧ-напруг, так і заглушення мультипакторних процесів і розрядів. На практиці це підтверджується тим, що при малих величинах напруг і, відповідно, на передньому і задньому фронтах імпульсу струму ВЕЕ, присуття лише ініціація розмноження електронів (мультипакторні сплески). Однак і така стійка робота прискорювача була несподівано порушена грубими спотвореннями імпульсів напруг і струмів ВЕЕ. Огляд середини структури показав, що там відбуваються інтенсивні світлові розряди в різних областях прискорювача – на вході та на його периферії. На вході – це розрахунковий зазор довжини 1,353 см з ділянками паралельних торцевих поверхонь перших трубок дрейфу. На периферії – це паразитна щілина $\sim 0,1...0,2$ мм (виміряна при розкритому вакуумному кожусі), що утворена поверхнею структури і кінцем мідної пластини (латки, що закриває непотрібний наскрізний отвір), олов'яний приліп між якими частково сублімувався. З аналізу спотворень імпульсів контрольних напруг і загальних струмів ВЕЕ стало зрозуміло, що при цьому дотримуються основні закономірності, відповідні темі даних досліджень. Візуальний огляд світності областей розрядів і аналіз характеру спотворень форм імпульсів зазначених напруг і електронних струмів дозволили однозначно характеризувати обидва зазначених розряда як мультипакторні, що суттєво полегшує їх дослідження та вибір методів заглушення. Результати дослідження розширюють знання про умови розвитку й управління мультипакторними процесами в високочастотних ($Q_0 \gg 1$) резонаторних структурах, що є необхідним для забезпечення сталості в часі характеристик ЛПІ.

Ключові слова: прискорюючий проміжок резонаторної структури, експоненціальна зміна ВЧ-коливань у часі, вторинно-електронна емісія, згубний мультипакторний розряд.