

## УПРАВЛЕНИЕ МУЛЬТИПАКТОРНЫМИ РАЗРЯДАМИ В ВЫСОКОДОБОТНОЙ СТРУКТУРЕ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИОНОВ

Л. Д. Лобзов, Н. Г. Шулика, В. Н. Белан

*Национальный научный центр Харьковский физико-технический институт*

*1, ул. Академическая, Харьков, 61108, Украина*

E-mail: [belan@kipt.kharkov.ua](mailto:belan@kipt.kharkov.ua)

Возникновение мультипакторных разрядов в диодных промежутках линейного ускорителя ионов без систем стабилизации электродинамических параметров многоячейочной резонаторной структуры является одним из серьезных возмущающих факторов, когда невозможно достичь не только требуемых характеристик ускоряющих полей, но и устойчивых ВЧ колебаний в его системе сложно связанных колебательных контуров. При подавлении условий размножения вторичных электронов и устранения возможности нарастания их числа во времени до величин мультипакторных разрядов условия устойчивости ВЧ колебаний и работа всей системы возбуждения ускорителя в целом может быть удовлетворительной. А для многих пуско-наладочных и технологических задач на ускорителе разрешение проблемы подавления паразитных мультипакторных разрядов и достижение устойчивого характера возбуждаемых ВЧ напряжений является завершающим этапом. Экспериментально показано управление низковольтными мультипакторными процессами от максимального их влияния на установление ВЧ напряжений на элементах высокодобротной ускоряющей структуры до полного подавления размножения вторичных электронов с материала электродов и получения устойчивых электродинамических характеристик. Ил. 10. Библиогр.: 19 назв.

**Ключевые слова:** линейный ускоритель ионов, резонаторная структура, единичная ускоряющая ячейка, параллельные электродные поверхности, переменные электрические поля, вторично-электронная эмиссия, мультипакторный разряд.

С мультипакторными разрядами в линейных ускорителях заряженных частиц обычно сталкиваются при проведении пуско-наладочных работ, связанных с вводом ВЧ мощности в многоячейочную резонаторную структуру, и достижении требуемых амплитуд ВЧ полей в её ускоряющих зазорах. Во многих случаях эти работы выполняются без введённых систем общих и специальных способов стабилизации и управления параметрами ускорителя [1, 2]. При этом основной задачей испытания созданной структуры ускорителя  $E$  или  $H$ -типа и обеспечения устойчивости её электродинамических параметров является прохождение низковольтного мультипактора [3-5, 6], т. е. выбор метода управления им. Это нужно для сохранения во времени расчетных электродинамических параметров резонаторной структуры, как оконечной нагрузки ВЧ системы ускорителя, условий его согласованного возбуждения, обеспечения условий генерации ВЧ колебаний в сложно связанных контурах одно или многокаскадного усилительного канала, в элементах связей и фидерных линиях. Последующее увеличение амплитуд основных электрических полей выше номинальных и обеспечение устойчивости ВЧ генерации в линейном ускорителе также связано с резонансными вторично-электронными разрядами [7]. Их возникновение возможно в других областях резонаторных структур, где при однородных ВЧ электрических полях, необходимых резонансной электронной мультипакции в имеющихся диодных промежутках, могут быть обеспечены высокие вторично-электронные свойства материала их электродов, подвергающихся бомбардировке ис-

пускаемыми электронами, что требует разработки специальных систем, исключающих возможные аварии на ВЧ ускорителях [8].

Подавление мультипакторных разрядов - это нарушение амплитудно-фазовых условий, определяющих границы амплитуд ВЧ напряжений, прилагаемых к диодному промежутку, и фазовую устойчивость вторично-электронных процессов, повторяющихся в каждом полупериоде поля. Для диодного промежутка длины  $d$ , являющегося основным емкостным элементом высокодобротной ( $Q \gg 1$ ) единичной ускоряющей ячейки - это выход за пределы диапазона прилагаемых ВЧ напряжений, относительные амплитуды которых теоретически определяются величиной коэффициента (0,268-0,318) в интервале фаз каждого полупериода времени от 0 до  $65^\circ$  [9].

Наиболее эффективным ВЧ методом подавления мультипакторных разрядов между электродами и электродными поверхностями резонаторной ускоряющей структуры, разработанным в ИПЭНМУ ННЦ ХФТИ, является возбуждение в ней одновременно двух ВЧ электрических полей на основной частоте этой структуры. При этом параметры одного из полей зависят от паразитного воздействия резонансных вторично-электронных разрядов в резонаторе, а другого - не зависят [10]. Это обеспечивает непрерывный рост суммы их амплитуд в структуре в любом случае - при мультипакторных разрядах или без них. Реализация такого ВЧ метода осуществляется созданием в системе ускорителя двух автоколебательных контуров, образуемых независимыми положительными обратными свя-

зьями ВЧ источника с резонатором (ПОСР) и с его выходом на фидер (ПОСФ).

Основным достоинством нового метода ВЧ самовозбуждения однорезонаторного ускорителя ионов является то, что при этом полностью сохраняется картина ВЧ полей разработанной структуры, а амплитуды устанавливающихся результирующих полей при неизменных стоках и истоках электрических силовых линий определяют вторично-электронные свойства её электродов и электродных поверхностей.

В работе [11] приведены результаты исследований влияния мультипакторных разрядов на установление ВЧ колебаний многозазорного резонатора ускорителя при различных способах автоколебательного возбуждения, без систем стабилизации и автоматического регулирования. Установлено, что простые автоколебательные схемы ВЧ возбуждения высокодобротной структуры линейного ускорителя без принятия мер, уменьшающих влияние обратной реакции нагрузки на их работу, являются одновременно и схемами генерации мультипакторных процессов в однородных электрических полях между участками параллельных поверхностей его диодных промежутков, в том числе и электродов ускоряющего канала. Применение двух ВЧ полей, возбуждаемых в резонаторе ВЧ автоколебательной системой с двумя автоколебательными контурами при заданных коэффициентах их независимых положительных обратных связей, подавляя размножение вторично-электронных процессов во времени, обеспечивает квазипостоянство параметров указанных диодных промежутков и соответствующих характеристик ускорителя. В этой же статье описан механизм возникновения электронной мультипакции, генерируемой в однородных ВЧ электрических полях диодных промежутков структуры, возбуждаемой автоколебательным контуром с ПОСР, и её (мультипакции) подавления при последовательном включении второго автоколебательного контура с ПОСФ, являющегося составной частью ВЧ системы ускорителя. Но для понимания отдельных результатов, связанных с последствиями мультипакторного эффекта в высокодобротных структурах с введёнными металлическими электродами (потенциальными эмиттерами), необходимы ещё более полные аргументы того, что в указанных структурах имеют место процессы размножения вторичных электронов, достигающие во времени величин электронных разрядов, закорачивающих отдельные электроды. Это вызывает изменение параметров ускорителя - резонансной частоты и шунтового сопротивления, падение добротности и электрических полей в ускоряющих зазорах. Именно эти электронные процессы и их связь с указанными параметрами структуры во времени

определяют условия генерации ВЧ напряжений в автоколебательной системе ускорителя и существования тех же мультипакторных процессов в его единичных ячейках. Вместе с тем, управление параметрами автоколебательных контуров ВЧ системы позволяет регулировать условия возбуждения результирующих электрических полей в ускорителе, уменьшая или увеличивая количество электронов, порождаемых при бомбардировке ими электродов. То есть, изменением параметров автоколебательного контура, в котором условия ВЧ генерации не зависят от влияния возникающих возмущающих факторов в резонаторной структуре, можно управлять её результирующими напряжениями и, соответственно, интенсивностью возникающих мультипакторных процессов, за счет изменяющегося коэффициента вторично-электронной эмиссии материала электродов, бомбардируемых электронами малых ( $K_{вээ} > 1$ ) или больших ( $K_{вээ} < 1$ ) энергий.

В работе экспериментально изучены искажения импульсов ВЧ напряжений высокодобротной ускоряющей структуры, возмущенной мультипакторными разрядами при управлении ими регулированием результирующих амплитуд ВЧ полей, возбуждаемых двумя независимыми ВЧ напряжениями близких или равных частот. Исследуются также электродинамические параметры резонаторной структуры линейного протонного ускорителя и вторично-электронных токов, образующихся в устойчиво нарастающих или спадающих ВЧ электрических полях диодных промежутков его единичных ячеек, возбуждаемых новым ВЧ методом.

**1. Исследование электродинамических параметров ВЧ ускоряющей структуры с мультипакторными свойствами.** Исследование резонаторных характеристик ускоряющей структуры проводилось на однорезонаторном ускорителе ионов при регулировании основных параметров двух автоколебательных контуров с независимыми положительными обратными связями, определяющих амплитудно-фазовые условия генерации соответствующих уровней мощностей общим ВЧ энергетическим источником. При этом изменялись фазовые соотношения по кольцевым цепям ВЧ автоколебаний и амплитуд напряжений, характеризующих коэффициенты положительных обратных связей в каждом из контуров.

Структурная схема однорезонаторного линейного ускорителя с мультипакторными свойствами, возбуждение которого образовано двумя ВЧ напряжениями близких или равных частот, непосредственно суммируемых в высокодобротной структуре и соответственно в её единичных ячейках с осевыми ускоряющими зазорами, представлена на рис. 1.

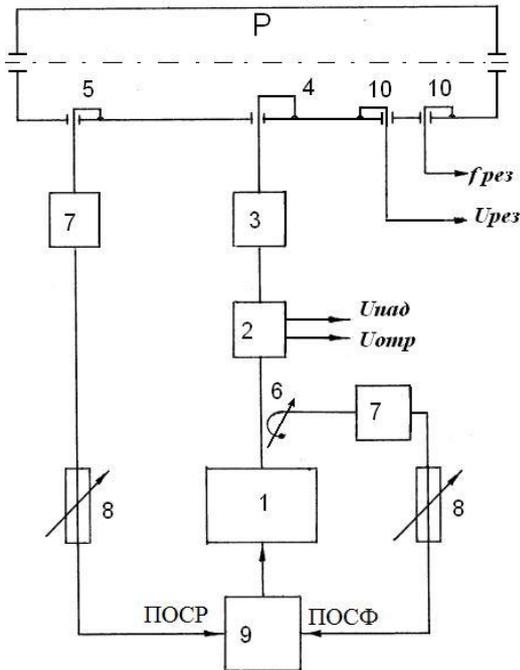


Рис. 1. Структурная схема резонантной структуры линейного ускорителя ионов, возбуждаемого ВЧ автоколебательной системой с двумя автоколебательными контурами, образуемыми независимыми положительными обратными связями ВЧ источника с фидером и с резонатором. Р - резонатор малогабаритного линейного ускорителя ионов  $H$ -типа; 1 - трехкаскадный канал усиления ВЧ мощности; 2 - рефлектометр фидерный; 3 - коаксиальное устройство согласования входного сопротивления резонатора и волнового сопротивления фидера; 4 - мощный ВЧ ввод; 5 - элемент положительной обратной связи входа усилительного канала с резонатором ускорителя; 6 - элемент положительной обратной связи входа и выхода усилительного канала, установленный в фидере; 7 - аттенюатор; 8 - фазовращатель коаксиальный; 9 - мост сложения ВЧ напряжений; 10 - петля измерительная

Трехкаскадный ВЧ усилительный канал 1, коэффициент усиления которого выбран, исходя из обеспечения требуемого уровня номинальных амплитуд ускоряющих полей для линейного ускорителя протонов или дейтронов, охвачен двумя положительными обратными связями с установленными элементами 5 в ПОСР и 6 в ПОСФ.

Регулирование амплитудных и фазовых соотношений в кольцевых цепях указанных автоколебательных контуров обеспечивается аттенюаторами 7 и фазовращателями коаксиальными 8. Контроль режима передачи мощности в ускоритель осуществляется с помощью измерительных элементов 10, установленных в резонаторе, а также измерениями амплитуд напряжений падающей и отраженных волн как в фидерном тракте ускорителя с помощью рефлектометров фидерных 2, так и в цепях положительных обратных связей автоколебательных контуров (на схеме не указаны). Размеры петли 5 автоколебательного контура ПОСР, установленной у поверхности цилиндрического резонатора, были выбраны, ис-

ходя из минимально вносимого возмущения ВЧ электрических полей и общего магнитного потока, часть которого пронизывает площадь этой петли. Размеры петли 6 и степень связи с ВЧ полями фидера выбраны из условий обеспечения требуемых амплитуд напряжения положительной обратной связи в контуре ПОСФ и минимальном возмущении параметров фидера.

Ускоряющая структура Р, представляющая собой высокочастотную ( $Q_0 \approx 5000$ ) резонансную структуру ( $f_{рез} \approx 100$  МГц) для ускорения ионов, на которой проводились исследования, описана в работе [11]. Торцевые поверхности трубчатых электродов определенной длины, выполняющие одновременно и экранировку пролетающих ускоренных частиц от тормозящих электрических полей, образуют 16 параллельно соединенных ускоряющих зазоров структуры на  $\pi$ -волне, по оси которых могут ускоряться инжектируемые пучки протонов. Мультипакторные процессы образуются в однородных электрических полях между участками плоскопараллельных поверхностей торцов этих электродов, подвергающихся взаимной бомбардировке электронами, эмитируемых при соответствующих направлениях электрических силовых линий между ними. Длины первого и второго зазоров равны 1,353 см и 1,753 см, длины предпоследнего и последнего зазоров - 6,120 см и 6,422 см. Расчетная амплитуда напряженности электрического поля, усредненная по зазорам, равна 60 кВ/см. В первом и последнем зазорах указанная напряженность равна 30 кВ/см (коэффициент поля этих зазоров равен 0,5). Посчитанный диапазон малых амплитуд напряжений, прилагаемых к электродам первого диодного промежутка, при которых возникают мультипакторные разряды в одном из зазоров высокочастотного резонатора, находится в пределах (100-105)В.

Исследование влияния контуров с номинальными напряжениями положительных связей на резонансную частоту ускорителя и КСВ в фидере проводилось при сравнении ВЧ возбуждения от задающего генератора (ЗГ) с предварительным усилителем (ПУ) на 200 Вт.

В пределах точности измерений  $\pm 5$  кГц частота ускорителя не изменяется при подключении вместо ЗГ с ПУ указанных контуров, что и подтверждает отсутствие их влияния на его электродинамические характеристики.

Соотношения амплитуд ВЧ напряжений, генерируемых контурами ПОСР и ПОСФ, выбирались из условия обеспечения устойчивости характеристик линейного ускорителя в динамическом режиме при подавленных мультипакторных разрядах и величине результирующих ускоряющих полей, определяемых контрольной амплитудой номинального напряжения в резонаторе. Это

необходимо для автоматического предотвращения разрушительного воздействия перенапряжений в системах ускорителя, если в них возникнут любые быстро нарастающие возмущения, резко ухудшающие согласование в цепях. Мощность, отбираемая при этом из резонатора, составляет единицы процентов от мощности, вводимой в ускоритель.

Изменение фаз положительных обратных связей в каждом из контуров позволяет регулировать режимы бегущих волн как в тракте возбуждения ВЧ канала, так и в передающем фидере. При этом амплитуды падающих и отраженных волн характеризуют не только условия согласования входного сопротивления резонатора с волновым импедансом фидера, но и уровень номинальной мощности, поступающей в структуру. Для протонов амплитуда контрольного ВЧ импульса резонатора  $U_{\text{рез ном}} = 8,5 \text{ В}$ , для дейтронов  $U_{\text{рез ном}} = 17 \text{ В}$ .

На рис. 2 представлены осциллограммы основных контрольных напряжений резонаторной структуры, характеризующих устойчивое возбуждение резонансного ускорителя ВЧ автоколебательной системой с двумя автоколебательными контурами. На рис. 3 представлены осциллограммы выходного напряжения частотного смесителя, схемы измерения с помощью измерительного генератора, основной частоты ускорителя, возбуждаемого указанным ВЧ методом. Детальный анализ фронта ВЧ импульса напряжения с частотного смесителя, от частоты биений  $\Delta f = 60 \text{ кГц}$  (а) с последующим уменьшением частоты биений до  $\Delta f = 40 \text{ кГц}$  (в) не обнаруживает быстрых изменений частоты ускорителя. Постоянная длительность периода биений указывает на то, что в такой резонансной системе ВЧ самовозбуждения резонаторной структуры существует только одна частота - основная частота линейного ускорителя.

Требуемая величина напряженности поля на оси резонаторной ВЧ структуры устанавливается амплитудой высоковольтного напряжения модулирующего импульса при настроенных амплитудных и фазовых соотношениях в кольцевых цепях контуров ПОСР и ПОСФ. Степень общего согласования входного сопротивления резонаторной структуры с волновым сопротивлением фидера, контролируемого минимумами величины амплитуды отраженной волны и коэффициента стоячей волны в тракте, совместно с измерением основных параметров  $U_{\text{рез}}$  и  $f_{\text{рез}}$ , позволяют поддерживать резонансные характеристики ускорителя в ручном режиме. Наличие в системе возбуждения линейного ускорителя двух ВЧ автоколебательных контуров определяют его устойчивую работу как в режиме эффективных ВЧ «тренировок» резонатора, так и при ускорении заряженных ионов.

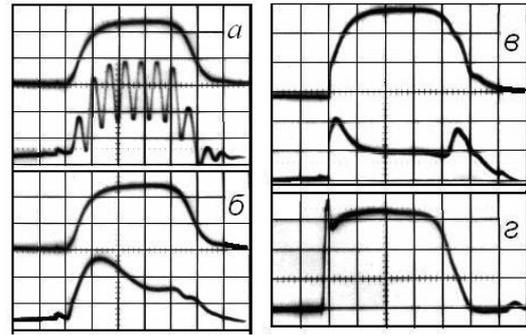


Рис. 2. Осциллограммы контрольных напряжений линейного ускорителя ионов, характеризующие устойчивость его электродинамических параметров. Масштаб по горизонтали - 50 мксек/дел; (а), (б) - амплитуды напряжений с резонатора  $U_{\text{рез}}$  (верхние) и с частотного смесителя  $U_{\text{см}}$  (нижние) при величинах частотных отстроек равных 20 кГц (а) и нулю (б). Масштаб:  $U_{\text{рез}}$  - 5 В/дел;  $U_{\text{см}}$  (а, б) - 0,5 В/дел; (в)-амплитуды контрольных напряжений падающей  $U_{\text{пад}}$  (верхняя) и отраженной  $U_{\text{отр}}$  (нижняя) волн в фидере. Масштаб:  $U_{\text{пад}}$  - 10 В/дел;  $U_{\text{отр}}$  - 5 В/дел; (г) - амплитуда модулирующего напряжения выходного каскада, ВЧ системы ускорителя. Масштаб:  $U_{\text{мод}}$  - 5 В/дел

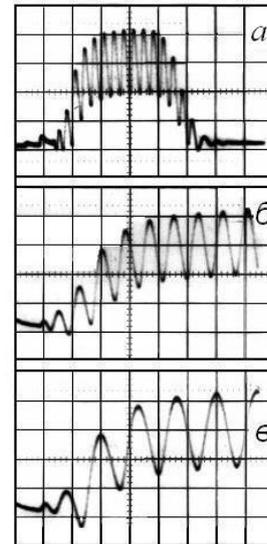


Рис. 3. Осциллограммы переднего фронта импульса выходного напряжения ВЧ смесителя, при разных масштабах развертки осциллографа и величинах частотных отстроек измерительного генератора от основной частоты резонансной структуры ускорителя. а) - масштаб по горизонтали 50 мкс/дел,  $\Delta f = 60 \text{ кГц}$ ; (б), (в) - масштаб по горизонтали 20 мкс/дел,  $\Delta f = 40 \text{ кГц}$ (б); 40 кГц(в)

В настроенной таким образом ВЧ автоколебательной системе многозарядного ускорителя протонов и были проведены эксперименты по управлению мультипакторными процессами.

Напряжение на индуктивной петле  $6 U_{\text{посф}}$  регулировалось путем изменения угла поворота её плоскости относительно магнитных силовых линий фидера от параллельного её расположения, принимаемого за исходное ( $0^\circ$ ), до перпендикулярного ( $90^\circ$ ). Это позволяет определять коэффициент наво-

димого на петле напряжения, пропорционально синусу этого угла, от  $U_{\text{посф}} = 0$  до  $U_{\text{посф}} = U_{\text{посф ном}}$ . При этом обеспечивается перестройка частоты резонатора, возмущаемого мультипакторными разрядами, до его основной частоты [11].

Изменение результирующего напряжения в резонаторе при вращении петли 6 из одного крайнего положения в другое ( $0^\circ$ - $90^\circ$ - $0^\circ$ ) и соответственно коэффициента положительной обратной связи ВЧ источника с фидером, определяют характер (нарастающих или спадающих) вторично-электронных процессов, происходящих в ВЧ электрических полях ускоряющих зазоров. При этом представляет интерес выявление искажений формы ВЧ импульсов резонатора, реально фиксируемых измерительной аппаратурой.

В случае резонатора, расстроенного мультипакторными разрядами, вращение петли 6 от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  (подавление мультипактора) позволяет наблюдать реальные искажения импульсов ВЧ напряжений резонатора от амплитуды  $U_{\text{посф}} \approx 0,34U_{\text{посф ном}}$  и полностью восстановленных форм импульсов при  $U_{\text{посф}} \approx 0,94U_{\text{посф ном}}$  (коэффициенты 0,34 и 0,94 - синусы углов поворота петли  $20^\circ$  и  $70^\circ$ ). В случае устойчивых параметров структуры и полностью подавленной мультипакции обратное вращение петли 6 от  $90^\circ$  до  $0^\circ$  (т. е. снова к мультипактору) позволяет наблюдать реальные искажения ВЧ импульсов резонатора от  $U_{\text{посф}} \approx 0,55U_{\text{посф ном}}$  до  $U_{\text{посф}} \leq 0,225U_{\text{посф ном}}$  (0,225 и 0,55- синусы углов  $13^\circ$  и  $33^\circ$  соответственно). При параллельной ориентации петли 6 относительно магнитных полей фидера и  $0^\circ$  к ним регистрация контрольных напряжений резонатора (максимально искаженных мультипакторными разрядами, возбуждаемых только автоколебательным контуром ПОСР) не возможна из-за малости общих амплитуд, возбуждаемых в генераторной системе ВЧ ускорителя.

Таким образом, управление мультипакторными разрядами и устойчивостью возбуждения высокочастотной ускоряющей структуры обеспечивается одновременной генерацией в резонаторе двух ВЧ напряжений, результирующая величина которых управляется регулированием напряжения положительной обратной связи (коэффициента обратной связи) автоколебательного контура ПОСФ, являющегося составной частью ВЧ ускорителя. При этом анализ искажений установления ВЧ полей резонаторной структуры во времени позволяет судить о характере размножения вторичных электронов, участвующих в мультипакторных процессах. Устойчивое установление ВЧ полей в ускорителе обеспечивает эффективную тренировку эмиссионных свойств материала электродных поверхностей и быстрое достижение номинальных амплитуд ускоряющих

полей. При этом в любой момент времени ВЧ возбуждение резонаторной структуры может быть переведено на генерацию мультипакторного эффекта и исследования отличительных свойств возмущений, вносимых в колебательную систему резонансного ускорителя. Отсутствие здесь любых других методов изменения электродинамических характеристик структуры и собственных вторично-электронных свойств материала, из которого она изготовлена, кроме указанного ВЧ воздействия, очевидно.

На рис. 4 представлена последовательность осциллограмм результирующих ВЧ напряжений однорезонаторной многоячеечной ускоряющей структуры, показывающая реальные искажения формы и длительности ВЧ импульсов, вызываемых генерацией паразитных мультипакторных процессов в отдельных диодных промежутках, при фиксированном изменении от нуля до номинальной амплитуды сигнала положительной связи в контуре с ПОСФ и неизменных его фазовых соотношениях. Управление искажениями импульса ВЧ напряжения резонатора от  $U_{\text{рез мин}}$  (определяемых амплитудами ВЧ напряжений возникновения мультипакции) до  $U_{\text{рез ном}}$  (без мультипакторных разрядов) позволяет утверждать, что при этом осуществляется управление числом выхода вторичных электронов, определяющих их последующее размножение.

При параллельной ориентации петли связи ПОСФ относительно магнитных линий фидера и малых, до  $20^\circ$ , наклонах к ним величины наводимых напряжений на этой петле, как указано выше, очень малы (в резонаторе мультипактор, величина электронного возмущения которого и определяет амплитуды возбуждаемых в нём напряжений). Поэтому осциллограмма с минимальной результирующей амплитудой напряжения в резонаторе, генерируемом контуром с ПОСР, предшествующая рис. 4, а, при выбранной для всех контрольных сигналов одинаковой чувствительности осциллографа не приводится, поскольку почти совпадает с линией развёртки электронного луча. Это подтверждается также "холодными" измерениями резонансных характеристик и распределения амплитуд электрических полей по зазорам структуры, падающих до величин вблизи нуля при коротком замыкании соседних трубок дрейфа металлическими проводниками [12].

Эти разряды, наблюдаемые визуально по свечению в первых зазорах многозазорного ускоряющего канала, генерируемые ВЧ автоколебательной системой с одной положительной обратной связью ПОСР (при напряжении на элементе 6  $U_{\text{посф}} \approx 0$ ) имеют условия резонансного развития в собственных электрических полях структуры и её ускоряющих зазорах. По мере увеличения на петле 6 напряжения положительной обратной связи в

контуре с ПОСФ выше  $U_{\text{посф}} \approx 0,34U_{\text{посф ном}}$ , механизм развившихся низковольтных мультипакторных разрядов нарушается. При этом появляются ВЧ импульсы напряжений резонатора с начальным временем задержки возбуждения  $t_3$  и изменяющихся амплитудах по длительности ВЧ импульса. Как следует из рис. 4,а - 4,в при увеличении амплитуд напряжений  $U_{\text{посф}}$  выше указанного  $t_3 \leq 50$  мкс.

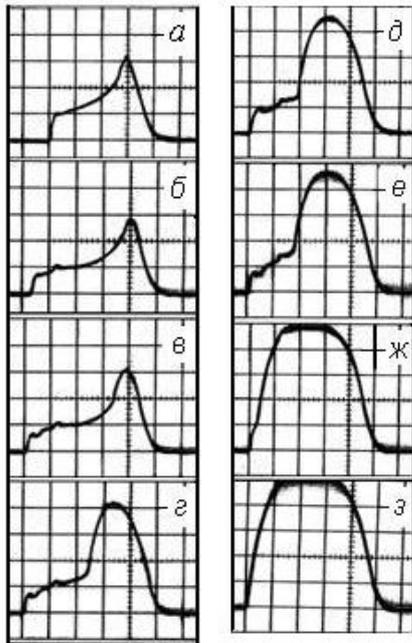


Рис. 4. Осциллограммы установления результирующих амплитуд импульсных ВЧ напряжений в резонаторе протонного ускорителя, возмущенного мультипакторными процессами и разрядами, при номинальных параметрах амплитуды и фазы автоколебаний в контуре с ПОСР и регулировании амплитуды напряжения положительной обратной связи на элементе связи контура с ПОСФ. (а)-(ж): - амплитуды результирующих напряжений резонатора, определяемые напряжениями положительной обратной связи в контуре ПОСФ, при вращении петли в фидере от  $20^\circ$  до  $70^\circ$ ; (з) - амплитуда напряжения резонатора при вращении петли в фидере от  $70^\circ$  до  $90^\circ$ . Масштаб по горизонтали - 50 мкс/дел;  $U_{\text{рес}}$  - 2 В/дел

На этих осциллограммах ВЧ напряжений резонатора также отчетливо видны отличительные признаки их неустойчивого установления, обусловленные подавлением мультипакции. Это подтверждается теорией мультипакции в диодном промежутке единичной ускоряющей ячейки [9] указывающей, что нарушение амплитудных и фазовых диапазонов мультипакции сопровождается физическим убыванием электронов из разряда. При этом происходит переходной процесс улучшения параметров структуры и увеличения амплитуд результирующего напряжения, характеризующихся изменением формы и длительности фронтальной ступени ВЧ импульса резонатора [13-14]. Мультипакторные процессы продолжа-

ются, но с уменьшающимся числом испускаемых вторичных электронов.

По окончании стола указанных ВЧ импульсов, когда скорость падения амплитуд результирующего напряжения максимальна, мультипакция лишается резонансных условий развития, т. е. подавляется, переходя в полевую электронную нагрузку резонатора в электрических полях с экспоненциально изменяющимися во времени амплитудами. А для продолжающихся переходных процессов в динамически устойчивом резонаторе ускорителя обеспечивается затухание ВЧ колебаний.

С последующим увеличением коэффициента связи в контуре с ПОСФ и увеличением амплитуд электрических полей в зазорах подавление мультипакции продолжается с сокращением длительности искажений фронта, уменьшая и величину возмущения параметров структуры, что и следует из результирующих импульсов ВЧ напряжений рис. 4,г - 4,ж.

При амплитуде напряжения обратной связи в контуре с ПОСФ, определяемой соотношением  $U_{\text{посф}} \geq 0,94U_{\text{посф ном}}$ , условия мультипакции нарушаются полностью, что и следует из осциллограммы рис. 4,з, а устойчивость установления импульсных ВЧ напряжений в резонаторе определяется его реальными медленно изменяющимися в динамическом режиме параметрами.

По мере достижения номинального напряжения обратной связи на петле в фидере до величины  $U_{\text{посф ном}}$  результирующее напряжение в резонаторе становится все менее зависимым от быстрых электронных процессов в его диодных промежутках. При этом постоянство амплитуд результирующих ВЧ напряжений в промежутках с параллельными поверхностями, необходимое для условий мультипакции при коэффициенте вторично-электронной эмиссии материала электродов больше единицы, нарушается с самого начала нарастания ВЧ возбуждения в каждом контуре. А механизм размножения мультипакторных электронов подавляется с начала их возникновения в каждой половине ВЧ периода поля. Энергия других вторичных электронов, приобретаемая в ВЧ электрических полях с непрерывно увеличивающейся амплитудой, при этом различна и соответственно бомбардировка ими не может обеспечить во времени процессов размножения электронов из-за  $K_{\text{вэз}} < 1$ . Различно также и вызываемое ими энергетическое возбуждение участков поверхностей, подвергающихся бомбардировке электронами разных энергий. При этом выход электронов в вакуум, в течение времени каждого полупериода ускоряющих ВЧ электрических полей с синусоидально изменяющимися амплитудами, мультипакторных разрядов не образует. ВЧ энергия, рассеиваемая этими вторичны-

ми электронами, характеризует в каждый момент времени активные потери ускоряющей структуры и соответственно величину ее динамической добротности во всем диапазоне амплитуд возбуждаемых ВЧ полей. При этом форма ВЧ импульса резонатора линейного ускорителя не содержит каких-либо признаков возмущения его электродинамических параметров.

На рис. 5 представлена зависимость времени задержки  $t_3$  установления амплитуд результирующих полей в начальной части ВЧ импульса, от величины сигнала положительной обратной связи из фидера  $U_{\text{посф}}$ , выраженного в относительных единицах напряжения. На рис. 6 представлена зависимость скорости нарастания фронтальной ступеньки импульса ВЧ напряжения резонатора, пропорциональной тангенсу угла подъема фронта, при тех же указанных напряжениях положительной обратной связи  $U_{\text{посф}}$ .

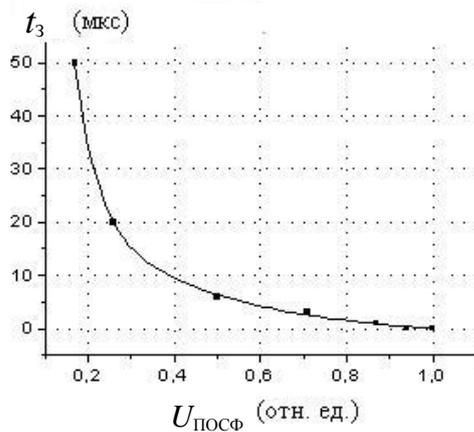


Рис. 5. Зависимость времени  $\tau_3$  установления начальных напряжений в резонаторе с мультипакторными разрядами от величины амплитуды напряжения  $U_{\text{посф}}$ .

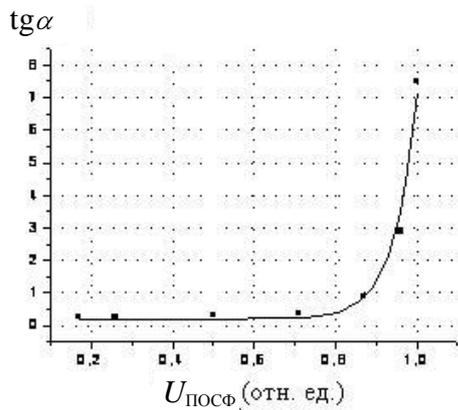


Рис. 6. Зависимость скорости фронта импульса ВЧ напряжения резонатора с мультипакторными разрядами от амплитуды напряжения  $U_{\text{посф}}$ .

Управление мультипакторными процессами в ускоряющей структуре возможно также и

при переходе от устойчивой электронной нагрузки и высоких амплитуд ускоряющих полей к вторично-электронным разрядам, искажающим установление возбуждаемых импульсов ВЧ напряжений в структуре, задаваемой величиной изменения её динамических характеристик развившейся интенсивностью разряда.

При обратном регулировании коэффициента обратной связи и уменьшении напряжения на петле 6 от максимальной величины (соответствующей углу положения петли  $90^\circ$ ) до величины приближающейся к нулю (угол поворота петли приближается к  $0^\circ$ ), вид искажений ВЧ импульсов напряжения резонатора (рис. 4,з - а) может повторяться, но при особенных условиях. Это проявляется в том, что при быстром переходе (в течение смены) от динамически устойчивой электронной нагрузки к мультипактору, реально влияющему на характеристики резонатора ускорителя, первая фронтальная ступенька (рис. 4,ж) появляется при установке петли 6 от  $90^\circ$  до  $33^\circ$ , т. е. при  $U_{\text{посф}} \approx 0,55 U_{\text{посф ном}}$ . А импульс контрольного ВЧ напряжения резонатора возмущенного вторично-электронными (мультипакторными) разрядами, реально исчезает с экрана осциллографа (при ранее установленной его чувствительности), когда угол поворота петли 6 доводится до  $13^\circ$ , т. е. при  $U_{\text{посф}} \leq 0,225 U_{\text{посф ном}}$ .

При продолжительных периодах (порядка нескольких месяцев) устойчивого возбуждения ускоряющей структуры новым ВЧ методом, что может характеризоваться как длительной эффективной ВЧ «тренировкой» эмиссионных свойств её электродов и электродных поверхностей, уменьшение напряжения на петле 6 приводит к мультипактору непосредственно при её положении  $\sim 13^\circ$  без искажений ВЧ импульса, показываемых на рис. 4,ж - а. Это указывает на то, что пока не появятся необходимые условия для возникновения мультипакторных процессов при уменьшении выходного напряжения, генерируемого контуром ПОСФ, и соответствующем уменьшении результирующих амплитуд в начальной части ВЧ импульса резонатора, вторично-электронный разряд в структуре не возникает.

Таким образом, экспериментально показано, что обеспечение непрерывного нарастания результирующих амплитуд ВЧ полей в ускоряющих зазорах многоячеечной высокодобротной структуры, возмущенной электронными мультипакторными разрядами, обеспечивает управление интенсивностью этих разрядов до полного их перехода во вторично-электронную нагрузку, определяемую картиной распределенных электрических полей по объёму структуры ускорителя.

**2. Измерение токов вторичных электродов с электродов предпоследних зазоров ускорителя.** Первые результаты исследований

вторичной электронной нагрузки в возбуждаемых ВЧ полях однорезонаторной структуры  $H$ -типа с параллельно подключенными ускоряющими зазорами малогабаритного линейного протонного ускорителя на энергию  $W = 1,5$  МэВ, опубликованы в работах [15, 16].

В этих работах показано, что вторично-электронная нагрузка в динамически устойчивой [17] вакуумированной ускоряющей структуре - это наличие в её ВЧ полях, эмитируемых с электродов и электродных поверхностей, продольных и радиальных потоков электронов разных энергий, в том числе и электронов, энергии которых соответствуют амплитудам полей в зазорах. Указанные результаты получены в устойчиво возбуждаемой резонаторной структуре ( $f_{\text{рез}} \approx 150$  МГц) со стабилизацией её электродинамических параметров как за счет использования в автоколебательных цепях противофазных ВЧ напряжений [17], так и за счет большого коэффициента усиления энергетического источника ( $K_y > 10^6$ ), усиливающего и малые амплитуды ВЧ напряжений положительной обратной связи из резонатора при прохождении мультипакции. При этом стабилизация динамических характеристик структуры [18] обеспечивает компенсацию в колебательной системе резонансного ускорителя любых возмущений, в том числе и за счет резонансных электронных процессов, обусловленных эмиссионными свойствами материала электродов с параллельными поверхностями.

Вместе с этим представляет интерес исследование вторично-электронной нагрузки в ускоряющих зазорах резонаторной структуры, возбуждаемой новым ВЧ способом, без известных систем стабилизации электродинамических параметров, но при подавленных мультипакторных разрядах, во всем диапазоне достижимых амплитуд возбуждаемых ВЧ электрических полей от оси к периферии структуры [10].

На рис. 7 приведены осциллограммы сигналов соответствующих амплитудам контрольных результирующих ВЧ напряжений в резонаторе  $U_{\text{рез}}$  (верхние), и вторично-электронных токов  $I_{\text{вээ}}$  (нижние). Нижние осциллограммы представляют собой импульсы токов вторичных электронов, испускаемых с тех поверхностей предпоследних ускоряющих диодных промежутков, которые обращены к выходу ускорителя. Из анализа осциллограмм следует, что с ростом результирующих амплитуд полей в резонаторе в интервале  $\sim(0,5 - 1,5)U_{\text{рез ном}}$ , устойчиво возбуждаемых двумя автоколебательными контурами с общим ВЧ источником, токи вторичных электронов имеют сложный характер изменения.

В начале и конце ВЧ импульсов результирующих напряжений малых амплитуд, в резо-

наторе имеются и малые токи вторичных электронов (указаны стрелками), характеризующие инициацию низковольтной электронной мультипакции, которая возникает одновременно во всех параллельно соединенных зазорах ускоряющего канала ускорителя и не имеет условий развития в многоактный процесс паразитного вторично-электронного разряда.

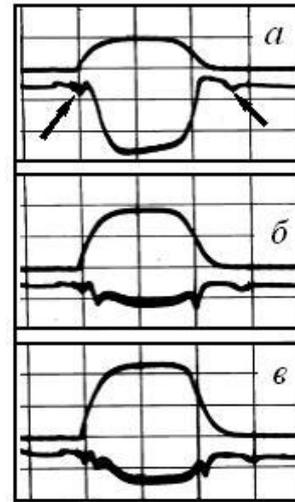


Рис. 7. Осциллограммы вторично-электронных токов на выходе резонатора линейного ускорителя, при инициации мультипакции в ВЧ электрических полях с медленно изменяющимися амплитудами. Масштаб по горизонтали - 100 мкс/дел;  $U_{\text{рез}}$  - 5 В/дел;  $I_{\text{вээ}}$  - 20 мкА/дел

При малых амплитудах напряжений и малой величине динамически устойчивой электронной нагрузки, высокая добротность резонаторной структуры изменяется мало. Но с увеличением амплитуд возбуждаемых напряжений в резонаторе увеличивается и величина этой электронной нагрузки, т. е. увеличиваются активные потери и соответственно еще более уменьшается добротность резонатора. Меньшее или большее увеличение динамической добротности высокодобротного резонатора и соответственно скорости нарастающего ВЧ возбуждения на приведенных осциллограммах рис. 7 с подавленными мультипакторными процессами показывает отсутствие их искажающего влияния на характеристики резонаторной структуры.

Длительность импульсов указанных низкоэнергетических вторично-электронных токов по основанию  $\sim 10$  мкс. Их возникновение во времени на переднем фронте импульсов ВЧ напряжений, совпадает для всех указанных осциллограмм. А на заднем фронте время их возникновения связано с длительностью расходования запасенной энергии в резонаторе и достижении требуемых малых величин амплитуд напряжений мультипакции, прилагаемых к ускоряющим зазорам. То есть, чем больше амплитуда напряжения,

с которого на заднем фронте начинается процесс его собственного спада, тем более длительное время необходимо для установления в резонаторе тех малых амплитуд напряжений, которые обеспечивают инициацию низковольтных мультипакторных процессов между участками параллельных поверхностей диодных промежутков с заданными длинами ускоряющих зазоров.

Идентичные осциллограммы (измеренные аппаратурой с высоким временным разрешением) контрольных амплитуд ВЧ напряжений резонатора (нижние) вблизи номинальных величин и общих токов паразитной вторично-электронной нагрузки (верхние) с предпоследних ускоряющих зазоров структуры ускорителя представлены на рис. 8. Вторично-электронные свойства электродных поверхностей при этом характеризуются их материалом (высококачественная медь) при типичных условиях ежедневных ВЧ «тренировок». Как следует из осциллограмм, величины токов динамической вторично-электронной нагрузки, определяются электронами относительно малых и больших энергий, ускоренных при соответствующих по импульсу амплитудах ВЧ напряжений.

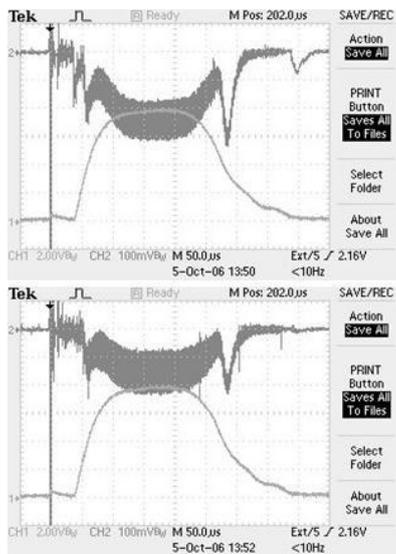


Рис. 8. Парные осциллограммы токов паразитной нагрузки с предпоследних ускоряющих зазоров (верхние кривые -  $I_{взз}$ ) и устойчиво возбуждаемых амплитуд ВЧ напряжений (нижние кривые -  $U_{рез}$ ) в резонаторной структуре линейного ускорителя ионов. На верхней паре - ток общей электронной нагрузки, измеренный цилиндром Фарадея на выходе ускорителя; на нижней - указанный ток электронной нагрузки, измеренный цилиндром Фарадея после прохождения алюминиевой фольги толщиной 5 мкм

На верхней паре осциллограмм при низких амплитудах ВЧ напряжений на переднем и заднем фронтах, возбуждаемых в резонаторной структуре, и соответственно медленных переходных процессах и малых величинах электрических

полей в ускоряющих зазорах на импульсе тока вторичных электронов также отчетливо видны инициируемые во времени низковольтные мультипакторные процессы.

Поскольку необходимые амплитуды ВЧ полей в ускоряющих зазорах, обеспечивающие развитие мультипакторных процессов при спадающем напряжении в резонаторе достигаются по мере расходования ВЧ энергии, запасенной в структуре, то эта часть быстро протекающей во времени резонансно размножающейся электронной нагрузки возникает (генерируется) отдельно от основной части токового импульса. Это позволяет проводить ее однозначную диагностику с помощью алюминиевых мишеней, устанавливаемых на пути движения электронов. Толщина мишени выбирается таким образом, чтобы одни электроны, теряя часть энергии, преодолели это торможение и продолжили своё дальнейшее движение, а другие в этой мишени поглощались, отдав полностью энергию, приобретённую в электрических полях.

На нижней осциллограмме общего токового импульса рис. 8 низкоэнергетические электронные всплески (на переднем и заднем фронтах ВЧ импульса резонатора) отсутствуют по причине полного поглощения в материале мишени - алюминиевой фольге толщиной 5 мкм, устанавливаемой перед цилиндром Фарадея.

Приведенные осциллограммы являются экспериментальным подтверждением элементарной теории мультипакторного движения электронов с низкими энергиями между поверхностями диодных промежутков с малыми расстояниями при приложенных к ним экспоненциально изменяющихся амплитудах нарастающих или спадающих ВЧ напряжений, возбуждаемых в высокочастотной ускоряющей ячейке [12].

В условиях возбуждения резонаторной структуры новым ВЧ методом были проведены измерения импульсов вторично-электронных токов в зависимости от амплитуд устанавливаемых ВЧ напряжений, почти вдвое превышающих номинальное напряжение резонатора, что необходимо для создания в резонаторной структуре ВЧ полей, ускоряющих дейтроны. Увеличение контрольных напряжений резонатора до  $U_{рез} \approx (15 - 16) В$  также осуществлялось поднятием амплитуд напряжений на анодах генераторных ламп усилительного канала.

На рис. 9 приведены осциллограммы импульсов вторично-электронных токов, измеренных на выходе резонатора цилиндром Фарадея, представляющие общий характер их изменения, при увеличении амплитуд результирующих ВЧ напряжений резонатора. До амплитуд напряжений  $U_{рез} \sim 0,5 U_{рез. ном}$ , импульсы вторично-электронных токов (сверху вниз) повторяют фор-

му импульсов ВЧ напряжений резонатора (см. также рис. 7).

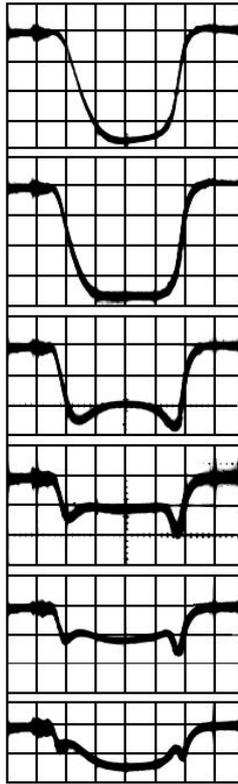


Рис. 9. Осциллограммы токов вторичных электронов на выходе ускорителя при разных амплитудах возбуждаемых ВЧ напряжений в резонаторе и подавленной мультипакции. Масштаб по горизонтали - 50 мкс/дел;  $I_{ВЭЭ}$  - 20 мкА/дел

Далее по мере увеличения амплитуд напряжений в резонаторе и напряженности электрических полей в зазорах между участками параллельных поверхностей (торцов трубок дрейфа) ускоряющей структуры центральная часть токовых импульсов уменьшается до некоторого значения, а затем вновь достигает максимальной величины и снова уменьшается. При этом на краях вторично-электронных токовых импульсов в соответствии с характером нарастания переднего и спаданием заднего фронтов ВЧ импульсов напряжения резонатора отчетливо видны характерные максимумы этих токов. Это может объясняться быстро протекающим характером изменения амплитуд электрических полей между электродными поверхностями ускоряющих промежутков и соответственно изменением величин токов, пропорциональных первым производным этих ВЧ полей во времени [19].

Уменьшение величин вторично-электронных токов, регистрируемых на выходе ускорителя, с увеличением амплитуд электрических полей в зазорах может объясняться такими величинами энергий, приобретаемых электронами в этих полях до пересечения с осью ускоряю-

щего канала, при которых они на больших скоростях пересекают ее и не захватываются продольной составляющей неоднородных электрических полей в ускоренное движение.

С целью однозначного подтверждения характера возникающих между участками параллельных поверхностей трубок дрейфа динамических вторично-электронных токов, выходящих по оси ускорителя, измерение амплитуд токовых импульсов осуществлялось в двух точках - непосредственно за резонатором ускорителя на расстоянии 200 мм от центра последнего зазора и при удалении на 700 мм.

Максимумы приведенных зависимостей вторично-электронных токов с предпоследних ускоряющих зазоров ускорителя от амплитуд ВЧ напряжений в резонаторе имеют явно выраженный характер независимости от точки измерения. Это указывает на то, что характер полученных зависимостей определяется не фокусировкой в ускоряющих зазорах, а амплитудными условиями взаимодействия испускаемых электронов с неоднородными ВЧ электрическими полями, возбуждаемыми на оси этих зазоров.

Графические зависимости амплитуд токов вторичных электронов, измеренных в средней части импульсов, в зависимости от увеличивающихся амплитуд ВЧ напряжений в резонаторе представлены на рис. 10.

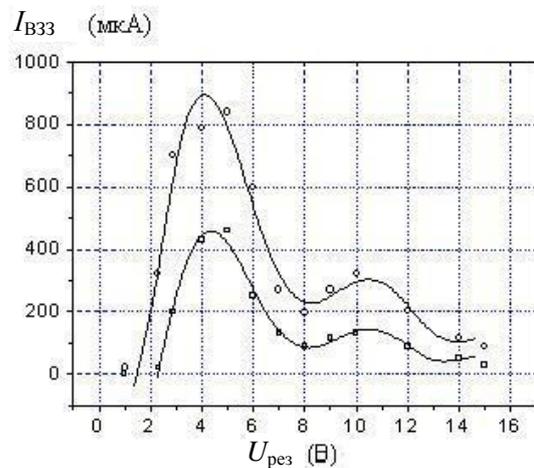


Рис. 10. Графические зависимости токов вторичных электронов  $I_{B33}$  (в средней части токовых импульсов), эмитируемых с поверхностей электродов предпоследних ускоряющих зазоров от амплитуд ВЧ напряжений  $U_{рез}$ , возбуждаемых в ускорителе:  $\circ$  - цилиндр Фарадея удален от резонатора на 200 мм;  $\square$  - цилиндр Фарадея удален от резонатора на 700 мм

По оси ординат отложены величины напряжений, измеряемых на сопротивлении  $R = 10$  кОм, при протекании токов вторично-электронной эмиссии  $I_{B33}$ , регистрируемых цилиндром Фарадея. Нижняя кривая с меньшими величинами амплитуд импульсов вторично-электрон-

ной эмиссии  $I_{вэ}$  характеризуется рассеиванием вторичных электронов на дополнительно удлиненной дистанции пролета в вакууме равной 0,5 м.

Из анализа этих зависимостей следует, что потоки вторичных электронов, на оси каждого из зазоров с заданными расстояниями между их поверхностями при увеличении амплитуд возбуждаемых ВЧ напряжений уменьшаются, а между электродами структуры и её электродными поверхностями увеличиваются. Наличие вторично-электронных токов в однородных ВЧ электрических полях между участками параллельных поверхностей ускоряющих зазоров обеспечивает непрерывно изменяющееся энергетическое возбуждение бомбардируемых областей электродов, наделяя их свойствами потенциальных эмиттеров. При этом в любое время отключения одного из контуров и приложения к этим электродам уменьшенных амплитуд ВЧ напряжений, генерируемых другим контуром, в начале всех ВЧ импульсов экспоненциально нарастающего напряжения высокодобротного резонатора автоматически возникает размножение электронов, образующих во времени мультипакторные разряды с соответствующими последствиями для всей колебательной системы ВЧ линейного ускорителя.

**Выводы.** Исследования электродинамических параметров ускорителя ионов, возбуждаемого ВЧ автоколебательной системой с двумя положительными обратными связями входа ВЧ источника с резонатором и с фидером показывают, что ВЧ метод возбуждения двух ВЧ напряжений близких частот, суммируемых в ускорителе, обеспечивает требуемые параметры ускоряющих полей и резонансные характеристики его высокодобротной структуры на основной расчетной частоте.

Экспериментально показано, что мультипакторными процессами и разрядами в высокодобротном резонаторе линейного ускорителя ионов можно управлять путем сохранения общего характера скоростей нарастания результирующих амплитуд ВЧ полей до тех собственных величин, которые определяются его медленно изменяющимися электродинамическими характеристиками, в том числе и динамически устойчивыми токами вторично-электронной нагрузки.

Показано, что устойчивые вторично-электронные процессы, образующие низкоэнергетические мультипакторные разряды, могут существовать до тех пор, пока динамическое состояние бомбардируемых ими областей не будет дополнено размноженным числом электронов с большей энергией, приобретающих её в нарастающих электрических полях с увеличивающейся скоростью их установления. А устойчивые высокоэнергетические вторично-электронные процессы без разрядов, образующие электронную нагрузку в высокодобротной резонаторной структу-

ре, могут существовать до тех пор, пока динамическое состояние бомбардируемых ими областей не будет нарушено генерацией низкоэнергетических электронов, приобретающих энергию в спадающих электрических полях малых амплитуд с уменьшающейся скоростью их установления.

Показано, что отличительные признаки установления собственных ВЧ полей в высокодобротной структуре линейного ускорителя ионов, возбуждаемого простой ВЧ автоколебательной системой, при подключении другой независимой от первой, простой ВЧ автоколебательной системы с регулируемыми параметрами генерации выходных напряжений и определяющих соответственно результирующие поля структуры, качественно характеризуют механизм управления мультипакторными процессами и разрядами.

1. *Мушин Б. П.* Стабилизация и регулирование ВЧ полей в линейных ускорителях ионов. - М.: Атомиздат. - 1971. - 334 с.
2. *Бобылёв В. И., Иванов Ю. Д., Мищенко А. Н. и др.* Линейный ускоритель ионов И-2. Система высокочастотного питания // Приборы и техн. эксперимента. - 1967. - №5. - С.34-39.
3. *Гусев Е. В., Хижняк Н. А., Шулика Н. Г. и др.* Ускоряющие Н-резонаторы с высокими электродинамическими характеристиками // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-физические исследования. - 1997. - 1, № 2, 3 (29, 30). - С.187-189.
4. *Ауслендер В. Л., Чернов К. Н., Ческидов В. Г. и др.* Статус работ по электронному ускорителю на 5 МэВ, 300кВт // Тез. докл. XIX Международ. семинар по ускорителям заряженных частиц (Алушта 12 - 18 сент. 2005 г.) Харьков. - 2005. - С.31.
5. *Венгров Р. М., Кузьмичёв В. Г., Лякин Д. А.* Применение дополнительного контура обратной связи при возбуждении резонатора ускорителя тяжелых ионов в режиме автогенерации // XVII Совещание по ускорителям заряженных частиц. Протвино. - 2000. - 1. - С.130-133.
6. *Линейные ускорители ионов. Основные системы /* Под ред. Б. П. Мурина. - М.: Атомиздат, - 1978. - 2. - 320 с.
7. *Вещеревич В. Г., Седяров В. К., Шемелин В. Д.* О подавлении вторично-электронного ВЧ разряда в вакуумированном резонаторе накопителя ВЭШП-3 // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Линейные ускорители. - 1976. - Вып.1(2). - С.77-79.
8. *Пеплов В. В., Шараментов С. И.* Система быстрого аварийного выключения мощности в каналах ВЧ питания основной части ЛУМФ // XIV Совещание по ускорителям заряженных частиц. - Протвино. - 1994. - 1. - С.256-259.
9. *Лобзов Л. Д., Шулика Н. Г., Толстолужский А. П.* К теории электронного мультипакторного разряда в вакуумированной ячейке линейного ускорителя // Вісн. Харків. Нац. ун-ту. Сер. Ядра, частинки, поля. - 2005. - №657, вып. 1(26). - С.36-46.
10. *Lobzov L. D., Shulika N. G.* Method Suppressing the Multipactoring discharges // Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Nuclear Physics Investigations (40). - 2002. - №2. - P.93 - 94.
11. *Лобзов Л. Д., Демченко П. А., Шулика Н. Г. и др.* Влияние мультипакторных разрядов на устойчивость установления автогенераторных ускоряющих полей однорезонаторного линейного ускорителя ионов // Вісн. Харків. Нац. ун-ту. Сер. Ядра, частинки, поля. - 2003. - №585, вып.1(21). - С.78-84.
12. *Лобзов Л. Д., Гусев Е. В., Шулика Н. Г.* Исследование мультипакторных разрядов в резонаторе Н-типа линейного ус-

- корителя ионов // Тринадцатое совещание по ускорителям заряженных частиц. Аннотации докл. Дубна. - 1992. - С.73.
13. Чигинь В. И. Физические механизмы пульсации отрицательной короны: Автореф. дис. ...д-ра физ.- мат. наук. - Харьков, 2007. - 20 с.
  14. Попов В. А. Возбуждение резонатора линейного ускорителя ЛУ-20 ЛВЭ ОИЯИ.- Дубна // (Препр. / АН ОИЯИ; №9-9061). - 1975. - 12 с.
  15. Демченко П. А., Шулика Н. Г. Эмиссионные токи в ускорителе ионов с переменнo-фазовой фокусировкой // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Техн. физ. эксперимента. - 1984. - Вып.1(18). - С.57-59.
  16. Демченко П. А., Ковальчук И. К., Митроченко В. В. и др. Радиальные электронные потоки в ускоряющей структуре на Н-волне // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Техн. физ. эксперимента. - 1986. - Вып.2(28). - С.31-33.
  17. Двинских В. А. Оценка эффективности автогенераторных схем измерения динамических параметров СВЧ усилителей // Электронная техника. Сер. I: Электроника СВЧ. - 1972. - №2. - С.50-54.
  18. Лобзов Л. Д., Демченко П. А., Гусев Е. В. и др. Система ВЧ питания линейного протонного ускорителя на энергию 10 МэВ с модифицированной переменнo-фазовой фокусировкой пучка // Вісн. Харків. Нац. ун-ту. Сер. Ядра, частинки, поля. - 2002. - №569, вып. 3(19). - С.83-87.
  19. Федоров Н. Д. Электрические приборы СВЧ и квантовые приборы. - М.: Атомиздат, 1979. - 288 с.

#### THE CONTROL OF MULTIPACTING DISCHARGE IN HIGH QUALITATIVE STRUCTURE ION LINEAR ACCELERATOR

L. D. Lobzov, N. G. Shulika, V. N. Belan

The appearance of multipacting discharges in diode gaps of multi-cells structure of ion linear accelerator, without system stability electrodynamic parameters, is considered to be one of the main breaking factors of its electrodynamic parameters, when it is impossible to achieve the required characteristics of accelerating fields, but also the stable RF generation in its general system of complex connected oscillatory contours, which is broken by the indicated discharges in one of them. With suppression of conditions of secondary electron multiply and of removing of the possibility of their number growing in time up to the size of multipacting discharges, the conditions of the stable RF generation and work the whole system of accelerator agitation on the whole, may be satisfactory. For many starting-repairing and technological

works on the accelerator, the solving of a problem of the suppression of parasite multipacting discharges and the reaching of stable character of RF voltage installation is considered to be the final stage. It is experimentally shown the control of multipactor processes, from their maximal influence on the character of transitional processes of installation of RF voltage on the elements of structure of linear accelerator up to a full suppression resonance multiply electrons with material electrodes and the achievement of nominal amplitudes of accelerating fields in linear accelerator.

**Key words:** ion linear accelerator, resonator structure, one accelerator cell, parallel-plate electrode surfaces, variable electric fields, secondary electron emission, multipacting discharge.

#### КЕРУВАННЯ МУЛЬТИПАКТОРНИМИ РОЗРЯДАМИ В ВИСОКОДОБРОТНІЙ СТРУКТУРІ ЛІНІЙНОГО ПРИСКОРЮВАЧА ІОНІВ

Л. Д. Лобзов, М. Г. Шуліка, В. М. Белан

Виникнення мультипакторних розрядів у діодних проміжках лінійного прискорювача іонів без систем стабілізації електродинамічних параметрів багатоячеєчної резонаторної структури є одним із серйозних факторів, що обурюють, коли неможливо досягти не тільки необхідних характеристик прискорюючих полів, але й стійких ВЧ коливань у його системі складно зв'язаних коливальних контурів. При придушенні умов розмноження вторинних електронів і усунення можливості збільшення їхнього числа в часі до величин мультипакторних розрядів умови стійкості ВЧ коливань і робота всієї системи збудження прискорювача в цілому може бути задовільною. А для багатьох пуско-налагоджувальних і технологічних завдань на прискорювачі вирішення проблеми придушення паразитних мультипакторних розрядів та досягнення сталого характеру збудження ВЧ напруг є завершуючим етапом. Експериментально показано керування низьковольтними мультипакторними процесами від максимального їхнього впливу на встановлення ВЧ напруг на елементах високодобротної резонаторної структури до повного придушення розмноження вторинних електронів з матеріалу електродів і одержання стійких електродинамічних характеристик.

**Ключові слова:** лінійний прискорювач іонів, резонаторна структура, одинична прискорююча ячейка, паралельні електродні поверхні, змінні електричні поля, вторинно-електронна емісія, мультипакторний розряд.

Рукопись поступила 2 августа 2007 г.