

АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ВЧ-ВОЗБУЖДЕНИЯ ДВУХРЕЗОНАТОРНОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ДЕЙТРОНОВ

Л.Д. Лобзов, Н.Г. Шулика

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

E-mail: lobzov@kipt.kharkov.ua

Описан проект автоколебательной системы ВЧ-возбуждения двухрезонаторного линейного ускорителя дейтронов, сооружаемого в ННЦ ХФТИ. Основными требованиями к разрабатываемому ВЧ-ускорителю являются обеспечение высоких электродинамических характеристик резонаторных структур и стабильности параметров их электродов и электродных поверхностей, обладающих вторично-электронными свойствами при приложенных ВЧ-полях. Ограничение паразитного влияния размноженной эмиссии вторичных электронов с таких электродов в условиях вакуума достигается в отсутствие задающего генератора и многокаскадного канала усиления мощности, систем общих и специальных способов стабилизации и регулирования возбуждаемых ВЧ-напряжений и полей.

ВВЕДЕНИЕ

Высокочастотные линейные ускорители заряженных протонов и дейтронов находят все большее применение как в научных исследованиях, так и в прикладных целях. Создаваемые в ННЦ ХФТИ ускорители ионов с модифицированной переменнорезонаторных Н-структур [1], требуют разработки таких же малогабаритных и компактных систем их ВЧ-возбуждения. При этом желательно использование простых ВЧ-методов с применением автоколебательных систем (АС), обеспечивающих не только устойчивую генерацию ВЧ-напряжений, но и подавление условий размножения эмиссии вторичных электронов, могущих достигать во времени вторично-электронных разрядов [2-3].

С самого начала развития ВЧ-ускорительной техники (начиная с циклотрона [4]) известно о том, что возбуждение необходимых ВЧ-напряжений и полей в вакуумированных структурах, в том числе и линейных ускорителях, может быть трудно разрешимой проблемой, если предварительно не приняты меры по управлению вторично-электронными свойствами их электродов и электродных поверхностей [5-7].

При этом стало очевидным, что выбор метода устойчивого ВЧ-возбуждения радиофизических резонансных структур – это выбор способа подавления паразитных вторично-электронных (мультипакторных) процессов и разрядов между её собственными электродами (потенциальными вторичными эмиттерами), то есть эффективность таких высокочастотных установок в целом определяется не только рассчитанными электродинамическими характеристиками, но и методами подавления умножающейся эмиссии вторичных электронов.

В данном проекте в качестве ускоряющих структур линейного ускорителя дейтронов для пучковых технологий применены разработанные ранее малогабаритные резонаторы Н-типа с гребенчатыми держателями трубок дрейфа.

Особенностью таких структур является то, что трубки дрейфа, образующие ускоряющие зазоры, поочередно подключены к диаметрально расположенным в резонаторе сплошным плоским подвескам. При этом замыкание металлическим проводником (аналогично размноженной эмиссии во времени числа вторичных электронов с чередующихся торцов электродов до величины вторично-электронного разряда) любого из ускоряющих зазоров, начиная с первого, приводит к резкому падению амплитуд напряжений до нуля по всей длине ускорителя.

Основные требования к построению импульсной системы ВЧ-возбуждения двухрезонаторного линейного ускорителя для элементного анализа [8] определяются энергиями ускоренных пучков дейтронов в резонаторах Р1– $W_d = 1,6 \text{ МэВ}$ и в Р2– $W_d = 3,1 \text{ МэВ}$.

Ниже приведены основные параметры системы ВЧ-возбуждения ускорителя дейтронов:

Основная частота, МГц.....	~100,0
Длительность ВЧ-импульса, мкс... ..	~250...350
Частота посылок, Гц	1...25
Импульсная мощность резонатора Р1, кВт ..	~300
Импульсная мощность резонатора Р2, кВт ..	~500
Нестабильность собственных частот автоколебательных резонаторов, %	~10 ⁻⁷
Нестабильность уровней полей, %.....	± 1,0
Нестабильность фаз полей, град	± 1,0

Приоритет в выборе метода устойчивого возбуждения двухрезонаторного ускорителя и подавления мультипакторных процессов и разрядов в его ускоряющих структурах отдан новому ВЧ-методу, разработанному в ННЦ ХФТИ [9,10]. Этот метод не требует существенных изменений в генераторной ВЧ-системе и конструкции ускорителя и применения высоких технологий в изготовлении его ускоряющих и других необходимых элементов.

Новый метод основан на применении в ВЧ-генераторной системе резонансного ускорителя независимых цепей положительных обратных связей (ПОС).

При этом в системе возбуждения каждой из ускоряющих структур $P1$ и $P2$ одновременно реализуется работа двух автоколебательных контуров с элементами положительных обратных связей, установленных в соответствующем резонаторе и ВЧ-генераторной системе.

Использование такого ВЧ-метода позволяет эффективно подавлять условия развития мультипакторных процессов не только в диодных промежутках (зазорах пролетного канала, настроечных, регулировочных и контрольных устройствах, а также других полезных диодных промежутках) ускоряющих структур, но и подобных емкостных промежутках элементов кольцевых цепей автоколебаний. К их числу относятся элементы оконечных генераторных ВЧ-каскадов с дорогостоящими ламповыми триодами, и фидерных линий с параллельными проводниками.

Подавленное размножение вторично-электронных процессов (не достигших величин вторично-электронных разрядов) между электродами указанных диодных промежутков не имеет паразитного влияния на их параметры и устойчивость установления результирующих напряжений, возбуждаемых в системе линейного ускорителя [11].

ОПИСАНИЕ ВЧ-СИСТЕМЫ УСКОРИТЕЛЯ

Структурная схема автоколебательной системы ВЧ-возбуждения двухрезонаторного линейного ускорителя дейтронов приведена на Рис. 1.

Автоколебания одного из контуров каждого усилительного канала охватывают ВЧ-источник 1 и возбуждаемый резонатор. Автоколебания другого контура также охватывают мощный ВЧ-источник 1, но с ТЕМ-волнами собственного фидера. При этом вторично-электронные процессы и разряды в резонаторе могут непосредственно влиять только на параметры автоколебательного контура, содержащего этот резонатор.

Влияние указанных разрядов на параметры другого автоколебательного (автогенераторного) контура является косвенным, через нарушенные условия согласования волнового импеданса фидера с входным сопротивлением ВЧ-ввода возбуждения б резонансной структуры и появление в передающем тракте отраженных волн, образующих узлы и пучности стоячих волн напряжений.

Мощные ВЧ-источники, усиливающие напряжения положительных обратных связей каждой пары автоколебательных контуров – это разработанные укороченные (трехкаскадные) усилительные каналы 1.

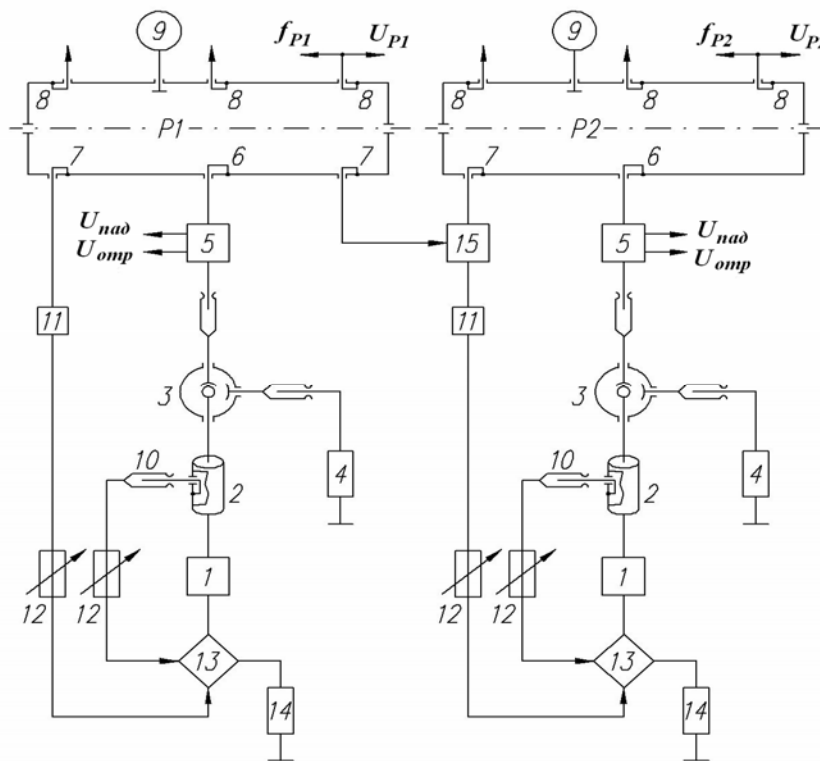


Рис. 1. Структурная схема автоколебательной системы ВЧ-возбуждения двухрезонаторного линейного ускорителя дейтронов.

- 1 – ВЧ-усилительный канал трехкаскадный; 2 – фидер воздушный; 3 – переключатель фидерный;
- 4 – нагрузка активная, охлаждаемая водой; 5 – рефлектометр фидерный; 6 – ВЧ-ввод мощный;
- 7 – петля связи с ВЧ-полями резонатора; 8 – петля измерительная индуктивная;
- 9 – настройщик частоты резонатора; 10 – петля связи с падающими волнами фидера;
- 11 – аттенюатор плавный коаксиальный; 12 – фазовращатель;
- 13 – устройство сложения ВЧ-сигналов мостовое;
- 14 – сопротивление балластное; 15 – переключатель коаксиальный.
- $P1, P2$ – резонаторы (резонаторные структуры)

В их выходных каскадах, выполненных по схеме с общей сеткой, применены генераторные лампы типа ГИ-24А, отдающие в импульсе (согласно паспортным данным) более 1 МВт ВЧ-мощности.

Условия возбуждения ВЧ-колебаний определяются балансами амплитуд и фаз в каждой из кольцевых цепей с независимыми положительными обратными связями. Напряжения с элементов 7 и 10, установленных в резонаторных структурах и в воздушных коаксиальных фидерах 2, поступают на входы ВЧ-мостовых устройств 13. Далее результирующий сигнал поступает на согласованный вход соответствующего усилительного канала.

Регулирование фазовых соотношений в кольцевых цепях ВЧ-автоколебаний производится с помощью фазовращателей 12 типа раздвижных коаксиальных линий, рассчитанных на средние уровни передаваемых импульсных мощностей. Регулирование напряжений на индуктивных элементах 10 от нуля до номинальных величин производится путем изменения их положения относительно магнитных силовых линий в коаксиальном фидере.

Указанные регулировки позволяют контролировать изменения амплитуд и форм контрольных ВЧ-импульсов резонаторов, падающих $U_{пад}$ и отраженных $U_{отр}$ волн, измеряемых рефлектометрами фидерными 5. При этом могут определяться коэффициенты стоячих волн ($KCBH$) и величины мощностей, поступающих в резонаторы.

В воздушных фидерных трактах (с базовыми размерами коаксиальных проводников 160/70 мм) установлены фидерные переключатели 3, с помощью которых осуществляется быстрая коммутация оконечной нагрузки каждого усилительного канала. В случаях возникновения различных типов ВЧ-разрядов в системе линейного ускорителя это позволяет переключить подачу ВЧ-мощности от резонаторной структуры на согласованное активное сопротивление 4. При этом однозначно определяется, причастны ли к разрядам в ускорителе ВЧ-источники (с помощью кратковременного форсирования повышенных анодных напряжений и генерируемых уровней мощностей) и фидерные тракты.

Из ранее проведенных экспериментальных исследований известно [12], что при этом однозначно выявляются области возможных вторично-электронных и других типов ВЧ-разрядов как в ускоряющих и других диодных промежутках резонаторов ускорителя, так и элементах ВЧ-каскадов усилительных каналов, фидерных трактов и высоковольтных источников.

При совместной работе двух автоколебательных контуров в каждом ВЧ-канале и устойчивом возбуждении напряжений и полей время полной подготовки собственных вторично-электронных свойств электродов и электродных поверхностей от оси (где амплитуды максимальны) до периферии (где амплитуды минимальны) резонаторных структур при остаточном вакууме $\sim (10^{-5} \dots 10^{-6})$ мм рт. ст., находится в пределах 30 минут.

Автогенераторный режим работы (с одной положительной обратной связью, охватывающей выход и вход ВЧ-источника) каждого усилительного

канала, подключенного к согласованной активной нагрузке, позволяет автономно проводить его настройку в рабочий режим. При этом по амплитуде падающей волны и учете реального $KCBH \geq 1,05$ в фидере, может проводиться калибровка (калориметрическим методом) уровней выходной мощности каждого усилительного канала.

Резонансная частота резонатора P2 при совместной работе обеих структур линейного ускорителя синхронизируется сигналами генераторной автоколебательной системы с резонатором P1.

ВЫВОДЫ

Применение нового ВЧ-метода устойчивого возбуждения резонаторов не нарушает рассчитанных характеристик ускоряющих канала. При этом высокая стабильность основных частот автоколебаний в высокочастотных ($Q_0 \sim 5000 \dots 10000$) резонаторных структурах H -типа, длин ускоряющих зазоров и участков дрейфа гарантирована механической прочностью стенок трубчатых электродов и опор их крепления на общем гребенчатом держателе. А электрическая прочность промежутков между электродами обеспечивается обычными вторично-электронными свойствами материала с $K_{вээ} < 1$.

Разработка и создание автоколебательной системы ВЧ-возбуждения двухрезонаторного линейного ускорителя дейтронов позволит эффективно проводить в полном объеме пуско-наладочные работы на вакууммированных резонансных структурах и определять специальные требования к системам автоматического регулирования параметров ускоренных пучков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е.В. Гусев и др. Ускоряющие структуры с высокими электродинамическими характеристиками // *Вопросы атомной науки и техники. Серия "Ядерно-физические исследования"*. 1997, в.2,3(29,30), т.1, с.187-189.
2. Д.В. Каретников и др. *Линейные ускорители ионов*. М.: «Госатомиздат», 1962, с.208.
3. *Линейные ускорители ионов. Т.2. Основные системы* / Под ред. Б.П. Мурина. М.: «Атомиздат», 1978, с.320.
4. *Ускорители* / Пер. с англ. и немец. М.: «Госатомиздат», 1962, с.560.
5. L.V. Alvarez, et al. Berkeley Proton Linear Accelerator // *The Review of Scientific Instruments*. 1955, v.26, №2, p.111-133.
6. V.L. Auslender, et al. Work Status of 5 MeV 300 kW Electron Accelerator // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"*. 2006, №3, p.3-5.
7. В.В. Леонтьев, В.В. Пеплов. Акустический датчик в системе защиты от пробоев в волноводном тракте линейного ускорителя ИЯФ РАН // *Тезисы XX Международного семинара по ускорителям заряженных частиц*. Алушта, Крым. 2007 / Харьков: ННЦ ХФТИ, 2007, с.90.
8. С.А. Вдовин, Е.В. Гусев, П.А. Демченко, Н.Г. Шулика. Линейный ускоритель дейтронов

- для элементного анализа // *Наст. журнал*, с.29-33.
9. L.D. Lobzov, N.G. Shulika. Method of Suppressing the Multipactoring Discharges // *Problems of Atomic Science and Technology. Series «Nuclear Physics Investigations»*, 2002, №2(40), p.93-94.
10. Пат. №1700783А1 СССР. *Высокочастотный автогенератор*. Л.Д. Лобзов и др. // *Открытия. Изобретения*. 1991, №47.
11. Л.Д. Лобзов и др. Влияние мультипакторных разрядов на устойчивость установления автогенераторных ускоряющих полей однорезонаторного ускорителя ионов // *Вісник Харківського Національного університету. Серія фіз. «Ядра, частинки, поля»*. 2003, №585, в.1(21), с.78-74.
12. Л.Д. Лобзов и др. Длительность мультипакторных процессов и разрядов в линейном ускорителе ионов // *Тезисы XXI Международного семинара по ускорителям заряженных частиц*, Алушта, Крым. 2009 / Харьков: ННЦ ХФТИ, 2009.

Статья поступила в редакцию 05.11.2009 г.

THE SELF-OSCILLATORY SYSTEM RF OF EXCITATION TWO RESONATORS LINEAR ACCELERATOR OF DEUTERONS

L.D. Lobzov, M.G. Shulika

Describe of the self-oscillatory system RF of excitation of two resonator linacs of the deuterons, constructed in NSC KIPT is featured. The basic requirement to developed RF to the accelerator is provision of high electrodynamic characteristic of resonator structures and stability parameters their electrodes and electrode surfaces, possession of secondary electrons property in the presence RF fields. Restriction of spurious influence of emission secondary electrons from such electrodes is reached in lack of a master oscillator and the many cascades channel of power amplifier, systems of blanket and special expedients of stabilization and regulation raised RF voltages and fields.

АВТОКОЛИВАЛЬНА СИСТЕМА ВЧ-ЗБУДЖЕННЯ ДВОХРЕЗОНАТОРНОГО ЛІНІЙНОГО ПРИСКОРЮВАЧА ДЕЙТРОНІВ

Л.Д. Лобзов, М.Г. Шулика

Описано проект автоколивальної системи ВЧ-збудження дворезонаторного лінійного прискорювача дейтронів, що споруджується в ННЦ ХФТИ. Основні вимоги до розроблювального ВЧ-прискорювача є забезпечення високих електродинамічних характеристик резонаторних структур та стабільних параметрів їх електродів і електродних поверхнів, що володіють вторинно-електронними властивостями при докладених до них ВЧ-полів. Обмеження паразитного впливу розмножуваної емісії вторинних електронів з таких електродів досягається у відсутності генератора, що задає частоту, а також багатокаскадного каналу посилення потужності, систем загальних і спеціальних способів стабілізації і регулювання ВЧ-напруг і полів.