

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера СО РАН
(ИЯФ СО РАН)

А.А. Брызгин, В.В. Безуглов, Л.А. Воронин, А.Ю. Власов,
В.А. Горбунов, М.В. Коробейников, А.Н. Лукин, В.Е. Нехаев,
А.Д. Панфилов, В.М. Радченко, А.В. Сидоров, В.О. Ткаченко,
Е.А. Штарклев, Б.Л. Факторович

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ СХЕМЫ
ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ПИТАНИЯ
УСКОРЯЮЩЕГО РЕЗОНАТОРА
ИМПУЛЬСНОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ
ЭЛЕКТРОНОВ ИЛУ-10

ИЯФ 2017-1

Новосибирск
2017

**Некоторые особенности схемы высокочастотного питания
ускоряющего резонатора импульсного линейного ускорителя
электронов ИЛУ-10**

А.А. Брызгин, В.В. Безуглов Л.А. Воронин, А.Ю. Власов
В.А. Горбунов, М.В. Коробейников, А.Н. Лукин, В.Е. Нехаев,
А.Д. Панфилов, В.М. Радченко, А.В. Сидоров, В.О. Ткаченко,
Е.А. Штарклев, Б.Л. Факторович

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
630090, Новосибирск, Россия

1. Введение

В 1972 году в Институте ядерной физики СО РАН были начаты работы по созданию серии высокочастотных импульсных ускорителей электронов для использования их в производственных и исследовательских радиационно-технологических установках.

Ускорители типа ИЛУ перекрывают диапазон энергий $0,7 \div 10$ МэВ при мощности ускоренного пучка до 100 кВт. Их отличительными признаками являются простота конструкции, удобство в эксплуатации и надежность при длительной работе в условиях промышленного производства.

Базовой моделью ускорителей этой серии служит ускоритель ИЛУ-6 [1,2]. На его основе с учетом опыта эксплуатации, с учетом специфики технологических процессов при облучении самых различных материалов, требующих повышенной энергии электронов вплоть до 5 МэВ, был разработан ускоритель ИЛУ-10. Его особенностям схемы высокочастотного питания ускоряющего резонатора посвящена настоящая работа.

2. Конструкция и параметры ускоряющего резонатора

Основой ускорителя является тороидальный резонатор с конусообразными осевыми выступами, которые образуют ускоряющий зазор длиной $240 \div 270$ мм. Форма выступов выбрана из условий формирования и фокусировки электронного пучка в процессе инжекции, ускорения и дальнейшего прохождения через систему выпуска с минимально допустимыми потерями. Материал стенок резонатора – медь М0б. Конструкция резонатора сварная с разъемным болтовым соединением наружной обечайки в средней плоскости. Для обеспечения надежного электрического контакта между соединительными фланцами проложена индиевая проволока.

Резонатор (2) помещен в вакуумный бак (1) из стали X18H10T (рис. 1). Откачка производится четырьмя магнитоэлектрическими насосами типа НМД-0.4, расположенными на цилиндрической боковой поверхности вакуумного бака. Предварительная откачка обеспечивается форвакуумным агрегатом. Все уплотнения в вакуумном объеме металлические (медь, индий). Рабочий вакуум $\sim 10^{-6}$ Торр. При нормальной эксплуатации вакуумной системы перерывы в работе продолжительностью до двух суток не требуют форвакуумной откачки для старта магнитоэлектрических насосов. Давление в вакуумном баке оценивается по величине тока магнитоэлектрических насосов.

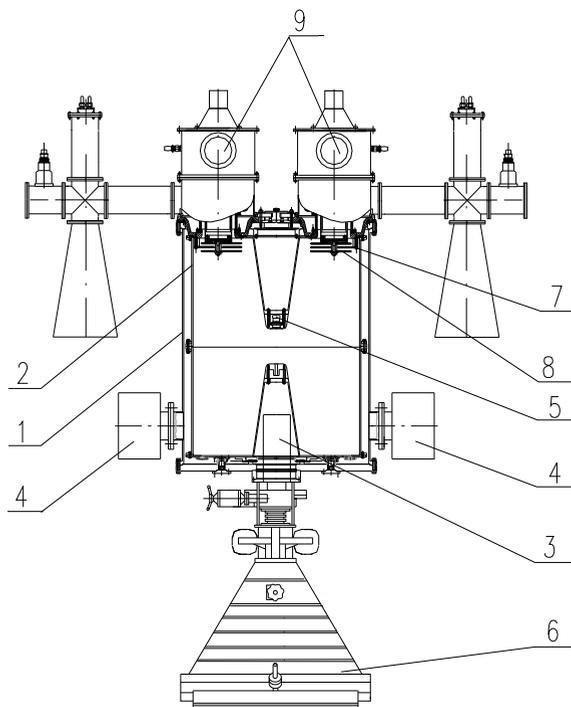


Рис. 1. Ускоритель ИЛУ-10: 1 – вакуумный бак; 2 – медный тороидальный резонатор; 3 - магнитная линза; 4 - магниторазрядные насосы; 5 – катодный узел; 6 – выпускное устройство; 7 - опора петли связи; 8 – вакуумный конденсатор; 9 – ВЧ генераторы.

Охлаждение резонатора производится дистиллированной водой, подаваемой по медным трубкам диаметром 15 мм, припаянным к корпусу резонатора с наружной стороны.

На верхнем выступе по оси резонатора установлена триодная управляемая электронная пушка с термокатодом из гексаборида лантана (LaB_6) диаметром 20мм (или 16 мм), причем рабочая поверхность катода обращена к полости ускоряющего зазора. Электроны, эмитированные катодом, на выходе из ускоряющего зазора из-за малого угла пролета, имеют максимальную энергию практически равную напряжению на ускоряющем зазоре. Пройдя через магнитную фокусирующую линзу, ускоренный пучок попадает в выпускное устройство, где с помощью электромагнитов развертки равномерно сканируется по фольге выпускных окон и выводится в атмосферу на облучаемый объект.

Вакуумный шибер ДУ-60, расположенный между резонатором и выпускным устройством, позволяет производить замену катодного узла электронной пушки без потери вакуума в выпускном устройстве или замену фольги выпускных окон без разгерметизации резонатора ускорителя.

Управление током ускоренного пучка электронов осуществляется изменением величины положительного смещения на катоде относительно сетки. За выходным отверстием ускоряющего зазора внутри полости нижнего электрода резонатора установлена магнитная фокусирующая линза (3), формирующая электронный пучок в канале ускорителя и выпускном устройстве (6).

На верхнем фланце бака смонтирована измерительная петля. Детектированный с нее сигнал, пропорциональный напряжению на зазоре резонатора, используется для измерения энергии ускоренных электронов. Предварительная калибровка сигнала с контрольной петли производится при измерении энергии ускоренных электронов по сигналам специального калибратора энергии или с помощью магнитного спектрометра.

Произведя оптимизацию параметров резонатора ускорителя ИЛУ-6, несколько увеличив его размеры, удалось снизить высокочастотные потери в резонаторе при сохранении прежней резонансной частоты. Основные расчетные и измеренные параметры резонатора следующие:

1. Резонансная частота $115 \div 117$ МГц (в зависимости от длины ускоряющего зазора).
2. Измеренная добротность $29 \cdot 10^3$ при расчетной добротности $36.7 \cdot 10^3$.
3. Характеристическое сопротивление 260 Ом.
4. Измеренное шунтовое сопротивление 7.6 Мом.

3. Схема автогенератора и ее особенности

В системах высокочастотного питания ускорителей находят применение как генераторы с независимым возбуждением, так и автогенераторы. Если нет жестких требований к стабильности частоты, то высокочастотное питание ускорителей, которые содержат один резонатор, можно выполнить по схеме самовозбуждения. Частота колебаний автогенератора при этом определяется самим резонатором.

Во многих опубликованных работах, относящихся к ускорительной технике, таких, например, как [3], [4], [5], [6], [7] подробно рассматриваются преимущества и недостатки различных схем возбуждения ускоряющих резонаторов в метровом диапазоне длин волн.

В работе [3] описана установка по измерению электрической прочности ускоряющего промежутка, где для возбуждения тороидального резонатора на частоте 150 МГц используется высокочастотный генератор с обратной связью

через резонатор. Высокочастотный блок оконечного усилителя смонтирован непосредственно на резонаторе. Линия обратной связи снабжена фазовращателем.

В более ранней работе [4] обсуждается схема питания высокодобротного резонатора от автогенератора, где связь анодного контура с резонатором осуществляется с помощью фидера некоторой длины. В такой схеме в переходном режиме при импульсной работе могут возникать паразитные колебания, энергия которых запасается в выходном контуре и фидере. В фидер вводится “гасящее” сопротивление, место подключения которого выбирается так, чтобы оно, по возможности, увеличивало затухание системы для паразитных колебаний и мало сказывалось на рабочем типе колебаний. Следует сказать, что такая система питания резонаторов широкого распространения в ускорительной технике не получила.

В работе [5] описана весьма распространенная схема возбуждения резонатора ускорителя на частоте 6.5 МГц мощностью 8 МВт от двухкаскадного генератора, охваченного положительной обратной связью через высокодобротный резонатор. Подбор фазы обратной связи осуществляется посредством раздвижной коаксиальной линии. Двухкаскадная схема возбуждения позволяет уменьшить мощность в цепи обратной связи. Кроме того, практически не уменьшая КПД генератора, первый каскад можно ставить в перенапряженный режим и тем самым облегчить условия самовозбуждения всей системы. Для предварительного “подвозбуждения” резонатора в схему введен дополнительный импульсный автогенератор мощностью несколько кВт. Он обеспечивает прохождение области низкой добротности при малой амплитуде высокочастотного напряжения (резонансный высокочастотный разряд) и выводит рабочую точку основного генератора в область с большей крутизной, сокращая время нарастания колебаний в резонаторе. Сигнал с подвозбудителя подается непосредственно на вход первого каскада генератора. Генератор связан с резонатором посредством длинного фидера.

В работе [6] обосновывается предпочтительность применения в однорезонаторном линейном ускорителе протонов ЛУ-20 трехкаскадного автогенератора с обратной связью через резонатор на частоте 145 МГц. В указанном ускорителе для подавления РВР предложен и внедрен метод с применением дополнительного задающего генератора совместно с дополнительным трехкаскадным предварительным усилителем, охваченным второй самостоятельной цепью положительной обратной связи.

В протонном инжекторе модели кольцевого фазотрона [7] для питания тороидального резонатора на частоте 60 МГц используется автогенератор, для которого резонатор служит единственным контуром на рабочей частоте. Связь генератора с резонатором осуществляется с помощью короткого коаксиального фидера (≈ 30 см). В генераторе применена обратная связь за

счет дополнительной емкости анод-катод (схема генератора с заземленной сеткой), что позволяет избежать дополнительного ввода в вакуумный объем цепи обратной связи. Точная регулировка обратной связи производится изменением длины катодного шлейфа. Использование внутренней обратной связи при работе с высокочастотным резонатором является одной из особенностей автогенератора. Резонансный высокочастотный разряд в резонаторе преодолевается при импульсном режиме работы генератора за счет крутого фронта импульса анодного питания. Однако, влияние разряда сказывается в задержке высокочастотного импульса по отношению к началу анодного импульса, и даже в пропуске генерации, когда напряжение в резонаторе вообще не возникает. Для устранения этого явления было использовано "подвозбуждение", т.е. создание в резонаторе с помощью дополнительного генератора малой мощности с независимым возбуждением начального напряжения, превышающего уровень разряда. Дополнительный генератор четырехкаскадный с выходной мощностью 500 Вт, связь его с резонатором осуществляется с помощью отдельной петли. Для защиты выходного каскада дополнительного "подвозбуждающего" генератора от перенапряжений, возникающих при работе основного автогенератора, в цепь связи его с резонатором включен искровой разрядник.

В ускорителе ИЛУ-10 с целью уменьшения габаритов и упрощения конструкции, источник высокочастотной мощности выполнен в виде двух независимых друг от друга автогенераторов установленных непосредственно на резонаторе и работающих параллельно на общую нагрузку с помощью индуктивных петель связи без применения промежуточных фидеров. Для стабилизации переднего фронта высокочастотного импульса помимо импульсного напряжения на аноды ламп подается постоянное напряжение величиной $0.7 \div 1.5$ кВ. Автогенераторы при этом перед включением импульсного напряжения работают в режиме так называемого предварительного "подвозбуждения" на малом уровне мощности. Конструкция автогенератора на мощном импульсном триоде ГИ-50 с заземленной сеткой показана на рис. 2.

Анодно-сеточный коаксиальный контур автогенератора выполнен в виде разомкнутой укороченной полуволновой линии сложной конфигурации, нагруженной с одной стороны емкостью анод-сетка, а с другой стороны – индуктивностью петли связи L_n и емкостью пластин вакуумного разделительного конденсатора $C_{\text{бр.}}$ (4) (рис. 2) ~ 20 пФ. Разделительный конденсатор представляет собой узел в виде трех плоских круглых пластин. Средняя пластина соединена с петлей связи, а крайние, находящиеся под анодным потенциалом, объединены между собой сменными втулками.

Изготовление резонатора из бескислородной меди Моб, специальная обработка внутренних поверхностей, прогрев под вакуумом при температуре $80 \div 90^\circ\text{C}$, а также наличие анодного напряжения на нижних

пластинах разделительных конденсаторов облегчают прохождение зон возникновения низковольтного высокочастотного разряда (мультипактора). Эти мероприятия позволили выполнить внешнюю обечайку единой и отказаться от подачи напряжения смещения на изолированную нижнюю половину резонатора, как это сделано в ускорителе ИЛУ-6.

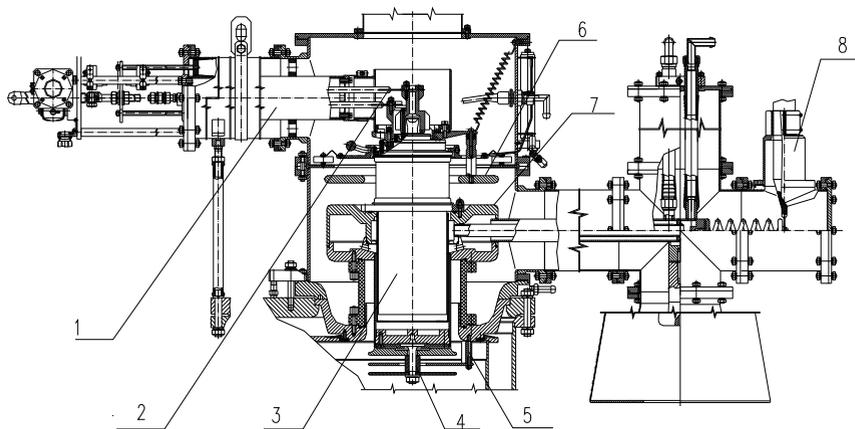


Рис. 2. Автогенератор ускорителя ИЛУ-10: 1 – катодный шлейф (тромбон); 2 – накал лампы; 3 – лампа ГИ-50; 4 – пластины вакуумного разделительного конденсатора; 5 – петля связи; 6 – диск конденсатора обратной связи; 7 – анодный водяной бачок; 8 – ввод анодного напряжения.

Анодный контур подстраивается изменением расстояния между пластинами конденсатора с помощью сменных втулок в узле крепления пластин. Одновременно указанный конденсатор служит в качестве разделительного конденсатора в цепи анодного питания генераторной лампы. Регулировка связи с резонатором осуществляется изменением ориентации плоскости петли связи по отношению к высокочастотному магнитному полю резонатора с помощью их перестановки с фиксированным шагом $7^{\circ}30'$ вокруг оси автогенератора. Петля связи (5) выполнена в виде перемычки высотой $38 \div 42$ мм и шириной 71 мм при толщине 12 мм.

В плоскости узла высокочастотного напряжения анодного контура через специальный ввод (8), закороченный по высокой частоте разомкнутой конусной четвертьволновой линией, подводятся анодное напряжение и водяное охлаждение. В том же месте располагается и вакуумный анодный изолятор из полиэтилена.

В автогенераторе применена обратная связь за счет дополнительной конструктивной емкости между анодом и катодом. Диск конденсатора обратной связи (6) обращен в сторону специально развитой поверхности

водяного бачка и крепится к выводу катода лампы с помощью шести стоек, проходящих через отверстия в экране, заземляющем управляющую сетку. Изменяя длину стоек, можно менять емкость обратной связи. Точная регулировка величины обратной связи осуществляется дистанционно изменением длины короткозамкнутого коаксиального катодного шлейфа (1) с помощью подвижного плунжера. Напряжение накала к электродам лампы подводится двумя медными прутками $\text{\O}12$ мм через внутреннюю трубу шлейфа (2).

В автогенераторе используется автоматическое смещение на сетке за счет сеточного тока лампы. Вывод сетки лампы по постоянному току заземлен через резисторы смещения, а для высокочастотных составляющих заблокирован керамическими конденсаторами.

Распределение высокочастотного электрического поля внутри границ коаксиальной части анодно-сеточного контура представлено на рис. 3. (программа SLANS [8]). Там же приведено распределение высокочастотного тока и напряжения в области между водяным бачком и наружной обечайкой резонатора. Наиболее напряженный участок с точки электрической прочности находится в верхней части анодного водяного бачка, где чаще всего наблюдаются пробои при срыве колебаний в ускоряющем резонаторе.

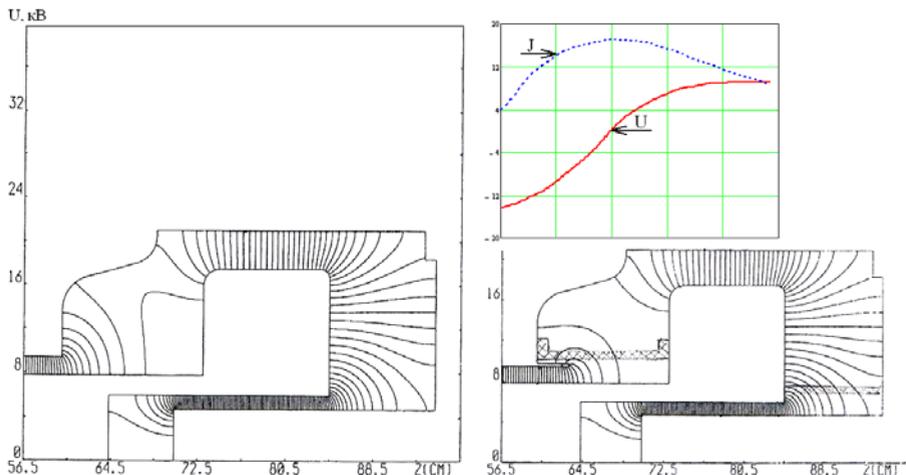


Рис. 3. Распределение высокочастотного электрического поля вдоль оси коаксиальной части анодного контура.

Защитный экран, установленный в области нижней части вакуумного изолятора, значительно снижает напряженность электрического поля в этой области (сравни рис.3а, рис. 3б.). Без защитного экрана могли происходить пробои вакуумного полиэтиленового изолятора, вплоть до нарушения вакуума в ускоряющем резонаторе.

Для подавления возможных паразитных колебаний (так называемых “дрессельных” на частоте ≈ 28 МГц) катодный контур зашунтирован проволочной спиралью, индуктивное сопротивление которой на рабочей частоте (длина провода спирали $\approx \lambda/4$) велико, а для паразитных колебаний является практически коротким замыканием.

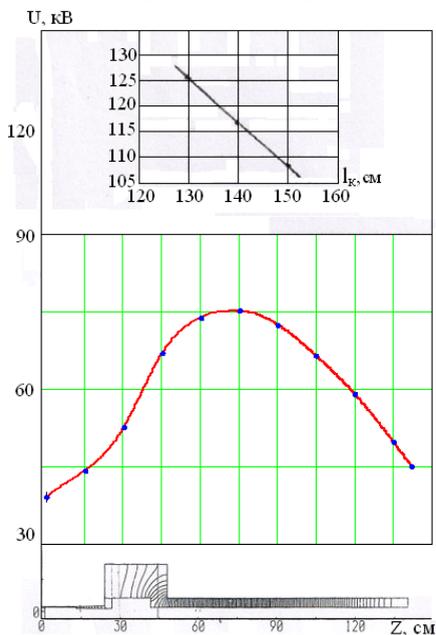


Рис. 4. Распределение высокочастотного поля вдоль оси катодного контура.

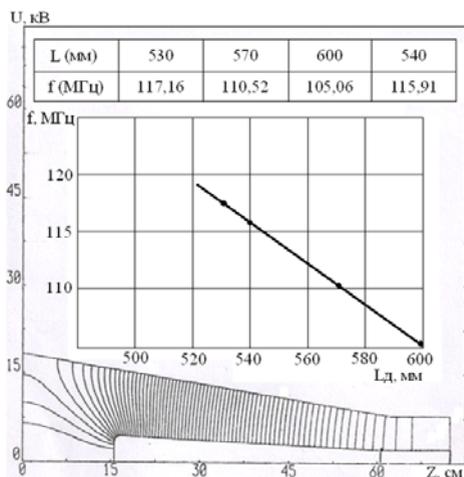


Рис. 5. Распределение высокочастотного электрического поля вдоль оси четверть-волновой блокировочной конусной линии.

На рис. 4, 5 в качестве иллюстрации изображено распределение высокочастотного электрического поля в катодном шлейфе и в блокировочной четвертьволновой конусной линии высоковольтного ввода анодного питания. Приведены расчетные зависимости резонансных частот данных узлов от их геометрической длины.

Как было указано выше, анодные цепи автогенераторов состоят из выходной емкости лампы C_{a-c} , распределенных реактивных параметров анода и анодного водяного бачка, индуктивности петли связи, емкости блокировочного конденсатора $C_{бл}$ и сопротивления, вносимого из резонатора в элемент связи.

Все это в общем виде, представляет собой трехконтурную колебательную систему, где одна из частот связи оказывается близкой к собственной резонансной частоте высокодобротного объемного резонатора, которая и определяет частоту колебаний автогенератора, обеспечивая передачу высокочастотной мощности в резонатор.

Оптимальная связь с резонатором определяется эффективной площадью петель связи и настройкой анодных контуров относительно частоты резонатора.

Если распределенные параметры ускоряющего резонатора и анодно-сеточных контуров заменить сосредоточенными параметрами, то эквивалентную схему высокочастотной системы ускорителя можно представить в следующем виде (рис. 6). Данная схема позволяет произвести анализ частотной характеристики анодно-сеточного контура каждого автогенератора с учетом влияния второго автогенератора и ускоряющего резонатора.

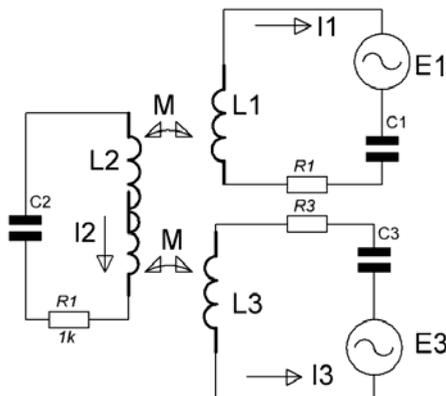


Рис. 6. Эквивалентная схема высокочастотной системы ускорителя.

L_2, C_2, r_2 – эквивалентные параметры ускоряющего резонатора, $L_1, C_1, r_1, L_3, C_3, r_3$ – эквивалентные параметры анодно-сеточных контуров автогенераторов, где L_1 – индуктивность анодного водяного бачка первого автогенератора плюс индуктивность петли связи, C_1 – эквивалентная емкость при последовательном соединении емкости разделительного конденсатора и выходной емкости анод-сетки, r_1 – последовательное сопротивление собственных потерь. Аналогично обозначены эквивалентные параметры анодно-сеточного контура второго автогенератора.

При последовательном обходе всех контуров, с учетом взаимоиндуктивности между контурами (1, 2) и (2, 3), по закону Кирхгофа, получим следующую систему уравнений для напряжений:

$$\begin{cases} Z_{11} \cdot I_1 - Z_{12} \cdot I_2 + Z_{13} \cdot I_3 = E_1 \\ -Z_{21} \cdot I_1 + Z_{22} \cdot I_2 - Z_{23} \cdot I_3 = 0 \\ Z_{31} \cdot I_1 - Z_{32} \cdot I_2 + Z_{33} \cdot I_3 = E_3 \end{cases} .$$

Решение системы уравнений относительно тока в первом контуре имеет вид [9], [10]:

$$Z_{11} = r_1 + j \cdot \left(\omega \cdot L_1 - \frac{1}{\omega \cdot C_1} \right), \quad Z_{22} = r_2 + j \cdot \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2} \right),$$

$$Z_{33} = r_3 + j \cdot \left(\omega \cdot L_3 - \frac{1}{\omega \cdot C_3} \right).$$

Так как отсутствует непосредственная связь между контурами 1 и 3, то $Z_{13} = Z_{31} = 0$. Тогда:

$$\sum_v (-1)^{v+j} \cdot \frac{M_{jv} \cdot E_v}{\Delta} = I_1, \quad \frac{M_{11} \cdot E_1}{\Delta} + \frac{M_{31} \cdot E_3}{\Delta} = I_1.$$

где Δ – определитель системы уравнений, M_{11} и M_{31} – миноры, получаемые из данного определителя.

При одинаковых источниках $E_1 = E_2 = E$ ток в первом контуре определяется выражением:

$$I_1 = E \cdot (M_{11} + M_{31}) / \Delta.$$

Отсюда последовательное сопротивление первого контура с учетом влияния контуров 2, 3: $Z = \Delta / (M_{11} + M_{31})$.

Раскрывая определитель Δ , миноры M_{31} и M_{11} , получаем:

$$\Delta = \begin{pmatrix} Z_{11} & -Z_{12} & 0 \\ -Z_{21} & Z_{22} & -Z_{23} \\ 0 & Z_{32} & Z_{33} \end{pmatrix},$$

$$M_{31} = \begin{pmatrix} -Z_{12} & 0 \\ Z_{22} & -Z_{23} \end{pmatrix}, \quad M_{11} = \begin{pmatrix} Z_{22} & -Z_{23} \\ -Z_{32} & Z_{33} \end{pmatrix},$$

где $Z = Z_{11} - \frac{Z_{11} \cdot Z_{00}^2}{Z_{22} \cdot Z_{33}} - \frac{Z_{00}^2}{Z_{22}}$. При одинаковых контурах 1 и 3 $Z_{11} = Z_{33}$,

тогда:

$$Z = Z_{11} - 2 \cdot \frac{Z_{00}^2}{Z_{22}}$$

При индуктивной связи между контурами сопротивление связи $Z_{00} = j \cdot \omega \cdot L$. Преобразуя элементы последовательной схемы анодно-сеточного контура, можно рассчитать параметры эквивалентного параллельного контура, подключенного к выводам лампы анод-сетка.

В качестве примера на рис. 7 изображена расчетная частотная характеристика анодно-сеточного контура одного из генераторов в области частот, близких к собственной частоте ускоряющего резонатора $f_p = 116$ МГц при следующих параметрах: $r_1 = 3 \cdot 10^{-2}$ Ом, $r_2 = 10^{-2}$ Ом, $r_3 = 3 \cdot 10^{-2}$ Ом, $C_2 = 5.485 \cdot 10^{-12}$ Ф, $L_2 = 34.32 \cdot 10^{-8}$ Гн, $L_1 = L_3 = 14.637 \cdot 10^{-8}$ Гн, $C_{ag} = 50$ пФ для двух вариантов, когда $f_p > f_a$ и $f_p < f_a$, соответственно, при емкости разделительного конденсатора $C_{\text{бл}} = 21$ пФ и $C_{\text{бл}} = 15$ пФ, т.е. при собственной резонансной частоте анодного контура $f_a = 108.2$ МГц и при $f_a = 121.8$ МГц.

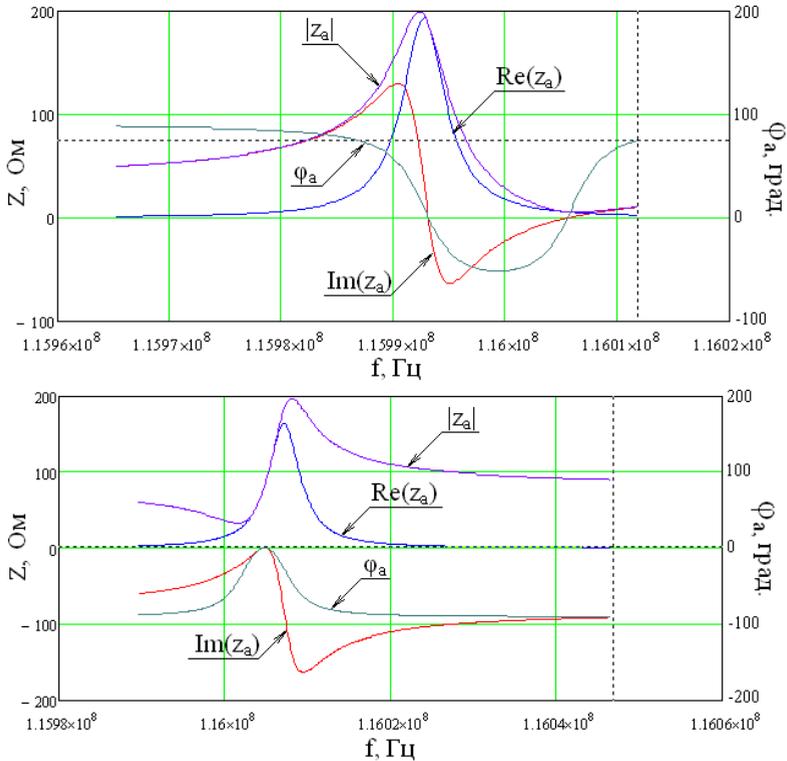


Рис. 7. Частотная характеристика анодно-сеточного контура.

Сравнивая эти варианты, можно заметить, что характер изменения модуля, активной и реактивной составляющей, а так же фазового угла анодной нагрузки заметно отличаются друг от друга.

По результатам этих расчетов на рис. 8 изображена зависимость необходимой величины сопротивления связи между анодно-сеточным контуром каждого из автогенераторов с ускоряющим резонатором при требуемом значении анодной нагрузки ~ 200 Ом от разности собственных частот анодных контуров и ускоряющего резонатора. Там же приведена зависимость фазового угла анодной нагрузки от разности частот для указанных двух вариантов.

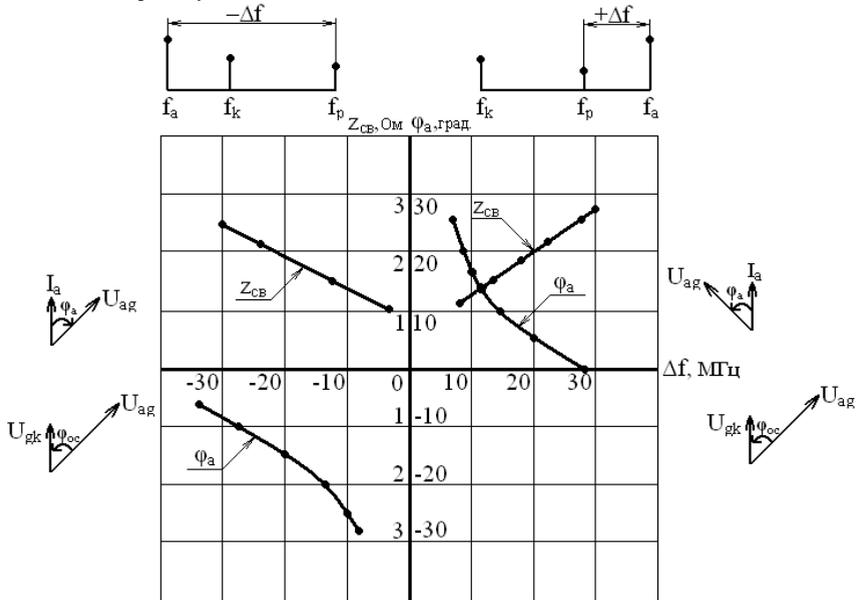


Рис. 8. Зависимость сопротивления связи и фазового угла анодной нагрузки от соотношения собственных частот анодного контура и ускоряющего резонатора.

Известно, что для устойчивой работы любого автогенератора необходимо выполнение так называемого “баланса” фаз, т.е. $\varphi_a + \varphi_{oc} + \varphi_s = 0$, где φ_a – фазовый угол анодной нагрузки, φ_{oc} – фазовый угол цепи обратной связи, φ_s – фазовый угол крутизны лампы. Для автогенератора по схеме с общей сеткой существенную роль на фазовый угол коэффициента обратной связи играет довольно низкое активное входное сопротивление генераторной лампы в пределах $10 \div 15$ Ом.

Цепь обратной связи автогенератора изображена на рис. 9.

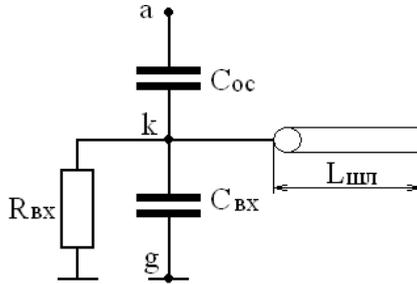


Рис. 9. Схема цепи обратной связи автогенератора.

В первом приближении под коэффициентом обратной связи можно понимать как отношение напряжения между сеткой и катодом к напряжению между анодом и сеткой, т.е. $k_{ос} = u_{гk}/u_{ag}$.

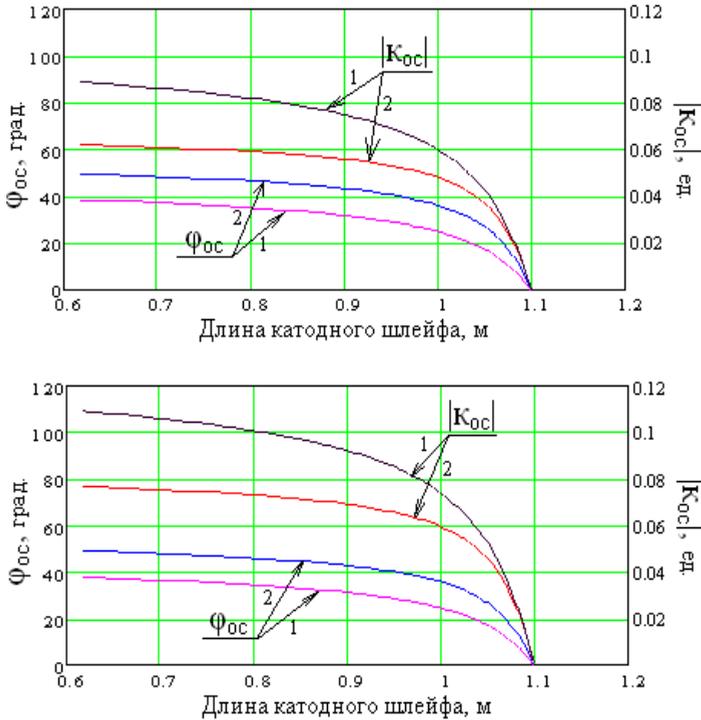


Рис. 10. Зависимость модуля и фазы коэффициента обратной связи от длины катодного шлейфа при величинах ёмкости обратной связи 20 пФ (сверху) и 25 пФ (снизу). Кривые 1 рассчитаны для $R_{вх} = 15$ Ом, кривые 2 – для $R_{вх} = 10$ Ом.

На рис. 10 изображена расчетная зависимость модуля и фазового угла коэффициента обратной связи от настройки катодного контура, т.е. от длины катодного шлейфа, при различных значениях величины емкости конденсатора обратной связи и входного сопротивления.

Из сопоставления рис. 9 и рис.10 следует, что при варианте, когда $f_a < f_p$ в некоторой области Δf автоматически выполняется условие $\varphi_a + \varphi_{oc} = 0$ в предположении, что фазовый угол крутизны лампы $\varphi_s = 0$.

Анализ полученных данных показывает, что выбранная схема передачи высокочастотной мощности от анодно-сеточных контуров автогенераторов к высокочастотному ускоряющему резонатору без промежуточных фидеров имеет тот недостаток, что генераторные лампы работают на комплексную нагрузку, а это, в свою очередь, ведет к снижению кпд. Практически электронный кпд не превышает 50%. Однако этот недостаток компенсируется простотой и компактностью конструкции.

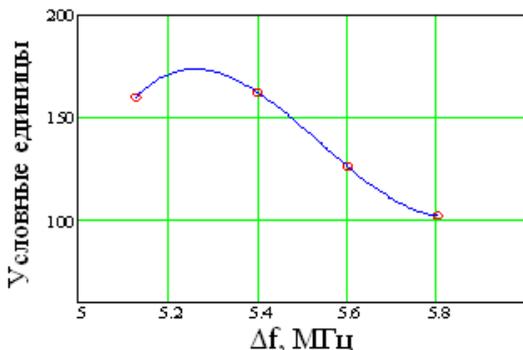


Рис. 11. Экспериментальная зависимость высокочастотного напряжения на ускоряющем зазоре от разности резонансных частот анодных контуров ВЧ генераторов и ускоряющего резонатора в режиме “подвозбуждения”.

Оптимальная связь анодно-сеточных контуров автогенераторов с ускоряющим резонатором может быть только при некоторой разности частот между ними и только для определенного положения индуктивных петель связи. Однако требование баланса фаз значительно усложняет задачу выбора связей.

На начальном этапе наладки ускорителя петли связи устанавливаются под минимальным углом к магнитному полю резонатора $22^{\circ}30'$. Ускоряющий резонатор находится под атмосферным давлением. Автогенераторы включаются в режим “подвозбуждения” при подаче постоянного напряжения на аноды ламп в пределах $0.7 \div 1.5$ кВ.

На рис. 11 приведена экспериментальная зависимость высокочастотного напряжения на ускоряющем зазоре по детектируемому сигналу с контрольной петли от разности резонансных частот анодных контуров ВЧ генераторов и

ускоряющего резонатора. Собственные резонансные частоты анодных контуров варьируются за счет изменения длин втулок между пластинами вакуумных разделительных конденсаторов.

Фиксируется разность частот в точке максимального сигнала с контрольной петли. В этом положении после откочки резонатора на вакуум производится его тренировка сначала в режиме “подвозбуждения”, а затем с подачей импульсного напряжения на аноды ламп. По достижении максимально возможного уровня высокочастотного напряжения на ускоряющем зазоре включается электронная пушка. Производится калибровка энергии электронного пучка и оценивается напряженность режима и электронный КПД генераторных ламп при номинальном токе ускоренного пучка. Напряженность режима оценивается по соотношению анодных и сеточных токов. Далее по результатам оценки режима возможна корректировка положения петель связи в сторону увеличения угла поворота еще на один шаг $7^{\circ}30'$ при соответствующем увеличении разности частот.

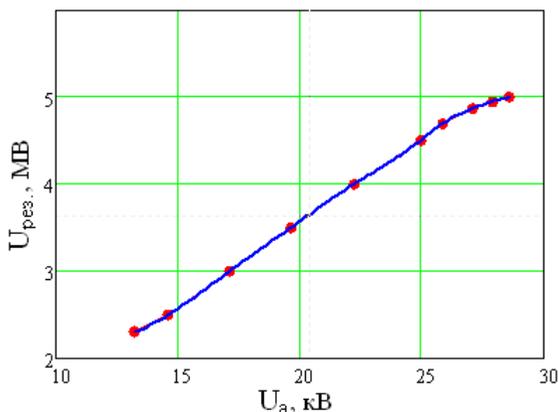


Рис.12. Зависимость высокочастотного напряжения на ускоряющем зазоре от анодного импульсного напряжения генераторных ламп в режиме тренировки ускорителя.

Во время тренировки резонатора ускорителя при относительно малых амплитудах импульсного анодного напряжения наблюдается практически линейная зависимость высокочастотного напряжения на ускоряющем зазоре от анодного напряжения. Отклонение от линейности при максимальных уровнях анодного напряжения, по-видимому, связано с наличием холодной электронной эмиссии при напряжении на зазоре более 4.5 МВ (см. рис. 12).

В качестве иллюстрации характерные осциллограммы работы ускорителя в импульсном режиме показаны на рис. 13.

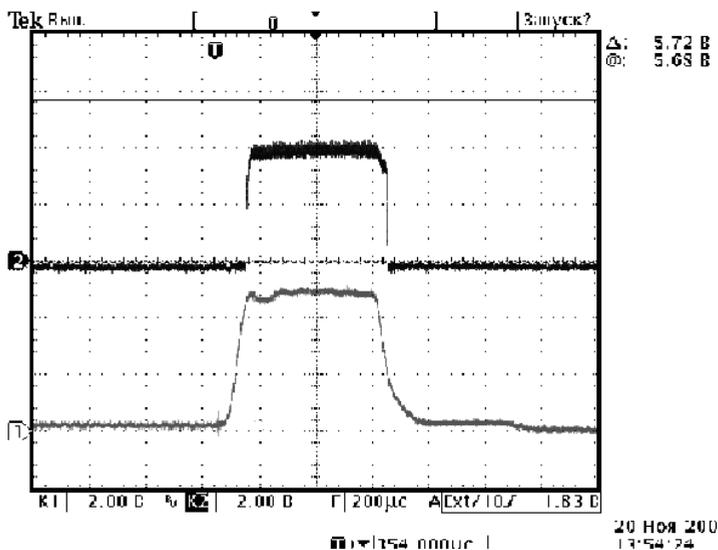


Рис. 13. Осциллограммы работы ускорителя: 1 – сигнал с ВЧ – детектора, соответствующий энергии частиц 5 МэВ, 2 – сигнал импульсного тока в цепи инжектора, соответствующий 400 мА импульсного тока.

4. Заключение

Таким образом, отличительными особенностями схемы возбуждения ускоряющего резонатора ИЛУ-10 являются:

1. Возбуждение осуществляется от двух независимых одинаковых автогенераторов на мощных генераторных триодах ГИ-50А, работающих на общую нагрузку без использования промежуточных фидеров и только при определенном соотношении между сопротивлением связи и разности собственных частот анодно-сеточных контуров и ускоряющего резонатора.

2. В автогенераторах применена емкостная обратная связь за счет дополнительной конструктивной емкости в виде диска, расположенного между развитой поверхностью анодного водяного бачка и выводом катода.

3. При оптимальных связях, обеспечивающих передачу максимальной высокочастотной мощности в резонатор, взаимная синхронизация (затягивание частоты) осуществляется без биений и без какого-либо заметного увеличения времени переходного процесса при импульсной работе. Практически доказана возможность возбуждения ускоряющего резонатора от двух мощных автогенераторов без использования дополнительного маломощного высокочастотного синхронизирующего генератора. По оценкам [9], полоса затягивания оказывается значительно шире возможной разности частот, генерируемых обеими автогенераторами.

В заключении следует сказать, что к 2016 году было изготовлено и поставлено различным предприятиям России и зарубежных стран 11 ускорителей ИЛУ-10 в составе радиационно-технологических установок (Россия – 4 шт., Казахстан – 2 шт., Польша – 1 шт., Китай – 1 шт., Индия – 1 шт., США – 2 шт.).

Радиационно-технологические установки предназначены для облучения пластиковых труб, изоляции проводов, стерилизации одноразовых медицинских изделий и препаратов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Auslender V.L. ILU-type electron accelerator for industrial technologies // Nuclear Instruments and Methods in Physical Research, В 89 (1994) 46-48.
- [2] В.Л. Ауслендер, А.А. Брызгин, Г.Б. Глаголев, В.А. Горбунов, С.А. Максимов, В.Е. Нехаев, А.Д. Панфилов, В.О. Ткаченко, А.А.-Ф. Тувик, Б.Л. Факторович. Ускорители электронов серии ИЛУ и их применение в промышленности и медицине // IX Всероссийское совещание по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, Санкт-Петербург, Россия, 22-24 сентября 1998.
- [3] В.А. Поляков, Н.И. Уксусов, Д.Г. Зайдин, В.В. Кушин. Электрическая прочность большого ускоряющего промежутка // Труды РАИАН, №9, 1972.
- [4] А.П. Федотов, Б.К. Шембель. К вопросу о возбуждении колебаний в высокочастотном резонаторе от автогенератора // Радиотехника и электроника, №12, 1956.
- [5] И.Г. Макаров, Е.П. Мельников, Г.Н. Острейко, В.В. Петров, Г.И. Яснов. Запуск импульсного линейного ускорителя с энергией 3,5 МэВ – инжектора для однооборотной инжекции электронов в синхротрон // Препринт ИЯФ, Новосибирск, 1968.
- [6] В.А. Попов. Система возбуждения резонатора ЛУ-20 синхротрона ОИЯИ // Сообщение ОИЯИ, 9-11835, Дубна, 1978.
- [7] А.А. Глазков, В.А. Кочкин, Д.Л. Новиков, Л.М. Онищенко. Высокочастотный резонатор – ускоритель протонов до энергии 1 МэВ. ЖТФ, т. XXXIV, вып. 7, 1964.
- [8] М.М. Карлинер, П.Б. Лысянский, Б.М. Фомель, В.П. Яковлев. LFNS-программа для вычисления электромагнитных полей и собственных частот аксиально-симметричных резонаторов // Препринт ИЯФ № 79-59, Новосибирск, 1979.
- [9] И.С. Гоноровский. Радиотехнические цепи и сигналы // Из-во "Советское радио", Москва, 1964.
- [10] И.Н. Бронштейн и К.А. Семендяев. Справочник по математике // Из-во "Наука", Москва, 1964.

А.А. Брызгин, В.В. Безуглов, Л.А. Воронин, А.Ю. Власов,
В.А. Горбунов, М.В. Коробейников, А.Н. Лукин, В.Е. Нехаев,
А.Д. Панфилов, В.М. Радченко, А.В. Сидоров, В.О. Ткаченко,
Е.А. Штарклев, Б.Л. Факторович

**Некоторые особенности схемы высокочастотного питания
ускоряющего резонатора импульсного линейного ускорителя
электронов ИЛУ-10**

A.A. Bryzgin, V.V. Bezuglov, L.A. Voronin, A.Yu. Vlasov, V.M. Petrov
V.A. Gorbunov, M.V. Korobeinikov, A.N. Lukin, V.E. Nekhaev,
A.D. Panfilov, V.M. Radchenko, A.V. Sidorov, V.O. Tkachenko,
E.A. Shtarklev, B.L. Faktorovich

**Peculiarities of Electron Accelerator ILU-10
Radio Frequency Power Supply System**

ИЯФ 2017-1

Ответственный за выпуск Я.В. Ракшун
Работа поступила 9.01. 2016 г.

Сдано в набор 10.01. 2017 г.

Подписано в печать 20.01. 2017 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 1,2 печ.л., 1,0 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 1

Обработано на РС и отпечатано
на ротапринтере «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11