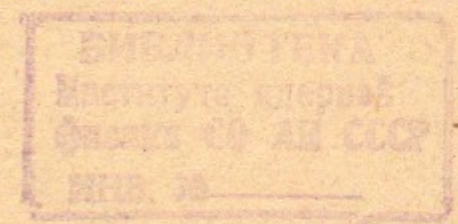


A.13

**И Н С Т И Т У Т
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН СССР**

ПРЕПРИНТ И ЯФ 78 - 25

**В.Г.Абдульманов, В.Л.Ауслендер, Г.Б.Глаголев,
И.В.Горнаков, В.Н.Лазарев, А.А.Лившиц,
А.Д.Панфилов, В.А.Поляков, Н.Д.Ромашко,
Б.М.Смирнов, В.Г.Ческидов, В.И.Юрченко**



**ИМПУЛЬСНЫЙ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ЛИНЕЙНЫЙ
УСКОРИТЕЛЬ ПРОТОНОВ ДЛЯ ВНЕШНЕЙ
ИНЖЕКЦИИ В СИНХРОТРОН Б - 5**

Новосибирск

1978

ИМПУЛЬСНЫЙ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ
ПРОТОНОВ ДЛЯ ВНЕШНЕЙ ИНЖЕКЦИИ В СИНХРОТРОН Б-5

В.Г.Абдульманов, В.Л.Ауслендер, Г.Б.Глаголев, И.В.Горнаков
В.Н.Лазарев, А.А.Лившиц, А.Д.Панфилов, В.А.Поляков,
Н.Д.Ромашко, Б.М.Смирнов, В.Г.Ческидов, В.И.Юрченко

А Н Н О Т А Ц И Я

Описаны особенности конструкции и схемы высокочастотного питания импульсного протонного ускорителя для инъекции в протонно-ионный синхротрон Б-5. Для формирования протонного пучка использован источник с разрядом типа Пеннинга с катодной иглой в разрядной области.

Приведены экспериментальные данные по запуску ускорителя и измерению параметров ускоренного пучка. Между опытными и расчетными значениями основных параметров ускорителя установлено удовлетворительное соответствие.

В В Е Д Е Н И Е

В 1970 году в Институте ядерной физики СО АН СССР начата разработка комплекса аппаратуры ионного синхротрона Б-5 [1], предназначенного для медико-биологических, радиационно-химических и других научных исследований.

Внешняя инжекция в синхротрон осуществляется от импульсного высокочастотного линейного ускорителя с энергией на выходе 1,5 МэВ для протонов и 1,0 МэВ/нуклон для многозарядных ионов с $\frac{Z}{A} = \frac{1}{2}$.

По техническим условиям при инжекции в протонно-ионный синхротрон Б-5 пучок протонов должен удовлетворять следующим условиям:

- | | |
|---|---|
| 1. Энергия протонов | $T = (1,3 \pm 1,5) \text{ МэВ}$ |
| 2. Ток пучка | $I_n = 2,5 \text{ мА}$ |
| 3. Длительность импульса | $\tau = 0,7 \text{ мкс}$ |
| 4. Разброс энергии инжектируемых частиц в сгустке | $\frac{\Delta T}{T} = \pm 1\%$ |
| 5. Разброс средней энергии инжектируемых частиц от импульса к импульсу | $\frac{\Delta T}{T} = \pm 0,1\%$ |
| 6. Диаметр поперечного сечения пучка на входе впускного магнита синхротрона | $\phi = 10 \text{ мм}$ |
| 7. Эмиттанс пучка | $\epsilon = 5 \cdot 10^{-9} \text{ см.рад}$ |

К началу разработки инжектора для Б-5 не существовало дешевого, простого в изготовлении и наладке ускорителя, удовлетворяющего перечисленным требованиям, к тому же способного инжектировать тяжелые ионы (вплоть до ионов аргона) с различными отношениями заряда к массе (от 1/2 до 1/4) без изменения схемы питания и его конструкции.

В качестве такого инжектора был выбран высокочастотный однорезонаторный импульсный ускоритель с одной пролетной трубкой. В процессе его разработки был использован опыт построения действующих линейных ускорителей со стоячей волной, предназначенных для аналогичных целей [2, 3, 4].

Сооружение инжектора для ионного синхротрона Б-5 потребовало целого ряда новых технических решений в вопросах возбуждения высокочастотного резонатора от автогенератора, стабилизации напряжения на резонаторе, в вопросе устранения влияния вторичного высокочастотного разряда на работу установки.

В работе дано описание ускоряющего резонатора, дан сравнительный анализ ранее применявшихся схем возбуждения высокочастотных резонаторов с их преимуществами и недостатками, приведено подробное описание выбранной схемы возбуждения резонатора от однокаскадного автогенератора с анализом особенностей цепи связи анода лампы с полостью резонатора и особенностей переходного режима нарастания амплитуды колебаний в резонаторе при импульсной работе. Описаны конструкция автогенератора и ее особенности, принятые меры по борьбе с низковольтным резонансным высокочастотным разрядом. Приведена схема анодного модулятора для питания автогенератора.

Дан краткий анализ схем стабилизации напряжения на ускоряющем зазоре и схемы стабилизации фазы напряжения на группирующем резонаторе. Приведены результаты расчетов по динамике движения протонов по всему тракту ускорения.

I. КОНСТРУКЦИЯ И ПАРАМЕТРЫ УСКОРЯЮЩЕГО РЕЗОНАТОРА

Общий вид резонатора показан на рис. I. Он представляет собой укороченную четвертьволновую коаксиальную линию, возбуждаемую поперечной электромагнитной волной типа ТЕМ на частоте 30 МГц. Коаксиальная линия резонатора нагружена сосредоточенной емкостью ~ 50 пФ, которая образована между поверхностью дрейфовой трубки и боковой поверхностью и дном внешнего экрана.

Материал внутренней (3) и внешней (2) трубки коаксиальной линии и дрейфовой трубки (5) — медь М1. Резонатор помещен в вакуумный объем (1) из стали Х18Н9Т. Откачка вакуумного объема производится четырьмя магниторазрядными насосами типа НОРД-250, расположенными попарно на верхнем и нижнем днище объема. Все уплотнения в вакуумном объеме металлические (индий и медь). Расчетный вакуум 10^{-7} Торр.

Охлаждение резонатора производится дистиллированной водой, подаваемой по медным трубкам, припаянным к внутренней трубе и корпусу резонатора.

В верхней части резонатора в области максимума высокочастотного магнитного поля расположена контрольная петля (10), по величине сигнала с которой можно судить об амплитуде напряжения на ускоряющем зазоре. Предварительная калибровка сигнала с петли проводилась по измерению энергии ускоренных электронов с помощью магнитного анализатора. Для этого в дрейфовой трубке по оси движения ионов была установлена диодная электронная пушка. В каждый ускоряющий полупериод высокочастотного поля катод пушки эмиттировал электроны, которые ускорялись в зазоре. Максимальная энергия электронов при напряженности поля 100 кВ/см, частоте 30 МГц и длине зазора 7 см из-за малого угла пролета с точностью до долей процента соответствует амплитуде напряжения на зазоре.

Внешний корпус резонатора выполнен из двух частей. Нижняя часть корпуса (4) установлена на трех опорных керамических изоляторах и подсоединяется к верхней части через блокировочные конденсаторы (7) типа К15У-1-470 пФ — 15 кВ (74 шт.), равномерно распределенных по окружности. С целью подавления резонансного высокочастотного разряда на нижнюю половину резонатора через проходной керамический изолятор и дроссель (8) от источника постоянного напряжения подается смещение — 4 кв. Одновременно через указанный узел поступает охлаждающая вода на нижнюю часть корпуса резонатора.

Перестройка резонатора на частоте в пределах одного процента осуществляется с помощью подвижной емкостной пластины (9), расположенной на нижнем днище корпуса. Механизм перемещения пластины выполнен на основе подвижного сифонного узла.

Дрейфовая трубка (5) представляет собой цилиндр диаметром 400 мм и высотой 370 мм. По оси движения ионов на дрейфовой трубке и внешнем корпусе резонатора для создания плоско-параллельного электрического поля сделаны цилиндрические выступы диаметром 260 мм. Радиус закруглений выступов 20 мм. Конструктивно выступы на внешнем корпусе резонатора выполнены таким образом, что имеется возможность изменять величину ускоряющего зазора от 50 до 80 мм с помощью сменных прокладок.

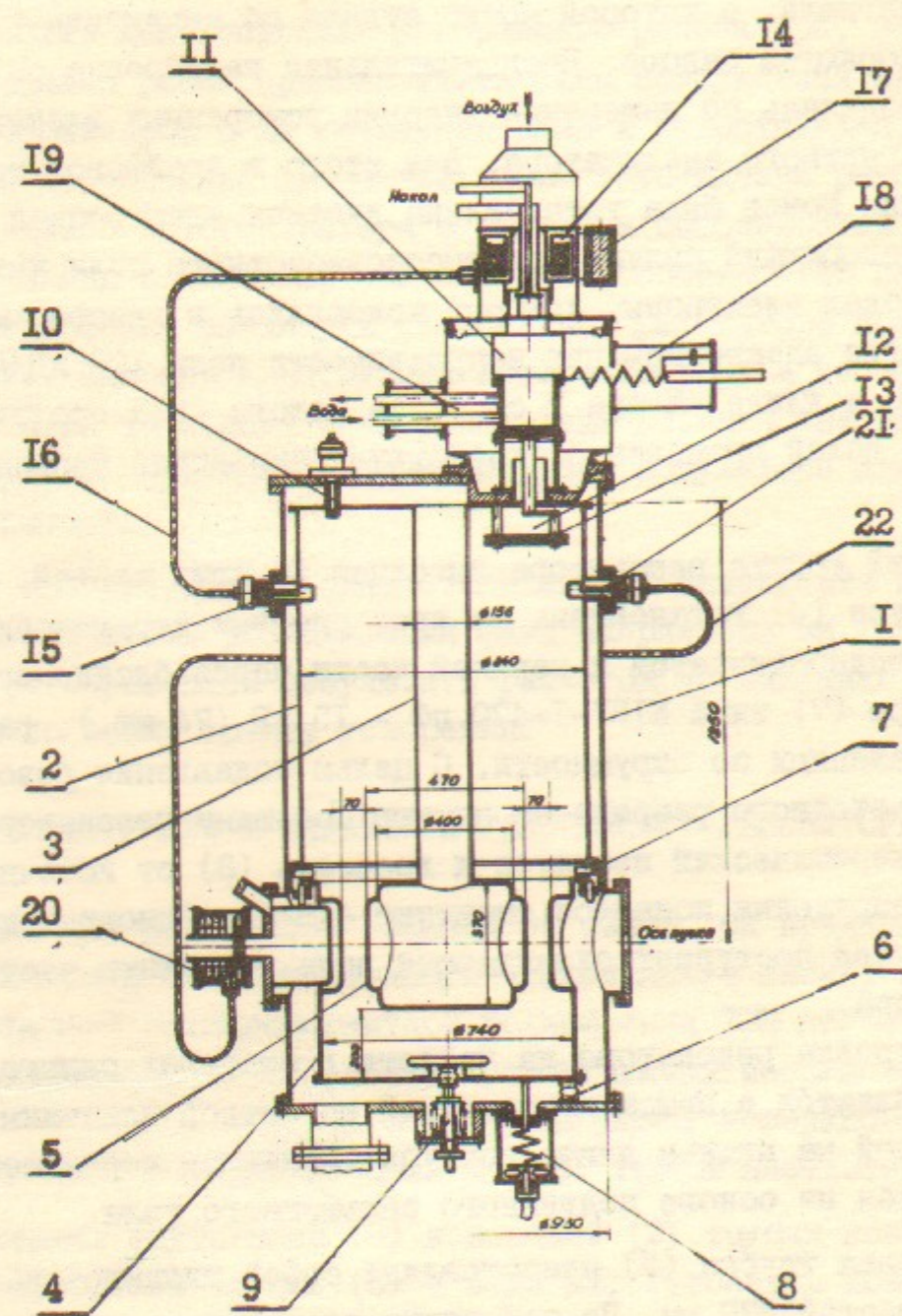


Рис. I. Общий вид резонатора ускорителя.

Соосность дрейфовой трубки с выпускным и впускным каналом достигается с помощью трех регулировочных винтов на верхней крышке резонатора за счет ее прогиба.

Измеренная добротность резонатора 8700, шунтовое сопротивление 580 кОм.

2. 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 выполнять по схеме самовозбуждения. Частота колебаний автогенератора при этом определяется самим резонатором.

Во многих опубликованных работах, относящихся к ускорительной технике, таких, например, как [2, 3, 4, 5] подробно рассматриваются преимущества и недостатки различных схем возбуждения ускоряющих резонаторов в метровом диапазоне длин волн.

В работе [4] описана установка по измерению электрической прочности ускоряющего промежутка, где для возбуждения тороидального резонатора с выступами на частоте 150 МГц и добротности $20 \cdot 10^3$ используется высокочастотный генератор с положительной обратной связью через резонатор. Высокочастотный блок оконечного усилителя смонтирован непосредственно на резонаторе. Петля связи оконечного каскада отделена от вакуумного объема резонатора круглой диэлектрической диафрагмой из стеклоткани, пропитанной эпоксидной смолой. Линия обратной связи снабжена фазовращателем.

В работе [5] обсуждается схема питания высокодобротного резонатора от автогенератора, где связь анодного контура автогенератора с резонатором осуществляется с помощью фидера некоторой длины. В такой системе в переходном режиме при импульсной работе могут возникнуть паразитные колебания, энергия которых запасается в выходном контуре и линии связи. В линию связи вводится "гасящее" сопротивление. Место его подключения выбирается так, чтобы оно, по возможности, увеличивало затухание системы

для паразитных колебаний и мало сказывалось на затухании основного вида. Следует сказать, что такая схема питания резонатора широкого распространения в ускорительной технике не получила.

В работе [2] описан протонный инжектор модели кольцевого фазотрона на основе тороидального резонатора с выступами на частоте 60 МГц. Для питания резонатора 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 Сак (схема генератора с заземленной сеткой), что позволило избежать дополнительного ввода в вакуумный объем. 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 пропусках 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 (~ 1 кВ). 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 работе [3] описана весьма распространенная схема возбуждения резонатора ускорителя на частоте 6,4 МГц мощностью 8 МВт от двухкаскадного генератора, охваченного обратной связью через высокочастотный 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 к.п.д.

генератора первый каскад можно поставить 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 большой крутизной, сокращая время нарастания колебаний в резонаторе. Сигнал с подвозбудителя падает непосредственно на вход первого каскада генератора. Генератор связан с резонатором посредством длинного фидера.

В отличие от существующих ускорителей, описанных в указанных выше работах, в рассматриваемом случае для питания резонатора ускорителя используется автогенератор на мощном импульсном высокочастотном триоде типа ГИ-27А по схеме с общей сеткой, причем конструктивно ускоряющая структура (резонатор) и источник высокочастотной мощности (генераторная лампа) объединены в единую систему. Лампа автогенератора расположена непосредственно на резонаторе без применения промежуточного фидера. Использование такой схемы обеспечивает существенное упрощение конструкции ускорителя и его эксплуатацию.

Общий вид автогенератора показан на рис.2. Генераторная лампа (II) установлена на вакуумном керамическом изоляторе (25). Связь анодного контура с резонатором осуществляется с помощью индуктивной петли (I2). Настройка анодного контура (неоперативным образом, связанным с развакуумированием резонатора) производится изменением емкости конденсатора (I3), выполненного в виде системы параллельных круглых пластин с вакуумным зазором. Указанный конденсатор одновременно является разделительным для анодного питания лампы. Анодная цепь автогенератора, состоящая из выходной емкости лампы, распределенных реактивных параметров анода и анодного водяного бачка, сопротивления петли связи и сопротивления, вносимого из резонатора в элемент связи, представляет собой двухконтурную систему, где одна из частот связи оказывается близкой к собственной резонансной частоте высокочастотного объемного резонатора, которая и определяет частоту колебаний автогенератора. Величина связи с резонатором определяется площадью петли связи и настройкой собственно анодного контура относительно частоты генератора.

На анод лампы по полиэтиленовым трубам (19) подается охлаждающая вода. В ту же точку через дроссель (18) по кабельному вводу (24) поступает импульс анодного питания. Сетка лампы по высокой частоте заземлена через блокировочные конденсаторы (23).

В автогенераторе применена внешняя обратная связь через резонатор. Настройка величины коэффициента обратной связи и его фазы при настроенном в резонанс катодном контуре осуществляется управляемым фазовращателем включенным в фидер обратной связи (16) и изменением площади петли обратной связи (15), введенной в полость резонатора (см. рис. 1).

Катодный контур (14), настроенный на частоту резонатора, для согласования входного сопротивления лампы ($R_{вх} = 11 + j13 \text{ Ом}$) с волновым сопротивлением фидера обратной связи (кабель РК-50-17-12) выполнен в виде высокочастотного ферритового автотрансформатора с коэффициентом трансформации $K_{тр} = 1:2$ [6].

Настройка катодного контура осуществляется с помощью внешнего магнитного поля, налагаемого на ферритовый сердечник (2 кольца феррита 60НН - $K180 \times 110 \times 20$). Магнитное поле создается электромагнитом (17), между полюсами которого размещен катодный контур.

Применение указанной конструкции катодного контура обеспечивает уменьшение габаритов контура, выполнение условий согласования входного сопротивления лампы с волновым сопротивлением фидера обратной связи и, наконец, осуществление бесконтактной настройки контура на нужную частоту.

Высокочастотная импульсная мощность потерь в стенках резонатора при напряжении на зазоре резонатора $U_p = 700 \text{ кВ}$. и шунтовом сопротивлении $R_{ш} = 580 \text{ кОм}$. составляет $\sim 450 \text{ кВт}$. Выбор лампы ГИ-27А, способной отдать большую высокочастотную мощность, чем это требуется по активным потерям в резонаторе обосновывается другими соображениями. А именно, возможность ускорения сравнительно больших токов и возможность получения предельных напряженностей электрического поля в ускоряющем зазоре. Кроме того, с целью уменьшения времени нарастания напряжения на ускоряющем зазоре лампы автогенератора приходится ставить в перенапряженный режим, что связано с уменьшением отдаваемой ею мощности.

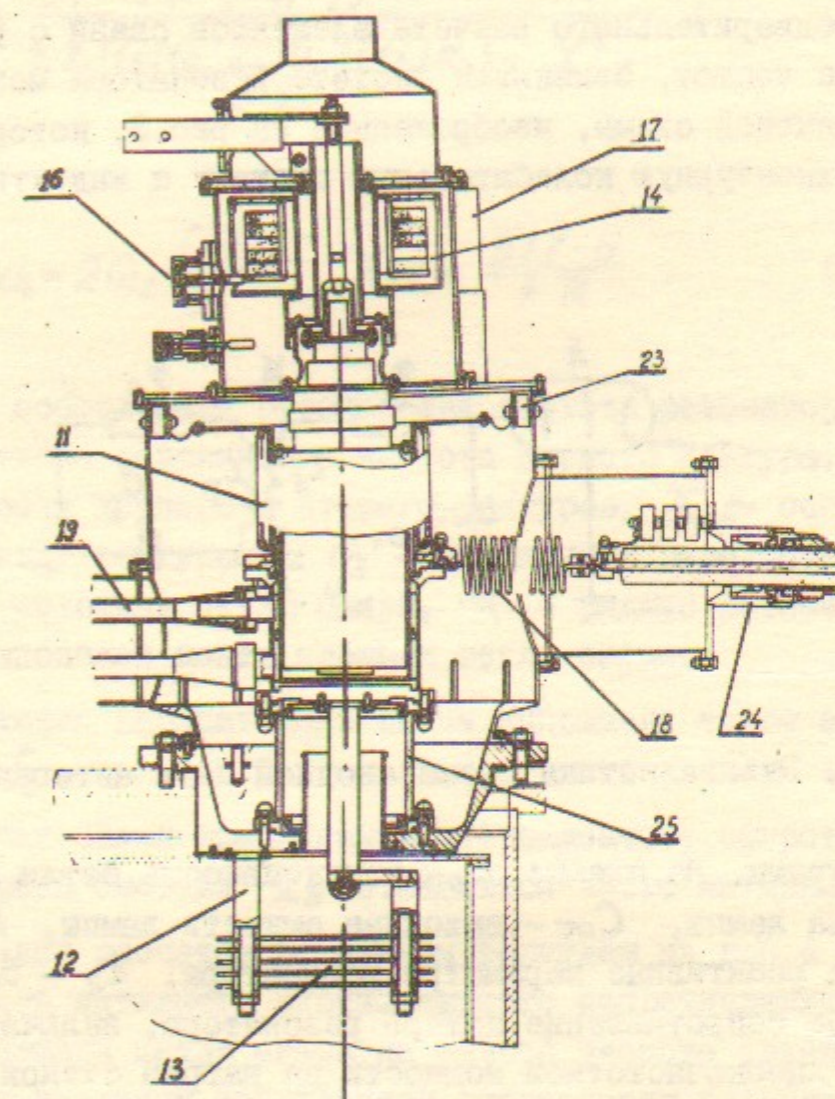


Рис. 2. Общий вид автогенератора.

3. СВЯЗЬ АВТОГЕНЕРАТОРА С РЕЗОНАТОРОМ

Как видно из рис.2 анодная цепь автогенератора, состоящая из выходной емкости лампы, распределенных реактивных параметров анодного водяного бачка, анодного ввода, петли связи и резонатора, представляет собой довольно сложную колебательную систему. Для предварительного расчета элементов связи с резонатором в диапазоне частот, близких к частоте резонатора можно исходить из эквивалентной схемы, изображенной на рис.3, которая характеризует двухконтурную колебательную систему с индуктивной связью

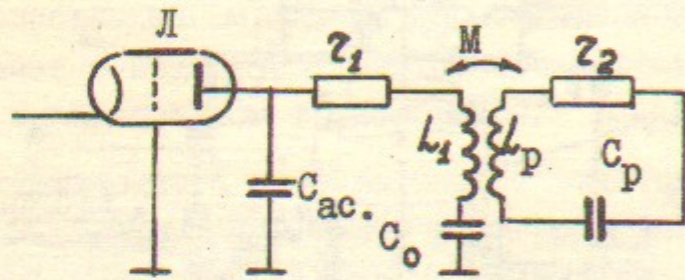


Рис.3. Эквивалентная схема анодной цепи автогенератора.

между контурами. На схеме: L_1 — индуктивность петли связи и анодного вывода лампы, C_{ac} — выходная емкость лампы, L_p, C_p — эквивалентные реактивные параметры резонатора, Z_2 — последовательное активное сопротивление потерь резонатора, включающее в себя как потери высокочастотной мощности на нагрев стенок резонатора, так и на ускорение пучка, C_0 — разделительная емкость петли связи.

Задача расчета элементов связи с резонатором заключается в том, чтобы выбором собственной частоты первого контура и взаимной индуктивности M (т.е. подбором определенной площади петли связи) обеспечить пересчет сопротивления Z_2 из второго контура на одной из частот связи двухконтурной системы (очевидно, что эта частота связи должна быть близкой к собственной резонансной частоте резонатора) в требуемое эквивалентное сопротивление анодной нагрузки автогенератора.

На основании теории связанных контуров [7] можно вывести выражение для эквивалентного сопротивления двухконтурной колебательной системы относительно анода лампы в зависимости от частоты.

$$Z_3 = \frac{\rho_1^2 z_2 (1 + ja_2) - j \rho_1 X_{cb}^2 \frac{f_1}{f}}{z_1 z_2 \left(1 + jQ_1 \frac{f - f_1}{f \cdot f_1}\right) (1 + ja_2) + X_{cb}^2}; \quad (3.1)$$

$$a_2 = 2Q_2 \frac{f - f_2}{f_2}; \quad X_{cb} = \frac{377 \cdot S}{\lambda \cdot R}; \quad (3.2)$$

Здесь, f_2 — собственная резонансная частота резонатора, f_1 — собственная резонансная частота первого контура, Q_1, Q_2 — добротности первого и второго контуров, X_{cb} — сопротивление связи между контурами, a_2 — обобщенная расстройка резонатора, S — площадь петли связи, R — радиус резонатора, на котором расположен центр площади петли связи.

Конструктивно анодная цепь лампы выполнена таким образом, что $f_1 > f_2$.

На частотах связи комплексное эквивалентное сопротивление двухконтурной системы Z_3 становится чисто активным.

На основании расчетов по данным формулам на рис.4 приведена зависимость активного эквивалентного сопротивления на аноде от площади петли связи на нижней частоте связи для нескольких значений нагруженной добротности резонатора при следующих параметрах связанной системы контуров:

$$\begin{aligned} C_{ac} &= 45 \text{ пф}, & C_0 &= 156 \text{ пф}, & \rho_1 &= 90 \text{ Ом}, \\ Q_1 &= 500, & Q_2 &= 8700, & z_1 &= 0,18 \text{ Ом}, \\ z_2 &= 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}, & f_2 &= 30 \text{ МГц}, & R &= 29 \text{ см}. \end{aligned}$$

На расчетных кривых указаны значения обобщенной расстройки резонатора относительно генерируемой частоты автогенератора.

При требуемом значении эквивалентного сопротивления на аноде лампы $R_{\text{э}} = 145 \text{ Ом}$ при настройке первичного контура на частоту 50 МГц площадь петли связи должна быть равна 70 см^2 , что соответствует фактически установленной величине.

Соответственно, при уменьшении добротности резонатора (т.е. при подгрузке резонатора пучком ускоряемых частиц) площадь петли связи должна быть увеличена на соответствующую величину. С другой стороны, настраивая первичный контур на частоту более близкую к собственной резонансной частоте резонатора, то же самое требуемое значение эквивалентного сопротивления можно получить при меньшей площади петли связи (см. рис. 5).

4. ПРОЦЕСС УСТАНОВЛЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ АВТОГЕНЕРАТОРА ПРИ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ЧЕРЕЗ ВЫСОКОДОБОТНЫЙ РЕЗОНАТОР

Процесс установления колебаний в резонаторе ускорителя можно качественно исследовать на основании эквивалентной схемы, приведенной на рис. 6, при следующих предположениях:

1. Резонатор заменен колебательным контуром со средоточенными параметрами L_2, C_2, z_2 .

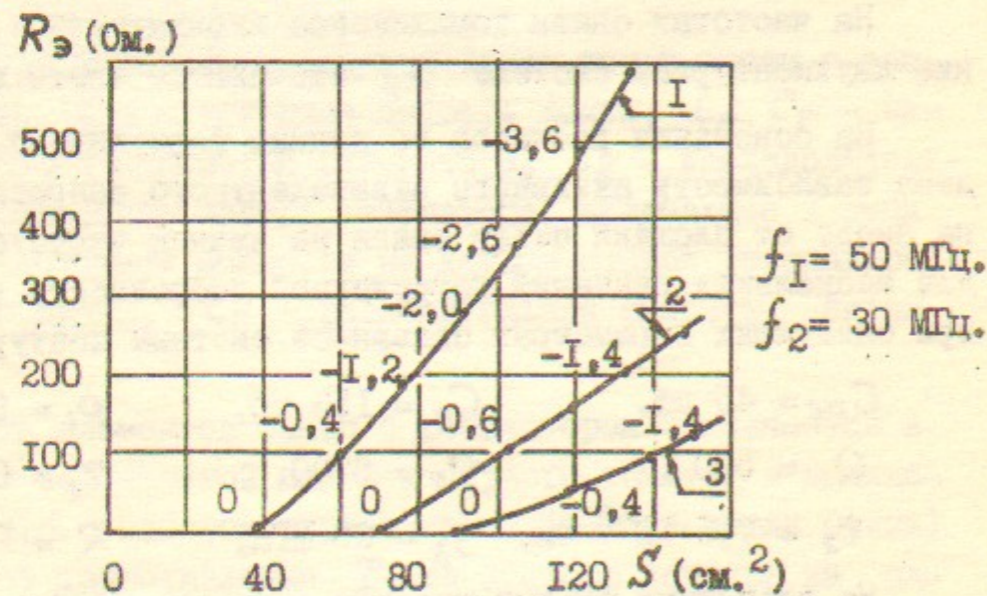


Рис. 4. Зависимость активного эквивалентного сопротивления на аноде лампы от площади петли связи.
1 - $Q_2 = 8700$, 2 - $Q_2 = 3000$, 3 - $Q_2 = 1500$.

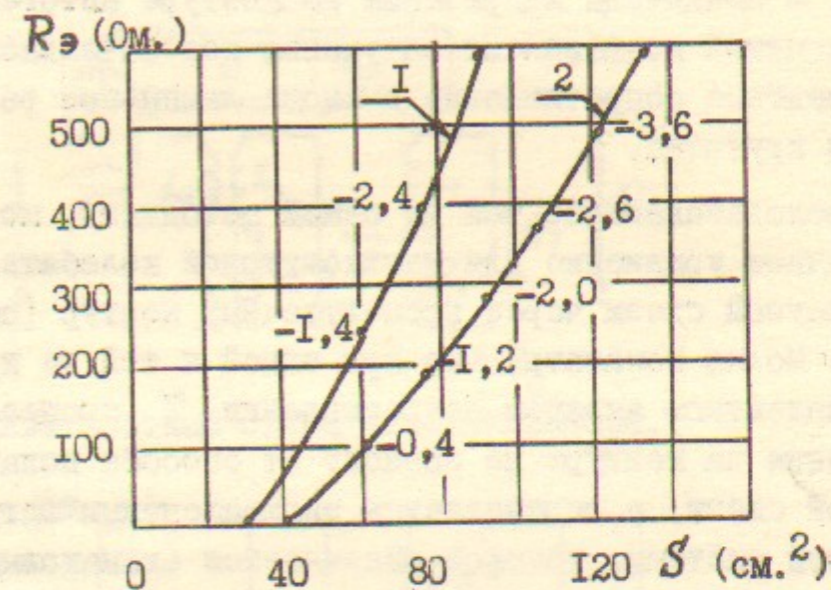


Рис. 5. Зависимость активного эквивалентного сопротивления на аноде лампы от площади петли связи при $Q_2 = 8700$,
 $f_2 = 30 \text{ МГц}$,
1 - $f_1 = 40 \text{ МГц}$, 2 - $f_1 = 50 \text{ МГц}$.

2. В системе имеет место одночастотный режим, т.е. на лампе и элементах схемы имеется помимо постоянной составляющей переменное напряжение одной гармоники. Частота колебаний, генерируемая системой, близка к собственной резонансной частоте промежуточного контура (L_2, C_2).

3. Цепь обратной связи заменена идеальным трансформатором с взаимной индуктивностью M , при чем предполагается, что ток сетки отсутствует.

Метод медленно меняющихся амплитуд получил широкое распространение в теории колебаний при изучении процессов установления колебаний в колебательной системе. В работе [8] дан подробный анализ укороченных уравнений для обычной двухконтурной колебательной системы, когда напряжение обратной связи на сетку лампы поступает с анодного контура.

Укороченное уравнение для одночастотного режима колебаний имеет вид:

$$\frac{d\bar{I}}{dt} + \bar{I} \cdot \delta [1 - 2 \cdot S_1(\bar{I})] = 0 ; \quad (4-1)$$

где ζ — амплитуда напряжения на контуре автогенератора, δ — эквивалентный коэффициент затухания колебательной системы, Z — эквивалентное сопротивление в аноде лампы при резонансе, $S_1(\zeta)$ — средняя крутизна.

Воспользовавшись той же самой методикой, можно вывести аналогичное уравнение для двухконтурной колебательной системы при обратной связи через промежуточный контур (объемный резонатор). Можно показать, что при одной и той же крутизне $S_1(\zeta)$ и эквивалентном анодном сопротивлении Z процесс нарастания напряжения на контуре не зависит от способа подачи напряжения обратной связи, а определяется эквивалентным затуханием колебательной системы, которое оказывается одинаковым для обеих схем.

При наличии высокой добротности резонатора эквивалентное затухание определяется только резонатором, т.е. $\delta \approx d$.

В уравнение входит средняя крутизна лампы $S_1(\zeta)$, которая изменяется в течение всего переходного режима до момента установления стационарной амплитуды. Каждому значению амплитуды колебаний соответствует определенная величина средней крутизны.

Среднюю крутизну лампы определяет колебательная характеристика автогенератора, которая представляет собой зависимость первой гармоники анодного тока от переменного напряжения на анодном контуре, т.е. $I_{a1} = f(U_a)$ или в относительных величинах, $y_{a1} = f(\zeta)$, $\zeta = U_a / E_a$.

Колебательная характеристика автогенератора, рассчитанная по методике работы [14], показана на рис.7. Там же приведена нагрузочная прямая $y_{a1} = \zeta / \nu \cdot S \cdot R_a$ для $\nu = 1$, $S = 200 \text{ mA/V}$, $R_a = 145 \text{ Ом}$ в критическом режиме.

Результаты численного решения этого уравнения приведены на рис.8. для трех значений анодной нагрузки и двух значений начальной амплитуды колебаний. Из рисунка видно, что время нарастания колебаний существенно зависит от напряженности режима генератора и от начальной амплитуды на контуре. Этот вопрос имеет важное значение для импульсных однокаскадных автогенераторов, т.к. задержка импульса высокочастотного на-

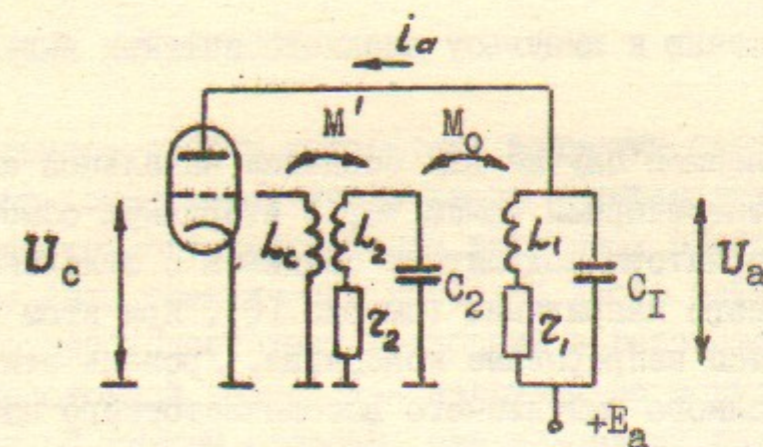


Рис.6. Эквивалентная схема автогенератора.

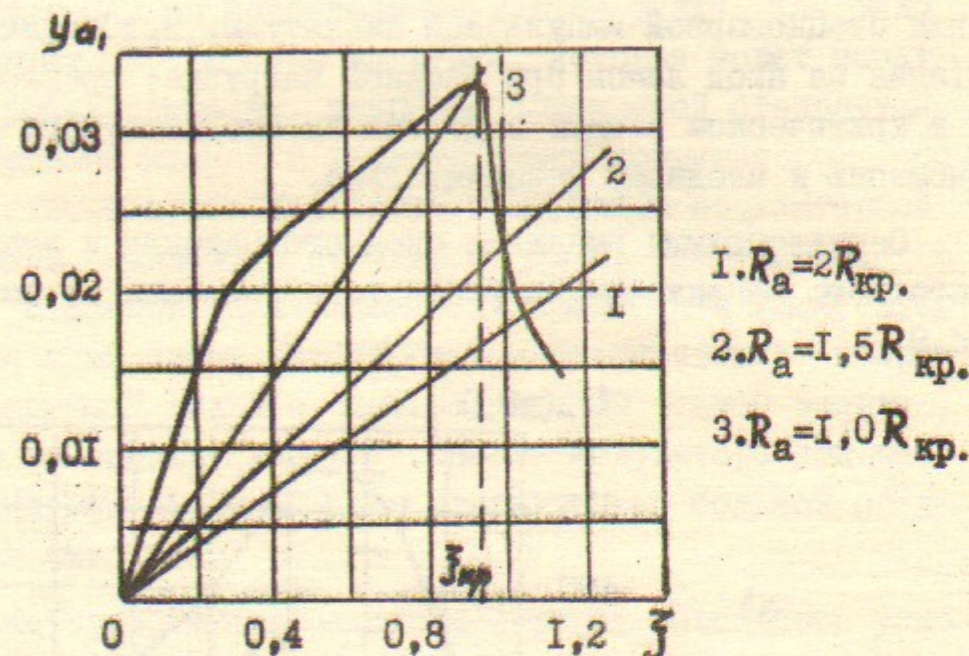


Рис.7. Колебательная характеристика генератора и нагрузочные прямые.

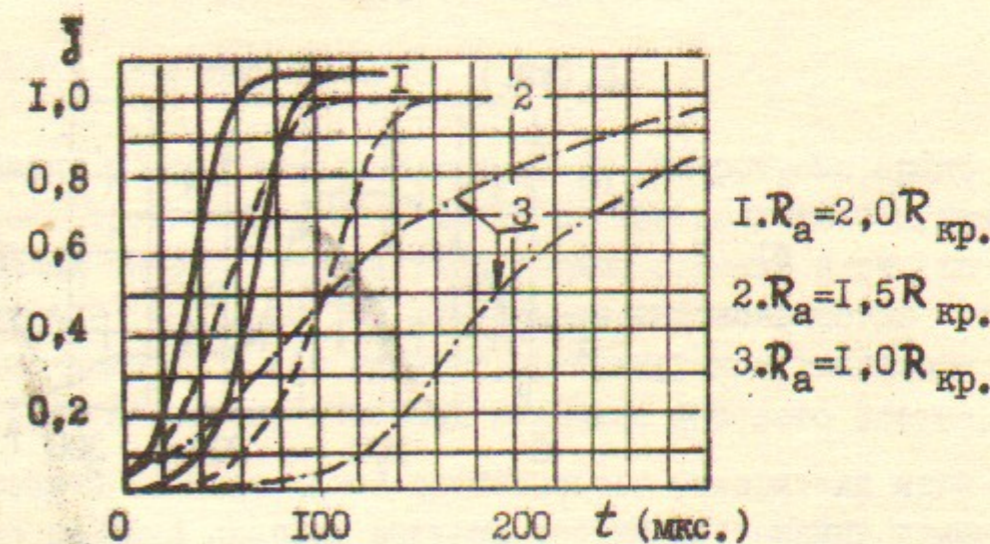


Рис.8. Процесс установления амплитуды колебаний.

пряжения по отношению к импульсу анодного питания нежелательна.

В рассматриваемом случае для создания начальной амплитуды колебаний анод генераторной лампы через вторичную обмотку импульсного трансформатора модулятора соединен с отдельным источником постоянного напряжения (см. рис. 10). При этом в генераторе возбуждаются непрерывные колебания. Уровень этих колебаний (2-5% от полного импульсного высокочастотного напряжения) достаточен, чтобы преодолеть порог возникновения резонансного высокочастотного разряда и существенно сократить время установления стационарной импульсной амплитуды. При подаче импульсного питания на анод лампы при анодной нагрузке, превышающей нагрузку в критическом режиме задержка высокочастотного импульса по отношению к анодному незначительна.

Осциллограммы импульса анодного питания и импульса высокочастотного напряжения на резонаторе показаны на осциллограммах рис. 9.

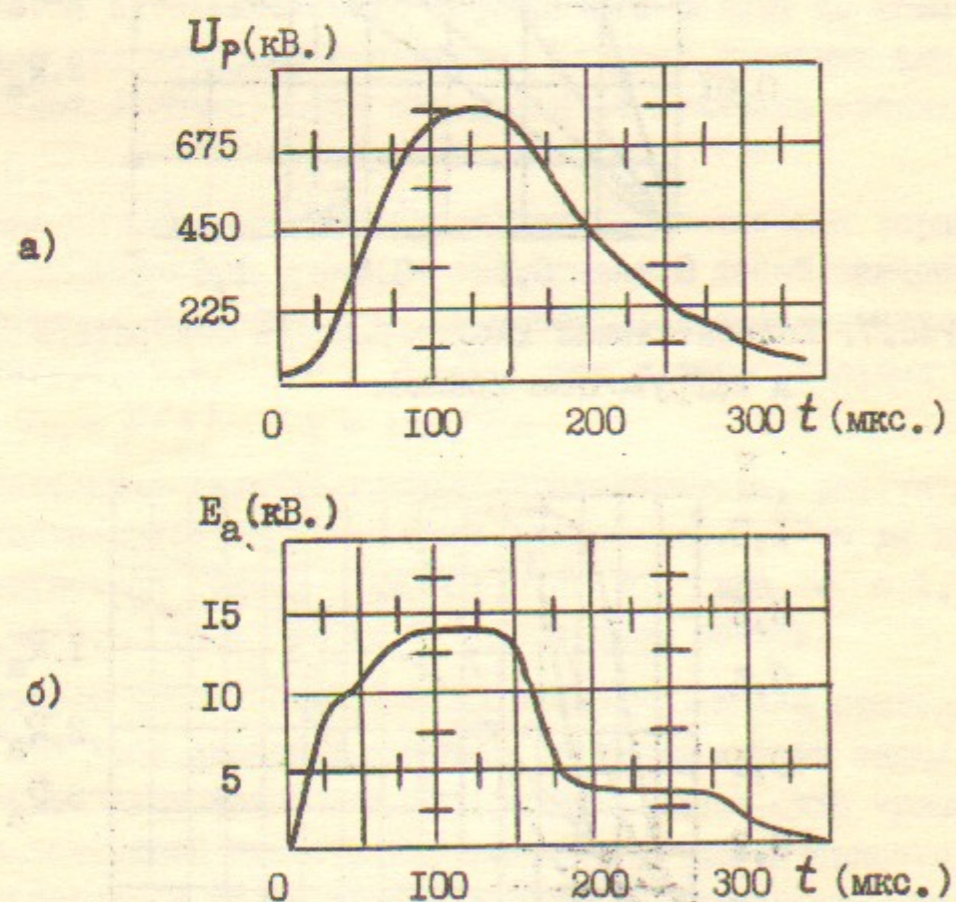


Рис. 9. Осциллограммы импульсов работы ускорителя.
а) Форма импульса высокочастотного напряжения на ускоряющем резонаторе; б) Импульс анодного питания.

5. СХЕМА МОДУЛЯТОРА

В процессе работы ускорителя возможны нарушения нормального режима генератора, когда из-за возникновения резонансного высокочастотного разряда или вакуумных пробоев в ускоряющем зазоре (что практически наиболее часто случается) происходит срыв высокочастотных колебаний в резонаторе и сопротивление генераторной лампы, как нагрузки на модулятор, скачком возрастает. С другой стороны, при возможных внутриламповых пробоях или других высоковольтных цепях генератора модулятор работает практически на короткозамкнутую нагрузку. Как было указано в работах [9, 10] при нагрузке, которая может меняться в таких широких пределах, наиболее приемлемой становится схема с формирующей линией и газоразрядным коммутатором по сравнению со схемой с накопительной емкостью и модуляторной "жесткой" лампой. Однако, в отличие от схем, приведенных в этих работах, в данной схеме применен тиристорный коммутатор и используется иная схема регулировки и стабилизации напряжения на формирующей линии с соответствующей схемой защиты, что позволило обеспечить надежную работу модулятора при частоте следования импульсов 50 Гц и сравнительно большой средней мощности в нагрузке.

Упрощенная принципиальная схема питания резонатора ускорителя совместно со схемой анодного модулятора показана на рис. 10. Подробное описание схемы модулятора приведено в работе [11].

6. ДИНАМИКА ДВИЖЕНИЯ ИОНОВ

К линейному ускорителю, как инжектору синхротрона, предъявляются особые требования. От него требуется получение пучка с довольно малым энергетическим разбросом в ступке и от импульса к импульсу ($10^{-2} + 10^{-3}$), стабильной интенсивностью во времени в необходимом, и как правило, регулируемом диапазоне выходной энергии и при определенной величине фазового объема.

Существенной отличительной особенностью ускорителя является довольно высокий прирост энергии частиц на единицу длины

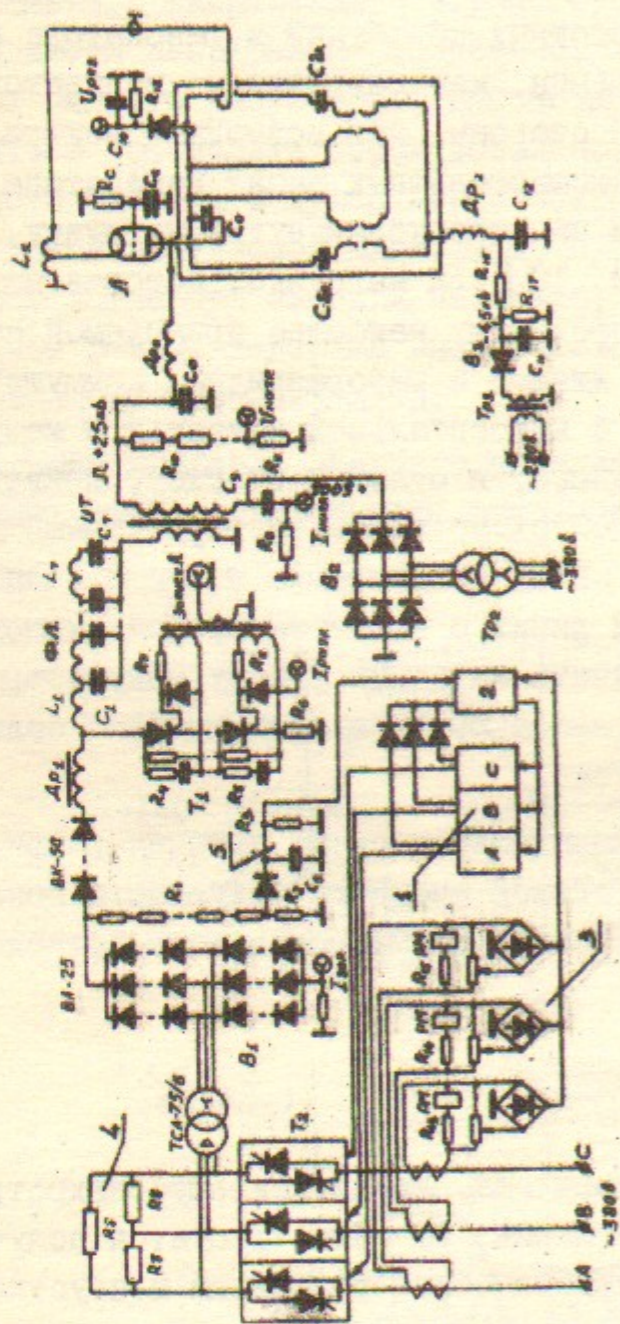


Рис. 10. Принципиальная схема питания резонатора ускорителя.

ускоряющих зазоров (~ 100 КэВ/см) при сравнительно малой энергии инжекции (~ 50 КэВ). Чтобы реализовать оптимальный режим ускорения, необходимо обеспечить определенные условия входа пучка в первый ускоряющий зазор. Знание этих условий является основой при выборе оптики источника ионов и его фокусирующей системы, а также оптики первого ускоряющего зазора.

При анализе процессов ускорения и формирования пучка в основном использовались численные методы решения соответствующих уравнений движения.

В качестве источника протонов применен источник с разрядом типа Пеннинга с холодным катодом. Для фокусировки протонного пучка применена одиночная электростатическая линза. Подробное описание источника приведено в работе [12].

Энергетический разброс на выходе ускорителя определяется в первую очередь самой ускоряющей структурой, а также стабильностью высокочастотного питания и начальной энергии инжектированных частиц. Расчеты показывают, что при определенных значениях напряженности поля в резонаторе существует максимальная область входных фаз, для которых разброс выходной энергии не превышает $\pm 1\%$. Для протонов эта область входных фаз $\Delta\varphi \approx 40^\circ$ при $E = 100$ кВ/см. (см. рис. 11).

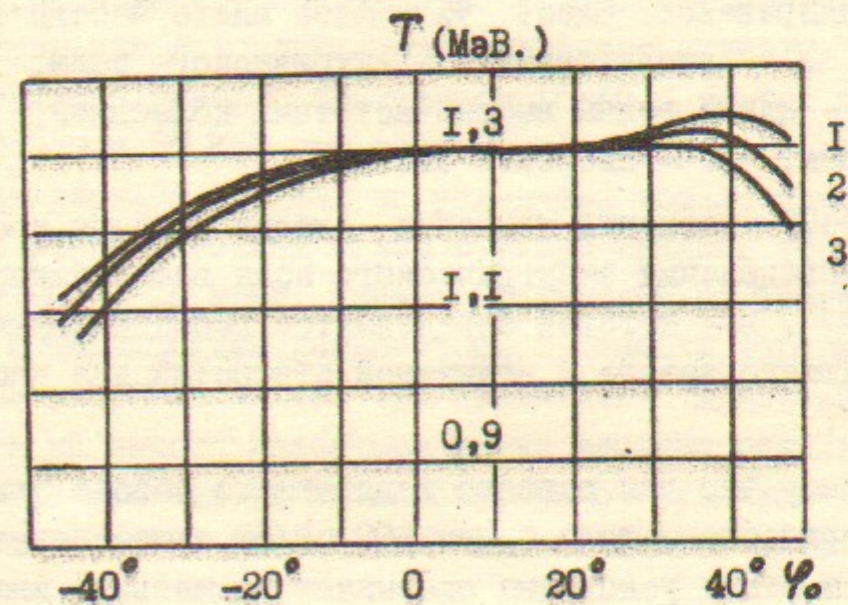


Рис. 11. Зависимость энергии протонов на выходе ускорителя от фазы влета при различных энергиях инжекции. 1. $T = 50$ КэВ, 2. $T = 40$ КэВ, 3. $T = 30$ КэВ.

Представляет интерес учесть влияние пространственного заряда пучка на динамику ионов, а также влияние изменения амплитуды высокочастотного поля вдоль ускоряющего зазора с отверстиями для прохождения пучка.

Уравнения продольного и радиального движения заряженной частицы с массой m и зарядом e можно привести к системе четырех дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi}{dz} &= \frac{2\pi}{\beta \cdot \lambda}; \\ \frac{d\beta}{dz} &= \frac{eE \cdot f(z)}{m \cdot c^2 \cdot \beta} \cdot \sin(\varphi + \varphi_0); \\ \frac{dz}{dt} &= u; \\ \frac{du}{dz} &= \frac{eI}{2\pi \epsilon_0 \cdot z \cdot m (\beta c)^3} - \frac{eE \cdot z}{2m (\beta c)^2} \cdot \frac{df(z)}{dz} \cdot \sin(\varphi + \varphi_0) - \frac{u}{\beta} \cdot \frac{d\beta}{dz}; \end{aligned} \quad (6-1)$$

Указанная система уравнений при соответствующих начальных условиях полностью определяет динамику движения ионов в приближении заданного поля резонатора с учетом объемного заряда пучка. Система приведена к виду, удобному для численного интегрирования на ЭВМ, и позволяет в любой точке по координате z определить координату z , угол наклона траектории к оси движения, энергию иона и фазу по отношению к высокочастотному ускоряющему напряжению. Здесь φ_0 — фаза влета частиц в ускоряющий зазор, E — напряженность электрического поля, I — ток пучка, λ — длина волны высокочастотных колебаний, β — скорость частицы, c — скорость света.

В систему уравнений движения входит функция пространственного распределения электрического поля вдоль ускоряющего зазора $f(z)$, вид которой определяется геометрическими размерами ускоряющего зазора и величиной отверстий для прохождения пучка [13].

Очевидно, что для первого ускоряющего зазора при напряженности электрического поля в нем 100 кВ/см существенное влияние на начальном этапе ускорения оказывают радиальные электрические поля у входного отверстия первого ускоряющего зазора. При энергии инжекции 50 КэВ первый зазор действует как фокусирующая линза с переменным фокусным расстоянием в зависимости от фазы

влета в зазор. Частицы при различных фазах влета из-за особенностей движения в переменных электрических полях получают на выходе из ускоряющего зазора довольно значительный разброс по радиальной координате и углам наклона траектории к оси, который в дальнейшем уже нельзя скомпенсировать электростатически или магнитными полями фокусирующих систем.

Для устранения влияния радиальных полей на входном и выходном отверстиях первого ускоряющего зазора установлены металлические сетки с проницаемостью $\sim 0,75$. Отсутствие сеток на втором ускоряющем зазоре, т.е. наличие радиальных электрических полей, уже в меньшей степени оказывается на движении пучка, так как энергия частиц на входе во второй зазор без сеток находится в пределах (0,5-0,7) МэВ.

При расчете ускоряющей системы целесообразно рассмотреть свойства пучка на фазовой плоскости, т.е. в координатах $z z'$, где z — поперечное смещение частицы от оптической оси, $z' = dz/dz$ — наклон траектории частицы к оптической оси, z — продольная координата. На фазовой плоскости частицы занимают определенную область, ограниченную замкнутой кривой — эллипсом. Величина эмиттанса, форма и наклон фазового эллипса на выходе ускоряющего резонатора при заданном токе ускоренных частиц определяют требования к каналу транспортировки до синхротрона.

На рис.12 показано преобразование фазового эллипса пучка в процессе ускорения для случая параллельного пучка на входе в первый ускоряющий зазор с эмиттансом $10 \cdot 10^{-3}$ см.рад при энергии инжекции протонов 50 КэВ при токе 25 мА. На рис.13 изображены те же характеристики при тех же условиях, только для сходящегося пучка на входе в первый зазор с углом наклона траектории крайней частицы — 10 мрад. Расчет произведен по уравнениям системы (6-1) в предположении равномерной плотности заряда по сечению пучка. Из рисунков видно, что ориентация "мгновенного" фазового эллипса на выходе инжектора из-за влияния радиальных полей второго зазора изменяется в зависимости от величины входной фазы. Происходит как бы увеличение "эффективного" эмиттанса пучка.

Схема измерения эмиттанса пучка источника показана на рис. 14. Измеряемый пучок сбрасывается на тонкую титановую фольгу ($\delta = 50$ микрон), в которой прорезаны узкие параллельные щели.

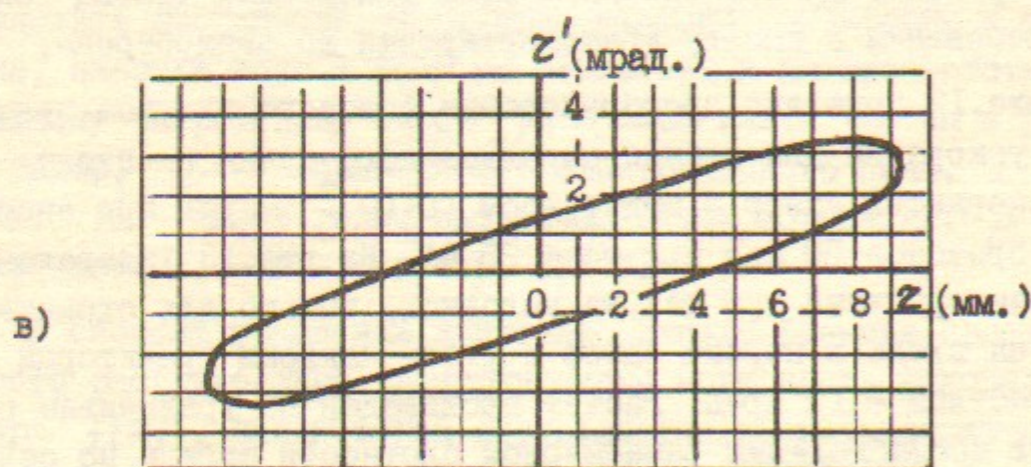
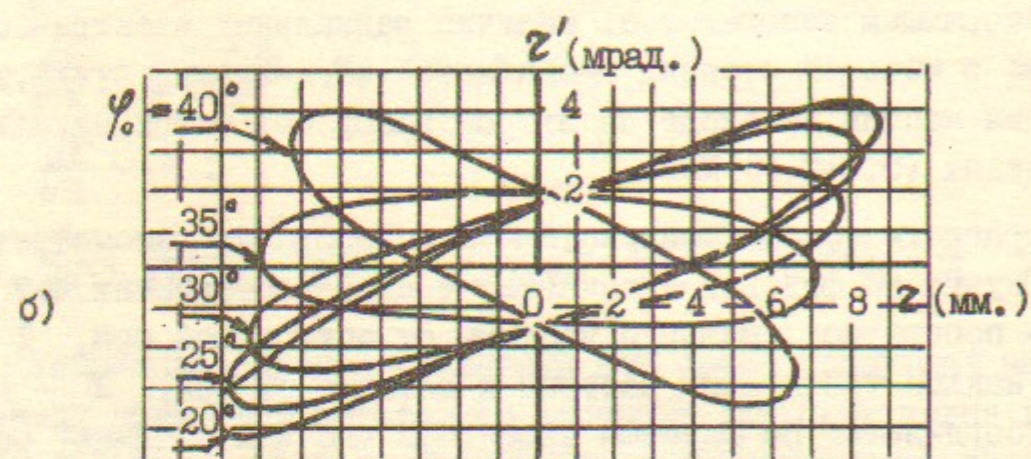
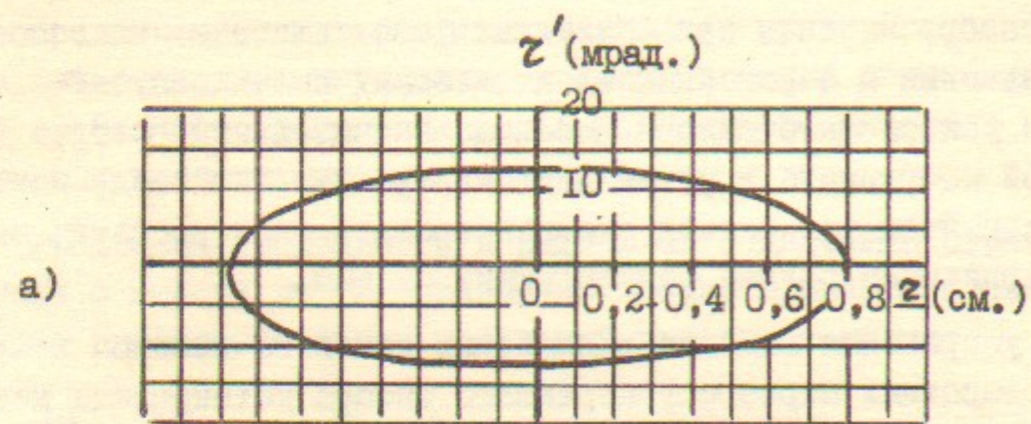


Рис.12. Преобразование фазового эллипса пучка протонов в процессе ускорения. а) фазовый эллипс пучка на входе второго зазора без сеток; б) фазовый эллипс на выходе второго зазора без сеток; в) фазовый эллипс на выходе второго зазора с сетками при тех же значениях входных фаз.

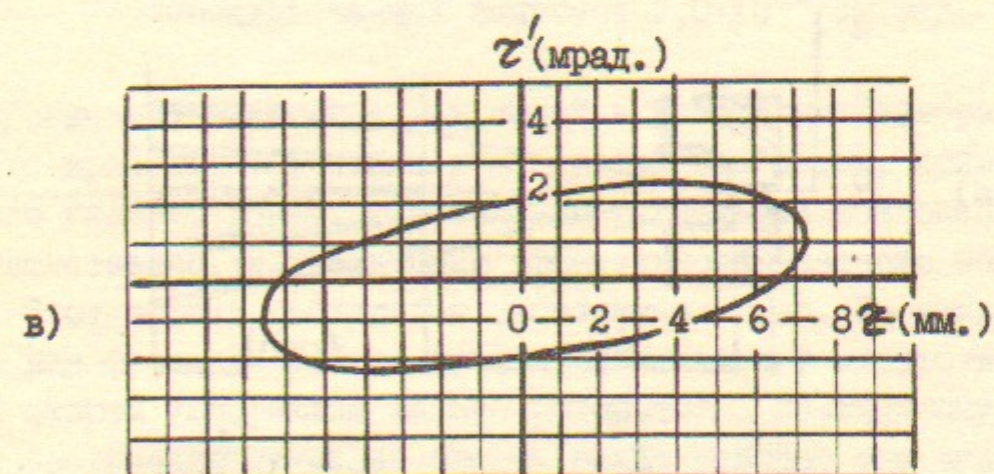
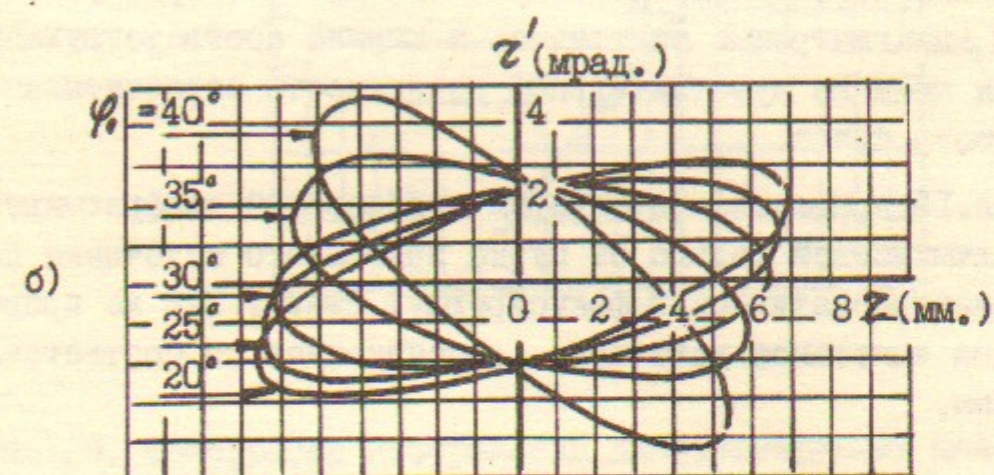
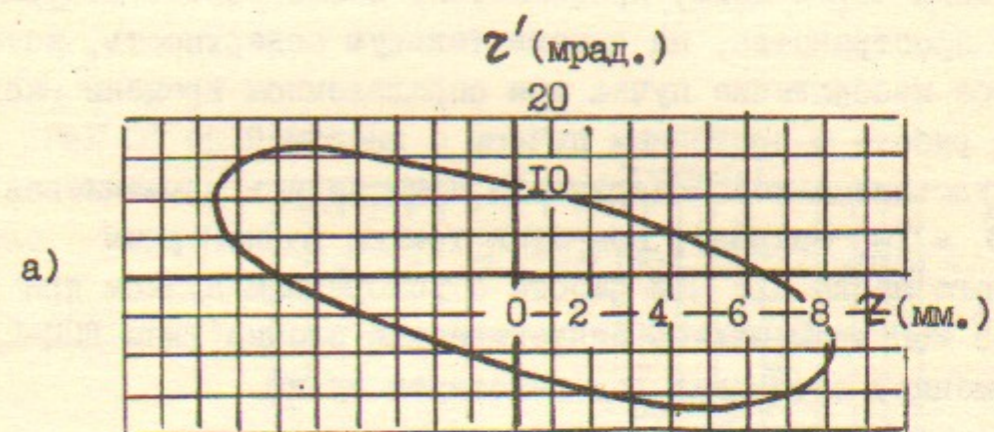


Рис.13. Преобразование фазового эллипса пучка протонов в процессе ускорения. Обозначения соответствуют рис.12.

Пучок, проходя через щели, принимается, после соответствующего дрейфового пространства, на чувствительную поверхность, которая дает видимое изображение пучка при определенном времени экспозиции. При работе с протонным пучком с энергией до 50 КэВ в качестве чувствительной поверхности применялась алюминиевая фольга ($\delta = 100$ микрон), покрытая тонким равномерным слоем диффузионного масла ДД. При работе с ускоренным пучком при энергии 1,5 МэВ применялась синтетическая пленка (типа ДЩ-2/25), которая изменяет свой цвет под действием пучка.

Положение какой-либо выбранной щели дает поперечную координату Z на диаграмме эмиттанса, а ширина соответствующего изображения щели на чувствительной поверхности пересчитывается в расходимость пучка.

На рис.15 приведена фотография изображений диафрагмирующих щелей на алюминиевой фольге от пучка протонного источника перед входом в электростатическую фокусирующую линзу. Там же приведена диаграмма эмиттанса источника, рассчитанная по соответствующим формулам.

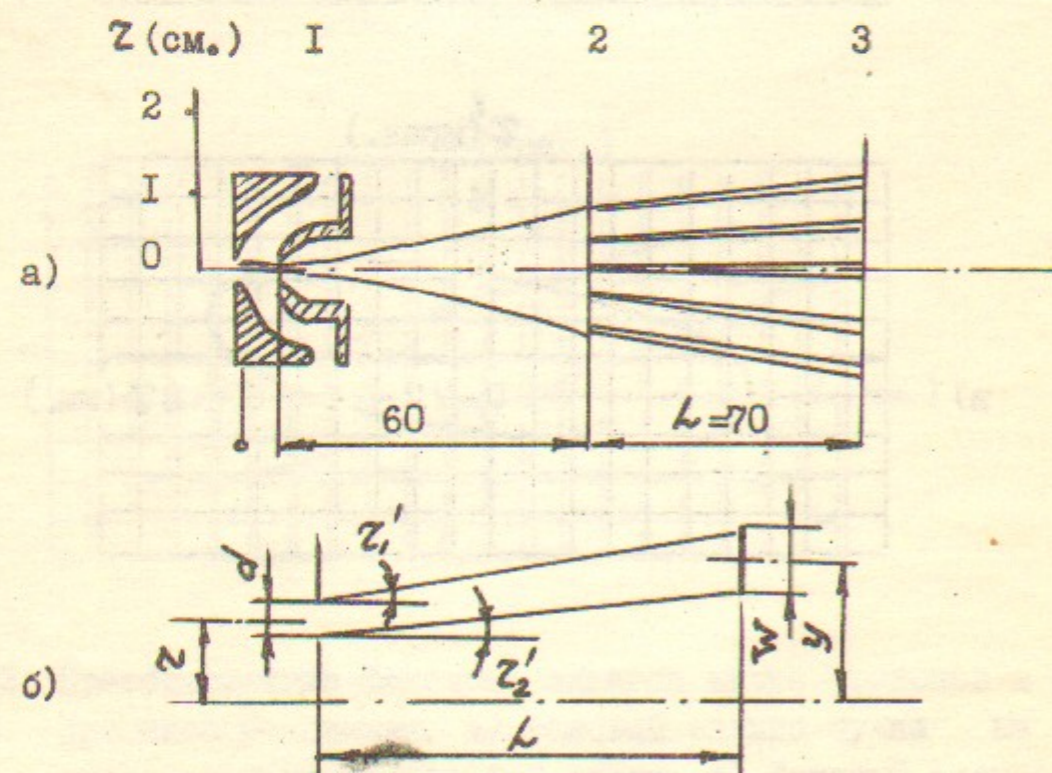


Рис.14. Схема измерения эмиттанса пучка протонного источника.

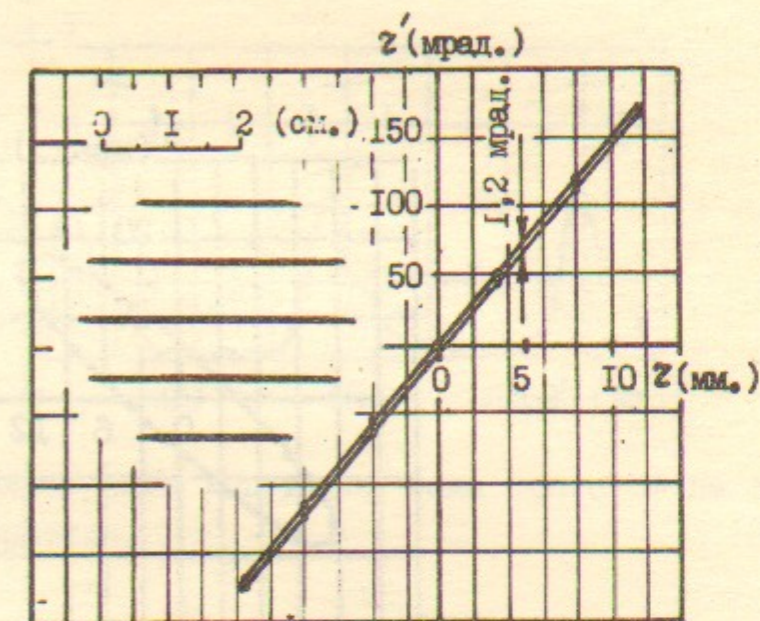
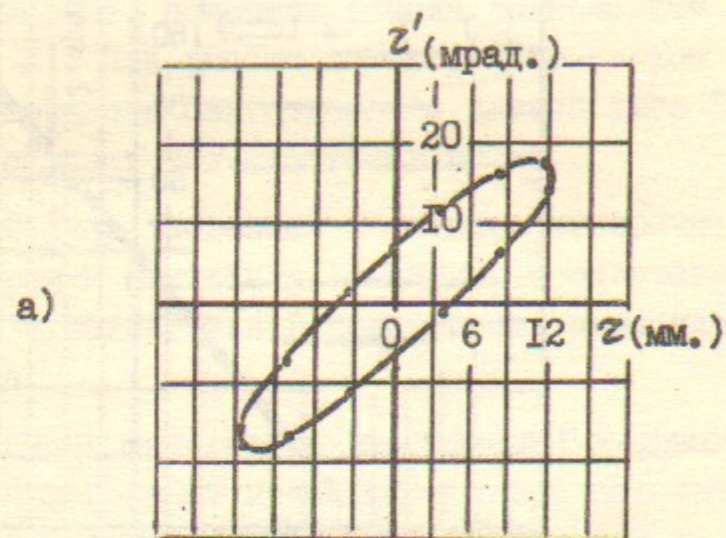


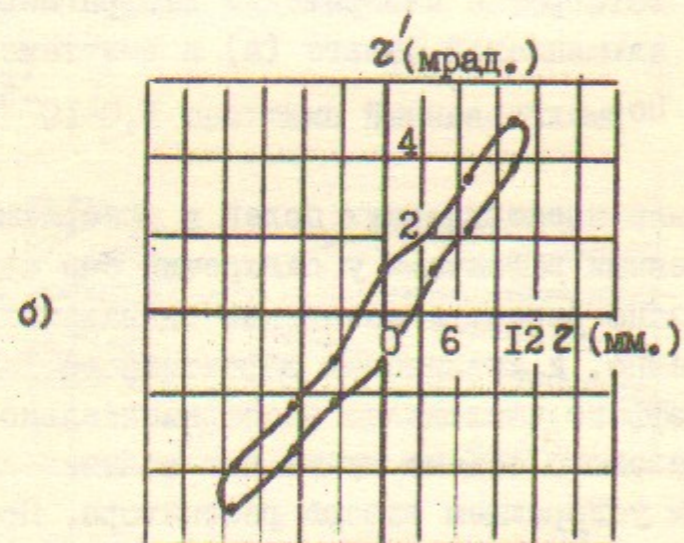
Рис.15. Фотография изображений диафрагмирующих щелей на алюминиевой фольге (а) и эмиттанс источника (б). Нормализованный эмиттанс $1,0 \cdot 10^{-5}$ см.рад.

Провисание электрических полей в ускоряющих зазорах, связанное с краевыми эффектами у отверстий без сеток, приводит, как было указано ранее, к появлению радиальных компонент поля и соответственно, к увеличению эффективного фазового объема пучка. Этот эффект наблюдался экспериментально. На рис.16 изображен вид фазового объема пучка при наличии и отсутствии сеток на втором ускоряющем зазоре резонатора. По-видимому, вопрос о постановке сеток во второй зазор решится при экспериментах при инжекции в синхротрон Б-5 при тщательной проверке соотношения потерь пучка с одной стороны из-за токооседания на сетках, а с другой стороны из-за увеличения эффективного фазового объема при отсутствии сеток.

Для регистрации ускоренных и сгруппированных ступок заряженных частиц был сконструирован и изготовлен высокочастотный цилиндр Фарадея коаксиальной конструкции с волновым



Нормализованный эмиттанс $40 \cdot 10^{-5}$ см.рад.



Нормализованный эмиттанс $5,1 \cdot 10^{-5}$ см.рад.

Рис.16. Эмиттанс пучка протонов на выходе ускорителя при отсутствии (а) и при наличии (б) сеток на втором ускоряющем зазоре.

сопротивлением 75 Ом, равным волновому сопротивлению кабеля, согласованному с входом скоростного осциллографа. Осциллограммы импульсов протонного тока на выходе из ускорителя показаны на рис.17.

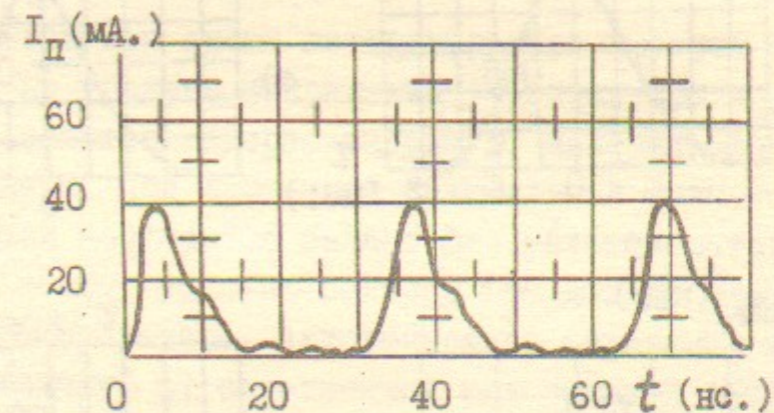


Рис.17. Осциллограммы импульсов тока протонов на выходе ускорителя.

На рис.18 приведены основные характеристики ускоренного пучка протонов на выходе ускорителя (в точке канала на расстоянии 45 см от второго ускоряющего зазора).

7. К ВОПРОСУ СТАБИЛИЗАЦИИ ФАЗ И АМПЛИТУД ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПОЛЕЙ В РЕЗОНАТОРАХ

Для получения требуемых выходных характеристик пучка таких как, моноэнергетичность и стабильность его энергии, необходимо обеспечить соответствующие точности стабилизации напряжения на ускоряющем резонаторе, на группирующем резонаторе и стабильность фазы между напряжениями этих резонаторов в требуемых пределах.

Выбор способа построения схем стабилизации и их исполнительных элементов тесно связан с заданными характеристиками основных узлов ускорителя. Этому предшествовало изучение и оценка основных факторов, определяющих нестабильность высокочастотных полей и их влияние на параметры пучка.

Решение проблемы стабилизации высокочастотного поля в резонаторе зависит от заданных выходных параметров ускоренного пучка, связанных с условиями инжекции в синхротрон Б-5.

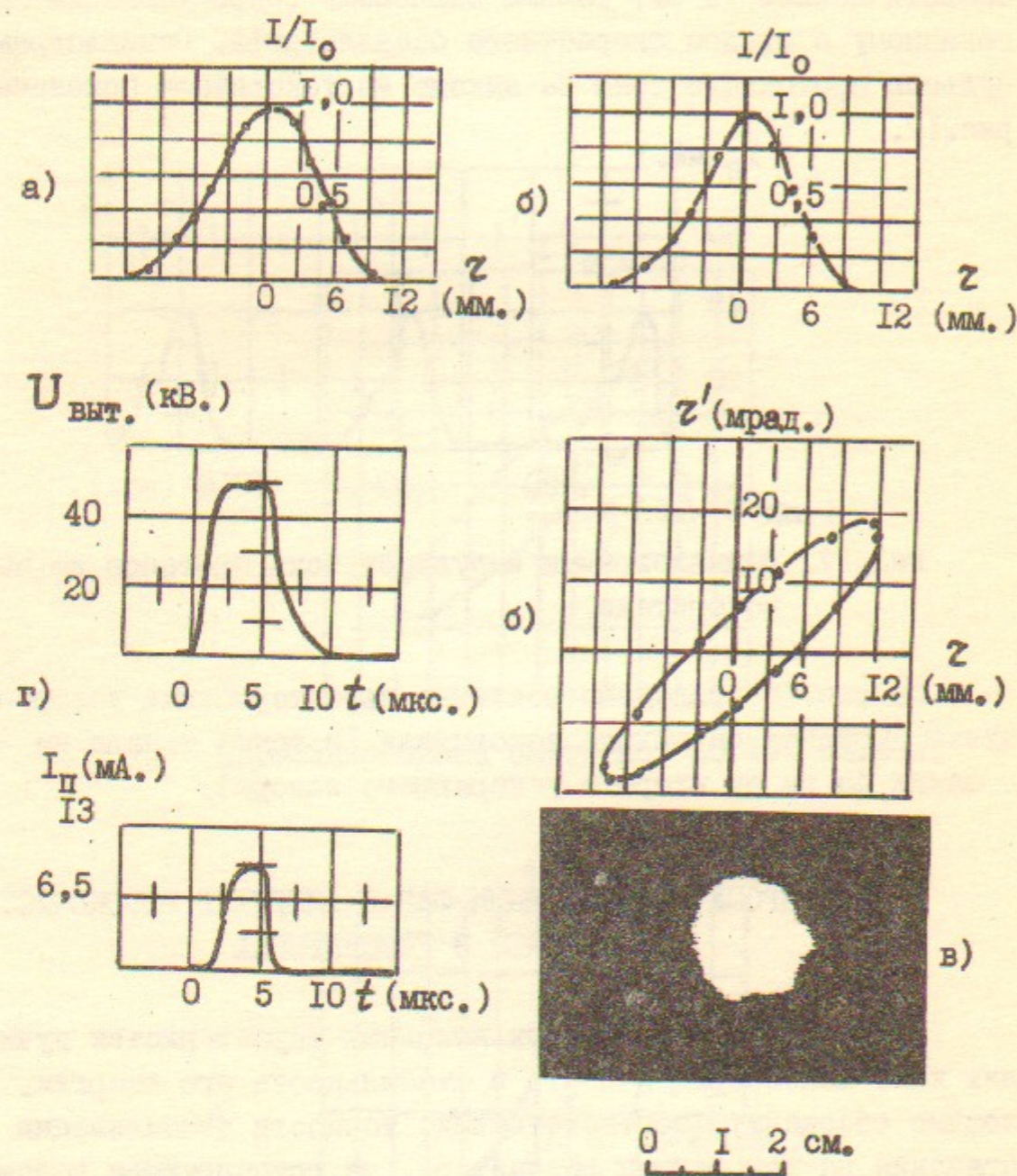


Рис.18. Характеристики пучка протонов на выходе ускорителя.
 а) Распределение плотности тока по сечению пучка в горизонтальной плоскости. б) Эмиттанс и распределение плотности тока в вертикальной плоскости при отсутствии сеток на втором зазоре. в) Фотография пучка. г) Осциллограммы импульса ускоренного тока и форма вытягивающего напряжения на источнике протонов.

Обеспечение постоянства энергии протонов в заданном интервале входных фаз достигается за счет стабилизации напряжения на ускоряющем зазоре.

При использовании схемы автогенератора имеется возможность воздействовать на уровень напряжения в резонаторе через цепь обратной связи автогенератора, например, изменяя фазу напряжения обратной связи. При изменении оптимальной фазы коэффициента обратной связи нарушается баланс фаз автогенератора. Для удовлетворения новому условию баланса фаз должна измениться фаза нагрузки автогенератора. Автогенератор переходит на другую частоту, уже отличную от собственной резонансной частоты анодного контура и, следовательно, при другом значении напряжения на контуре (и соответственно на резонаторе) при неизменном значении модуля коэффициента обратной связи. Генераторная лампа начинает работать на расстроенную нагрузку при соответствующем уменьшении амплитуды колебаний.

Принцип действия схемы ясен из рис.19. Задачей специального блока стабилизации является сравнение детектированного напряжения с контрольной петли резонатора с опорным напряжением во время импульса и при наличии рассогласования через усилитель сигнала ошибки и управляемый фазовращатель воздействовать на фазу напряжения обратной связи автогенератора, которая в свою очередь воздействует на амплитуду ускоряющего напряжения. Изменяя уровень опорного напряжения в блоке сравнения можно менять уровень стабилизации ускоряющего напряжения.

В качестве исполнительного элемента САР применен управляемый фазовращатель, выполненный на основе отрезка коаксиальной линии, заполненной ферритом. Для изменения фазы сигнала обратной связи используется зависимость проницаемости феррита от напряженности подмагничивающего поля. Действительные параметры системы, такие как статистический и динамический коэффициент стабилизации, запас устойчивости по фазе и коэффициенту усиления, требования к усилителю сигнала ошибки и пр. были уточнены в процессе эксперимента.

Следует отметить, что параметры разработанной схемы стабилизации согласуются с расчетными. Экспериментальная проверка показала, что данная схема может обеспечить статический коэффи-

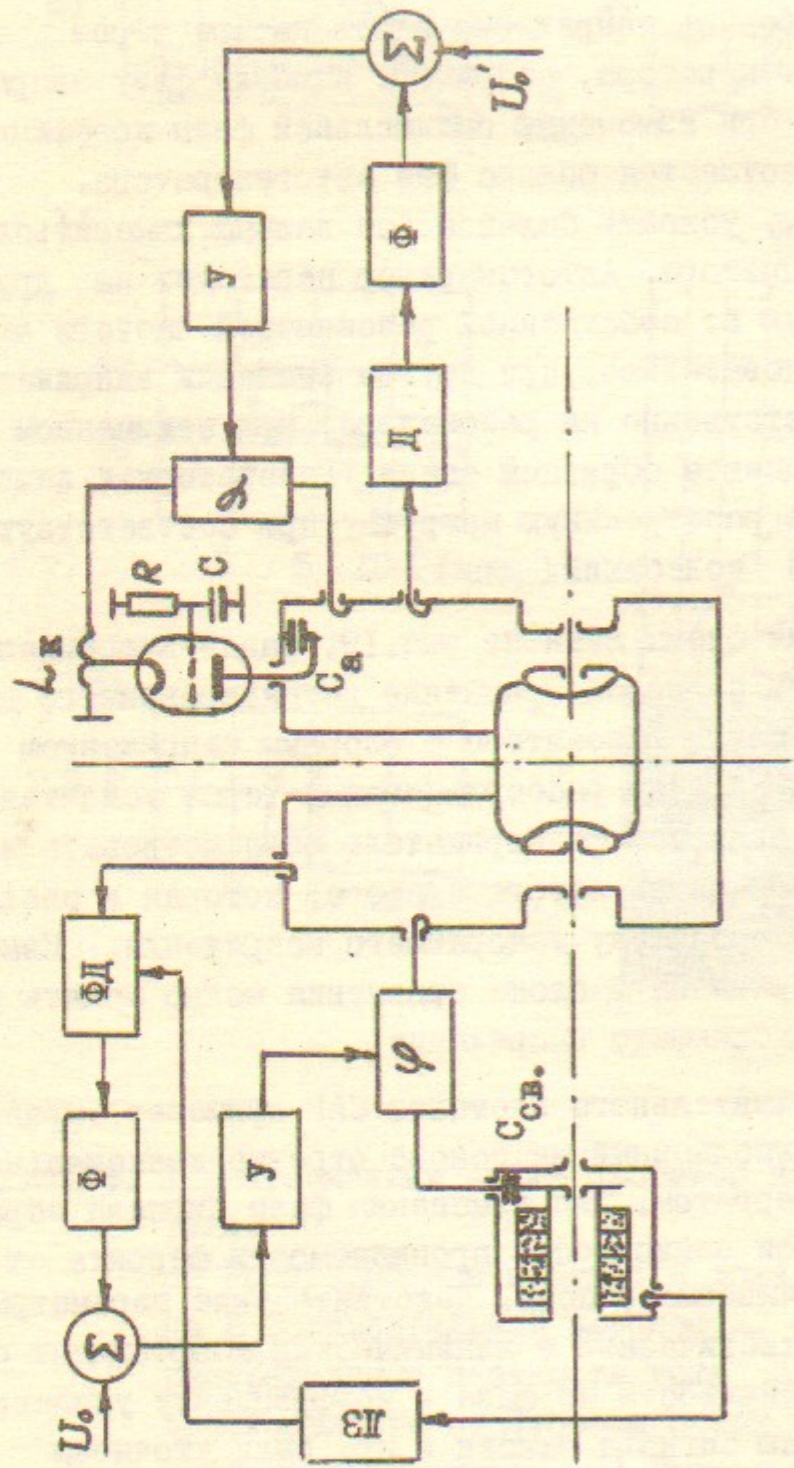


Рис. 19. Блок-схема систем автоматической стабилизации амплитуды напряжения на ускоряющем резонаторе и стабилизации фазы напряжения на группирующем резонаторе относитель-но фазы напряжения на основном ускоряющем резонаторе.

циент стабилизации порядка 30 и коэффициент стабилизации на час-тоте возмущений 1,0кГц близкий к 5.

Система авторегулирования фазы высокочастотного поля в гру-пирующем резонаторе по отношению к фазе поля в основном ускоря-ющем резонаторе должна обеспечить компенсацию возмущений фазы, имеющих место в самом резонаторе и тракте его возмущения.

Поскольку имеется два объекта, в которых происходят возмуще-ния фазы, то требуется в общем случае две системы регулирования, компенсирующие эти возмущения в каждом из объектов. Одна из этих систем подстраивает собственную частоту группирующего резонатора к рабочей частоте с помощью обмотки подмагничивания, налагаемой на феррит. Вторая система автоматически компенсирует возмущения фазового сдвига в группирующем резонаторе по отношению к фазе напряжения на ускоряющем резонаторе с помощью управляемого фазо-вращателя, расположенного в тракте питания группирующего резона-тора. Система работает как непрерывная в течение длительности высокочастотного импульса. Напряжения с измерительных петель обе-их резонаторов поступает на фазовый детектор. Сигнал с фазового детектора, пропорциональный разности фаз, через фильтр и усилитель сигнала ошибки воздействует на управляемый фазовраща-тель. С помощью опорного сигнала, введенного в блок сравнения можно устанавливать необходимую начальную фазу напряжения.

В заключение следует сказать, что сравнение расчетных и экс-периментальных характеристик ускорителя и параметров пучка на вы-ходе указывает на удовлетворительное соответствие между ними, что оправдывает применение использованных при создании ускорителя рас-четных методик и основных конструктивных решений.

Л и т е р а т у р а

1. В.Г.Абдульманов, И.И.Авербух, В.Л.Ауслендер, Г.Б.Глаголев, Р.М.Лапик, А.А.Лившиц, В.Н.Лазарев, Ю.В.Маклаков, А.Д.Панфилов, О.Я.Савченко, А.А.Тувик, Б.Л.Факторович, В.И.Юрченко. Протонно-ионный синхротрон Б-5. Доклад на X Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий. Серпухов, 1977.
2. А.А.Глазов, В.А.Кочкин, Д.Л.Новиков, Л.М.Онищенко. ЖТФ, т. XXXIV, вып. 7, 1964.
3. И.Г.Макаров, Е.П.Мельников, Г.Н.Острейко, В.В.Петров, Г.И.Яснoв. Запуск импульсного линейного ускорителя с энергией 3,5 МэВ - инжектора для однооборотной инжекции электронов в синхротрон. Препринт ИЯФ, Новосибирск, 1968.
4. Б.И.Поляков, Н.И.Уксусов, Д.Г.Зайдин, В.В.Кушин. Труды РАИАН, № 9, 1972.
5. А.П.Федотов, Б.К.Шембель, Радиотехника и электроника, № 12, 1956.
6. С.Е.Лондон. Широкополосные радиопередающие устройства. Из-во "Энергия", 1970.
7. И.С.Гоноровский. Основы радиотехники. Связьиздат, 1957.
8. М.И.Конторович. Нелинейные колебания в радиотехнике. Из-во "Сов.радио", 1973.
9. Л.В.Николаев, Л.Д.Руновский, Ю.С.Черкашин, В.В.Чирков. Импульсный модулятор системы ВЧ питания линейного ускорителя И-100. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, 1970, т. 2, ВИНТИ, Москва.
10. А.А.Егоров, Е.Н.Харитонов. ПТЭ, № 3, 1973.
11. В.Г.Абдульманов, В.Л.Ауслендер, Г.Б.Глаголев, А.Д.Панфилов, Н.Д.Ромашко, ПТЭ, № 3, 1975.
12. В.Л.Ауслендер, В.Н.Лазарев, А.Д.Панфилов. Ионный источник импульсного высокочастотного ускорителя на энергии 1,5 МэВ. Препринт ИЯФ, Новосибирск, 1978.
13. Д.В.Каретников, И.Н.Сливков, В.А.Тепляков, А.П.Федотов, Б.К.Шембель. Линейные ускорители ионов, Атомиздат, 1962.
14. С.И.Евтянов, Ламповые генераторы. Из-во "Связь", 1967.

Работа поступила - 7 февраля 1978 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.ПОПОВ
Подписано к печати 30.III-1978 г. МН 02742
Усл. 2,0 печ.л., 1,7 учетно-изд.л.
Тираж 200 экз. Бесплатно
Заказ № 25.

Отпечатано на ротапринтере ИЯФ СО АН СССР