

Г-524



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

9 - 8509

ГЛАЗОВ
Алим Алексеевич

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ СИСТЕМЫ
ЦИКЛИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЕЙ СО СТАЦИОНАРНЫМ
МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ
С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ВАРИАЦИЕЙ

Специальность 05.14.11 -
электрофизические установки и ускорители

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора технических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Дубна 1975

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем
Объединенного института ядерных исследований

Официальные оппоненты:

доктор технических наук С.К.Есин

доктор технических наук Л.П.Зиновьев

доктор технических наук И.Ф.Малышев

Ведущее учреждение: Радиотехнический институт АН СССР,
Москва.

Автореферат разослан " " _____ 1975 г.

Защита диссертации состоится " " _____ 1975 г.

в _____ час. на заседании Ученого совета Лаборатории
ядерных проблем Объединенного института ядерных иссле-
дований, г. Дубна.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь совета
кандидат физико-математических
наук

Ю.А.Батусов

9 - 8509

ГЛАЗОВ

Алим Алексеевич

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ СИСТЕМЫ
ЦИКЛИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЕЙ СО СТАЦИОНАРНЫМ
МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ
С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ВАРИАЦИЕЙ

Специальность 05.14.11 -
электрофизические установки и ускорители

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора технических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Циклические ускорители со стационарным магнитным полем представляют собой наиболее распространенный класс ускорителей тяжелых частиц. В настоящее время в мире насчитывается около семидесяти изохронных циклотронов и свыше десяти синхроциклотронов. Характерным является то, что эти машины, несмотря на солидный возраст, находятся в стадии непрерывного развития и усовершенствования, причем циклотроны начинают завоевывать позиции в промышленности и теснить другие ускорители в области физики средних энергий и физики ядра.

Использование магнитного поля с пространственной вариацией позволило резко повысить предельную энергию, достигаемую на таких ускорителях, а наличие корректирующих обмоток сделало их универсальными с точки зрения получения пучков ускоренных частиц переменной энергии и ускорения различных ионов в одной и той же машине.

В последнее время получила развитие концепция блочной компоновки магнита циклотрона. В таких машинах при достаточно низком уровне среднего магнитного поля и значительном наборе энергии за оборот можно получить разделение орбит на конечных радиусах ускорения. При должной стабилизации магнитного поля и амплитуды ускоряющего высокочастотного напряжения это позволяет выводить из циклотрона моноэнергетические пучки ускоренных частиц. Для увеличения интенсивности моноэнергетических пучков область фаз, в пределах которой изменение ускоряющего напряжения не превосходит допустимого, искусственно увеличивается путем использования ускоряющего напряжения специальной формы — "сплощенной" синусоиды. Такое напряжение получается при использовании ускоряющих электродов, возбуждаемых на основной частоте и второй или третьей гармониках этой частоты.

Рядом специфических особенностей обладают циклотроны для получения высокоинтенсивных пучков частиц в области средних энергий 500–1000 ГэВ. В связи с активацией в таких ускорителях должен быть обеспечен близкий к 100% вывод ускоренных частиц, создана мощная защита и предусмотрены меры по дистанционному обслуживанию и ремонту машины.

Важным вопросом является разработка высокоэкономичной ускоряющей системы, т.к. мощность, идущая на ускорение, может достигать десятков мегаватт.

В настоящее время в связи с возросшими требованиями к качественным характеристикам циклотронных пучков – ускорение поляризованных частиц, моноэнергетичность – широкое распространение получают установки с внешней инжекцией пучка. Системы внешней инжекции позволяют сформировать пучок необходимой фазовой протяженности в тракте инжекции и инжектировать его в нужной фазе и с необходимыми геометрическими характеристиками. Это особенно важно для получения моноэнергетических пучков ускоренных частиц.

Серьезные изменения произошли также в высокочастотных ускоряющих системах и системах генерации высокочастотной мощности. В связи с необходимостью ускорения различных ионов в одной и той же машине ВЧ системы стали широкодиапазонными с перестройкой частоты в 2–3 раза. При блочной конструкции магнитной системы для ускорения стали использоваться коаксиальные резонаторы с вертикальным расположением линии и объемные резонаторы с ТЕ-волной. В связи с требованием получения моноэнергетических пучков возникли специфические требования к стабильности систем генерации ВЧ мощности.

В настоящей работе рассматривается круг вопросов, связанных с высокочастотными проблемами ускорения частиц в циклических ускорителях со стационарным магнитным полем с пространственной вариацией.

Анализируются возможные схемы построения высокочастотных ускоряющих систем ускорителей различных типов. Показываются пути и методы решения задач, предъявляемых к ВЧ ускоряющим системам, в связи с возрастающими требованиями к качеству пучков ускоренных частиц, необходимых для физического эксперимента.

Диссертация является обобщением многолетнего опыта, связанного с разработкой высокочастотных ускоряющих систем в Отделе новых ускорителей Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Задачей высокочастотной ускоряющей системы является передача энергии высокочастотного поля ускоряемым частицам. В циклических ускорителях такая передача осуществляется при многократном прохождении частицами области ВЧ поля, создаваемого при помощи высокочастотного резонатора того или иного типа.

Выбор ускоряющей системы определяется целым рядом факторов и соображений: конструктивных, технических, эксплуатационных, экономических и принципиальных, основными из которых являются:

- 1) размер и конфигурация области ускорения,
- 2) рабочий диапазон частот (девиация частоты для синхротронов),
- 3) набор энергии за оборот,
- 4) постоянство набора энергии,
- 5) удобство использования и эксплуатации,
- 6) стоимость сооружения и эксплуатационные расходы. При этом в зависимости от типа ускорителя, его энергии, интенсивности, требований к качеству пучка доминирующими могут быть различные требования к ВЧ системе.

В первой главе диссертации рассмотрены некоторые общие вопросы, связанные с ускорением заряженных частиц в циклических ускорителях с постоянным во времени магнитным полем. Детальные подробности, имеющие отношение к определенному типу ускорителей, рассмотрены в последующих главах при анализе ускоряющих ВЧ систем конкретных машин, для которых они имеют определяющее значение. В связи с наметившейся в последнее время тенденцией к получению моноэнергетических пучков ускоренных частиц, а также высокоинтенсивных пучков частиц средней энергии при анализе акцент сделан именно на этих аспектах проблемы разработки ВЧ систем ускорителей рассматриваемого класса.

Во всех циклических ускорителях с постоянным во времени магнитным полем взаимодействие ускоряемых частиц с ускоряющим ВЧ полем происходит в отдельных областях - "ускоряющих щелях", протяженность которых, как правило, значительно меньше длины орбиты. Исключение составляют только первые обороты в машинах с внутренними ионными источниками, расположенными в центре ускорительной камеры, при ВЧ или низкопотенциальном принудительном отсосе ионов. Ускоряемые частицы многократно проходят ускоряющую щель, набирая энергию в соответствии с амплитудой и фазой ВЧ поля в момент пролета щели.

Наиболее распространенными в ускорителях рассматриваемого типа являются ускоряющие ВЧ системы в виде четвертьволновых (полуволновых для синхротронных) резонансных линий, на конце которых расположен ускоряющий электрод - дуант. Взаимодействие частиц с полем происходит у радиальных кромок дуанта, а часть пути частицы проходят внутри дуанта, частота ВЧ напряжения на котором выбирается таким образом, чтобы обеспечить эффективное ускорение частиц как на входе в дуант, так и на выходе из него.

Правильные фазовые соотношения с точки зрения обеспечения эффективного ускорения могут быть получены при различной фазовой протяженности дуантов, однако с точки зрения получения моноэнергетических пучков ускоренных частиц являются безразличными как фазовая протяженность ускоряемого сгустка, так и фазовая протяженность ускоряющих электродов.

В диссертации рассмотрен режим ускорения в циклотроне с блочной компоновкой магнита и ускоряющим электродом, расположенным в свободном от поля пространстве, как это принято в проектах моноэнергетических циклотронов. При этом оказывается, что ускоряющая система вносит энергетический разброс в ускоряемый пучок, величина которого зависит от фазовой протяженности ускоряющего электрода.

В качестве примера рассчитаны энергетические разбросы, связанные с ВЧ системой, для ускорителя с максимальной энергией 80 МэВ, амплитудой ускоряющего напряжения 100 кВ, фазовой протяженностью сгустка при инжекции 10^9 и энергией инжекции 5 и 10 МэВ в зависимости от фазовой протяженности ускоряющего электрода. Разброс уменьшается при приближении угла пролета частиц в электроде к 180° .

В целом ряде случаев при анализе работы ускоряющей высокочастотной системы и режима ускорения необходимо учитывать возмущающее воздействие пучка на ускоряющую систему.

Это имеет место, например, при рассмотрении вопросов, связанных с получением пучков ускоренных частиц высокой моноэнергетичности (моноэнергетический циклотрон) или весьма высокой интенсивности (мезонная фабрика или нейтронный генератор).

В качестве основного инструмента анализа взаимодействия пучков ВЧ система в работе использован закон наведенного тока в приближении заданного поля, что достаточно хорошо соответствует условиям, существующим в рассматриваемых ускорителях.

Для упрощения анализа и с целью придания ему общности ускоряющий резонатор рассматривался как параллельный LCR-контур, где L, C, R - эквивалентные параметры резонатора, отнесенные к зоне взаимодействия с пучком (пучности напряжения). В этом приближении проанализована расстройка и нагрузка ускоряющего резонатора пучком, рассмотрены согласование генератора с резонатором, нагруженным пучком, и установление колебаний в резонаторах, нагруженных пучком.

Получены выражения для активной и реактивной компонент нагрузки, обусловленных наведенным током, построены графики, характеризующие напряжение на контуре и мощность отраженной волны, в зависимости от мощности падающей волны для номинального и нулевого тока нагрузки. Для анализа переходных процессов в резонаторах, нагруженных пучком, использовался асимптотический метод, развитый Н.Н.Боголюбовым. При двух предположениях относительно характеристик питающего высокочастотного генератора - напряжение на контуре постоянно, ток генератора постоянен - получены критерии устойчивости, иллюстрируемые соответствующими графиками.

Получение высокого ускоряющего напряжения в эвакуированных резонаторах ускорителей заряженных частиц осложняется целым рядом нежелательных разрядных явлений и высокочастотным пробоем. Трудности усугубляются тем, что резонаторы имеют значительные геометрические размеры, а в камере ускорителя присутствует значительный фон ионизирующих излучений различной энергии.

Среди разрядных явлений следует отметить разряд в остаточном газе (в объеме и вблизи "грязных" электродов) и резонансный высокочастотный разряд (РВР) в высоком вакууме.

В работе детально рассмотрены характеристики и условия возникновения РВР. С помощью асимптотического метода исследован режим установления колебаний в резонаторе, находящемся под воздействием

ВЧ генератора и тока РВР. Приведены рекомендации по способам борьбы с РВР.

После преодоления РВР и выхода на высокий уровень ускоряющего напряжения основным фактором, ограничивающим возможность повышения напряжения, является высокочастотный пробой. Поскольку в настоящее время нет строгой количественной теории пробоя, особый интерес приобретают экспериментальные исследования этого явления.

В диссертации приведен обширный экспериментальный материал по исследованию пробоев в циклотронной ВЧ системе, полученный в связи с разработкой релятивистского циклотрона. Большинство исследований проводилось на циклотроне - модели РЦ со следующими характеристиками: частота ускоряющего напряжения - 12 МГц, запасенная в резонансной системе энергия - 1 Дж, высота зазора - 32 ± 1 мм, площадь зазора - $0,5 \text{ м}^2$, рабочий вакуум (пароструйные насосы) - $(0,5 \pm 1) \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. Часть исследований выполнена на циклотроне У-150 ЛЯР ОИЯИ.

Исследования проводились как при непрерывном, так и при импульсном режимах работы ВЧ генератора.

Набрана значительная статистика (свыше 10 тыс. пробоев), на основании которой сделаны выводы о характере пробоев при различных напряжениях, о допустимых напряжениях и способах тренировки электродов, о требованиях к конструктивным элементам рабочих электродов.

В качестве устройств, генерирующих ВЧ мощность, предназначенную для получения необходимого ускоряющего напряжения и ускорения частиц, используются мощные радиочастотные генераторы и автогенераторы.

Автогенераторы, как устройства более простые в изготовлении и эксплуатации, поначалу использовались в ускорителях всех классов,

однако сейчас, в связи с возросшими требованиями к стабильности амплитуд и частот, они практически не применяются в циклотронах, безраздельно господствуя только в ВЧ системах синхроциклотронов. Как элемент синхроциклотрона, они должны устойчиво возбуждаться, зачастую, в очень широком диапазоне рабочих частот, обеспечивая при этом эффективную генерацию десятков киловатт ВЧ мощности.

В диссертации рассмотрены условия стационарности колебательного режима и требования, предъявляемые к элементам генератора, применительно к автогенератору с заземленной сеткой и емкостной обратной связью (емкостная "трехточка"), принятому в ВЧ системе сильно-точного фазотрона ОИЯИ (установка "Ф").

Получены соотношения, связывающие проводимость емкости обратной связи с реактивной компонентой проводимости сетка-катод, при которых выполняются условия возникновения колебаний, для случая, когда имеются значительные активные проводимости анод-сетка (проводимость нагрузки) и сетка-катод.

Конкретные численные результаты приведены в главе, посвященной ВЧ системе установки "Ф".

Мощные коротковолновые генераторы циклотронов в значительной мере идентичны со связными радиопередатчиками, методика расчета и проектирования которых достаточно широко освещена в специальной литературе. Однако ВЧ генераторы, работающие в ускорителях заряженных частиц, должны обладать и некоторыми специфическими чертами, из которых наиболее важной в последнее время становится стабильность амплитуды генерируемого ВЧ напряжения. В диссертации характеристики ВЧ генератора, как элемента циклотрона, рассматриваются именно с этой точки зрения.

Получены зависимости, устанавливающие связь амплитуды генерируемого напряжения с питающими напряжениями и сопротивлением нагрузки для недонапряженного и перенапряженного режимов.

Даны рекомендации по выбору того или иного режима в зависимости от характеристик нагрузки и источников питания.

Во второй главе диссертации рассматриваются вопросы, связанные с разработкой высокочастотных систем изохронных циклотронов, которые в настоящее время являются наиболее распространенным типом среди циклических ускорителей. В связи с тем, что в таких машинах точный закон изменения магнитного поля формируется с помощью токовых обмоток и может быть выдержан при разных индукциях, их стремятся "универсализировать", т.е. иметь режимы с переменной энергией ускоренных частиц и ускорять частицы с различными значениями Z/A . Соответственно, высокочастотные ускоряющие системы должны обеспечивать необходимую перестройку частоты и эффективность работы в широком диапазоне частот.

В большинстве современных действующих и сооружаемых изохронных циклотронов на энергию в десятки МэВ используется Ш-образный магнит со сплошным полюсным наконечником, а для создания азимутальной вариации магнитного поля применяются секторные или спиральные ферромагнитные шиммы. При таком способе формирования магнитного поля свободный зазор в межполюсном пространстве между секторными шиммами оказывается малым, однако при удалении корректирующих обмоток от медианной плоскости зазор в долинах между шиммами может быть довольно значительным.

В связи с тем, что при Ш-образном магните общая компоновка и размеры ускорительной камеры изохронных циклотронов близки к имевшим место у классических, остается оптимальной и классическая схе-

ма ускоряющей ВЧ системы в виде четвертьволновой короткозамкнутой резонансной линии с ускоряющим электродом в виде дуанта на разомкнутом конце.

При секторных или слабо спиральных шиммах наряду со 180-градусным дуантами, характерными для обычных циклотронов, в изохронных циклотронах широко используются дуанты меньшей угловой протяженности, расположенные в долинах.

Это уменьшает мощность потерь и проблему ВЧ пробоев, однако усложняет геометрию центральной области и проблему получения моноэнергетических пучков.

В качестве резонансных высокочастотных систем используются как коаксиальные цилиндрические четвертьволновые резонансные линии, перестраиваемые с помощью подвижной закоротки, так и плоские линии с панельной перестройкой частоты.

В диссертации приводятся основные соотношения, позволяющие рассчитать ВЧ систему ускорителя как с подвижной закороткой для перестройки частоты, так и с панельной перестройкой.

С точки зрения электродинамического расчета системы наибольшую трудность представляет расчет входных характеристик дуанта, который представляет собой неоднородную линию сложной конфигурации. В диссертации рассчитаны характеристики дуантов ряда типичных форм и показано, что в подавляющем большинстве случаев, ввиду малости геометрических размеров дуанта по сравнению с длиной волны ускоряющего напряжения, достаточно хорошим приближением является представление дуанта в виде сосредоточенной емкости. В качестве иллюстрации полученных соотношений приведен расчет резонансной системы с подвижной закороткой модели релятивистского циклотрона и приведены результаты сравнения с экспериментом.

Система с панельной перестройкой частоты рассмотрена на конкретном примере циклотрона У-120М. Этот ускоритель предназначен для ускорения протонов, ^3He , дейтронов и α -частиц при плавном варьировании энергии частиц в широком диапазоне и высокой монохроматичности пучка ускоренных частиц. Частоты обращения частиц лежат в диапазоне от 26,3 МГц (протоны максимальной энергии) до 8,8 МГц (дейтроны минимальной энергии).

Проведенный в диссертации детальный анализ возможностей и характеристик систем с панельной перестройкой частоты позволил оптимальным образом выбрать размеры и конфигурацию ВЧ системы У-120М.

В связи с тем, что при размерах, характерных для систем с панельной перестройкой частоты, существующие выражения для волновых сопротивлений резонансной линии оказываются не точными, был развит инженерный метод расчетов волновых сопротивлений, давший хорошее совпадение с экспериментом.

Наличие резерва мощности на большинстве частот рабочего диапазона сделало возможным применение в У-120М нестандартных триммерных конденсаторов очень большой емкости. Эти триммеры, помимо выполнения функции подстройки частоты, используются, во-первых, для получения нижней частоты диапазона, что позволяет снизить максимальную мощность потерь, и, во-вторых, для перестройки системы без снятия напряжения, что при наличии автоматически перестраиваемого ВЧ генератора приближает управление ускорителем к управлению ЭГ.

В диссертации приведены результаты расчета основных характеристик ВЧ системы У-120М. Моделирование в масштабе 1/5 подтвердило основные результаты расчета.

Логическим развитием циклотронного метода ускорения, связанным с прогрессом теории движения частиц, методов формирования и

систем стабилизации магнитных полей и развитием высокостабильных систем генерации высокочастотной мощности, являются проекты моноэнергетических циклотронов.

В третьей главе диссертации рассмотрены вопросы, связанные с разработкой ВЧ системы моноэнергетического циклотрона. Проектом моноэнергетического циклотрона ОИЯИ предусматривается использование магнитной системы, состоящей из четырех отдельных магнитных секторов с 45-градусной угловой протяженностью и интервалом рабочих радиусов $0,54 \pm 4,1$ м.

Ускоряющая система должна обеспечивать набор энергии за оборот 100 кэВ/заряд для всех ускоряемых частиц: p , d , α , ${}^3\text{He}$, ${}^6\text{Li}$.

Разброс энергии при ускорении не должен превышать 10^{-4} . Набор энергии должен осуществляться в максимуме высокочастотного ускоряющего напряжения, причем вектор напряженности ускоряющего электрического поля должен быть направлен вдоль равновесной траектории частицы. Частота обращения ускоряемых частиц равняется 4,638 МГц (p), 2,948 МГц (d , α , ${}^6\text{Li}$), 3,377 МГц (${}^3\text{He}$).

Ускоряющая система, удовлетворяющая изложенным требованиям, может быть осуществлена либо в виде однопролетного резонатора с рабочим зазором, идущим вдоль радиуса в середине промежутка между секторами, либо в виде дуанта, угол пролета частиц в котором составляет $(2k+1)\pi$, $k=1,2,3,\dots$, а кромки идут вдоль радиусов в середине промежутков или в серединах магнитных секторов.

В диссертации приводится обоснование выбора элементов ВЧ ускоряющей системы, ее электродинамический расчет и результаты моделирования в масштабе $1/4$.

В соответствии с полученными результатами для МЦ ОИЯИ принята ускоряющая система с полем специальной формы - "сплощенная синусоида". Это поле создается двумя отдельными (разнесенными в простран-

стве) системами ускоряющих электродов, каждая из которых создает электрическое поле синусоидальной формы.

"Основная" ускоряющая система возбуждается на частоте, равной удвоенной частоте обращения, "гармоническая" ускоряющая система возбуждается на третьей гармонике основной частоты. Как основная, так и гармоническая ускоряющие системы состоят каждая из двух симметрично расположенных ускоряющих электродов (дуантов) электрической протяженностью 180° ; при этом геометрический угол основного дуанта равен 90° , а гармонического - 30° . Каждый дуант расположен так, что его ось симметрии совпадает с серединой промежутка между магнитными блоками, причем гармонический дуант целиком располагается в этом промежутке, а основной заходит в межполюсное пространство, и его ускоряющие кромки лежат в середине магнитного блока.

В диссертации подробно рассмотрены особенности режима ускорения в такой ВЧ системе, проанализировано влияние различных факторов, связанных с ней, на набор энергии и допустимую фазовую протяженность сгустка ускоряемых частиц. На основании полученных результатов и анализа неустойчивостей, вносимых элементами ВЧ генератора, обоснована общая схема компоновки системы ВЧ питания резонаторов, сформулированы требования к температурной и геометрической стабильности элементов, стабильности систем питания генератора, точности и коэффициенту стабилизации систем АРА и АПЧ.

Анализ требований, предъявляемых к элементам и узлам высокочастотной системы моноэнергетического циклотрона, показал, что они, не являясь принятыми в настоящее время в ускорительной и высокочастотной технике, не выходят, тем не менее, за пределы технических возможностей сегодняшнего дня.

С целью экспериментальной проверки полученных соотношений и реального получения высокочастотного напряжения с долговременной

стабильностью амплитуды порядка 10^{-4} на среднем уровне мощности был разработан, спроектирован и изготовлен комплект радиоаппаратуры стабильной амплитуды ("КРАСА"), основными частями которого являются модель 1:4 резонатора первой гармоники МЦ и соответствующий ВЧ генератор.

В оконечном каскаде ВЧ генератора используется тетрод ГУ-47Б, что позволяет получать колебательную мощность в пределах до 4 кВт, чего, практически, вполне достаточно для полномасштабного моделирования проблем стабилизации ускоряющего напряжения. Рабочая частота выбрана равной 26,3 МГц, что соответствует средней частоте диапазона МЦ, умноженной на четыре, близко к значению максимальной частоты резонатора третьей гармоники МЦ и равняется верхней частоте циклотрона У-12СМ.

Конструктивно оконечный и предоконечный каскады генератора выполнены на коаксиальных медных контурах в анодной цепи с плунжерами, перемещаемыми при грубой настройке, а затем зафиксированными в рабочем положении с помощью болтового соединения.

Схемная часть блока маломощных каскадов (БК) помещена в активный термостат, температура в котором поддерживается постоянной с точностью 0,1.

Генератор питается от специально разработанных и изготовленных в ЛЯП ОИЯИ источников повышенной стабильности и установлен в помещении, температура воздуха в котором поддерживается постоянной с помощью кондиционера КТ-2 (ГДР).

Измерение амплитуды высокочастотного напряжения с точностью 10^{-4} является очень сложной самостоятельной задачей, решение которой тем не менее необходимо для разработки и исследования сверхстабильных систем ВЧ питания ускорителей. Проблема в данном случае

несколько облегчается тем, что абсолютное значение напряжения может измеряться с меньшей точностью, определяемой доступной точностью калибровки, а значение 10^{-4} относится к разрешающей способности и дрейфу измерителя.

Многочисленные эксперименты, результаты которых приведены в диссертации, показали, что необходимая точность может быть достигнута при использовании как ламповых, так и полупроводниковых термостатированных детекторов.

В результате цикла исследований системы "КРАСА" при совместном включении систем АПЧ и АРА за пять часов работы (после предварительного прогрева аппаратуры) была получена стабильность напряжения на резонаторе по максимальному отклонению $5 \cdot 10^{-5}$, паразитная модуляция гармониками промышленной частоты $\sim 0,5$ В на уровне 5 кВ, дрейф $2 \cdot 10^{-4}$.

Таким образом, полученный результат является, по-видимому, наилучшим из достигнутых в настоящее время в циклотронных лабораториях мира.

Помимо создания специальных циклических ускорителей - мезонных фабрик, для которых характерна блочная конструкция магнита и ускоряющая система в виде отдельных резонаторов с TE_{011} -волной, возможно создание таких машин, у которых область ускорения близка по конфигурации к области ускорения циклотронов со сплошным магнитом и просто реконструкция существующих синхротронов в релятивистские изохронные циклотроны. Последняя возможность была рассмотрена в ЛЯП ОИЯИ применительно к реконструкции действующего синхротрона в релятивистский циклотрон (РЦ).

Четвертая глава диссертации посвящена вопросам, связанным с разработкой ускоряющей ВЧ системы РЦ.

Ускоряющая система РЦ должна обеспечивать режим непрерывного ускорения протонов при токе на максимальном радиусе до 1 мА. При этом необходимо иметь максимально возможный набор энергии ускоряемых протонов за оборот при технически возможной и экономически приемлемой мощности системы высокочастотного питания ускоряющих электродов.

Особенностью РЦ, который является высокополевой машиной с малой вариацией напряженности магнитного поля и большой спиральностью, является малая высота области ускорения, отсутствие вариации зазора по азимуту и незначительная вариация по радиусу с максимумом зазора на средних радиусах.

Практически единственной и наиболее целесообразной в этом случае является ускоряющая система, в которой используются резонансные свойства короткозамкнутых четвертьволновых линий (на частоте, равной частоте обращения протонов), с дуантами простой формы, т.е. система, применяемая в обычных циклотронах.

Ускоряющее напряжение, определяющее набор энергии протонами за оборот, в случае малых межполюсных зазоров, характерных для РЦ, лимитируется пробоем между дуантом и камерой. В этом случае для увеличения напряжения необходимо максимальное уменьшение конструктивной высоты дуанта. Создать необходимую конструкцию можно, положив медные листы крышек дуанта с припаянными к ним трубками водяного охлаждения на растяжки, натянутые между U-образными балками, вынесенными из зазора магнита. В этом случае минимальный зазор между дуантом и плакировкой камеры составит 30 мм. Для обеспечения необходимого набора энергии ускоряющая система РЦ должна быть двухдуантной и угол пролета протонов внутри дуантов должен составлять 180° . Из всех рассмотренных возможностей построения ускоряющей системы наилучшими ха-

рактеристиками в отношении величины потерь, возбуждения, конструктивного осуществления обладает ускоряющая система в виде прямоугольной неоднородной четвертьволновой плоской линии, профилированной в соответствии с профилем шимм и с увеличенным волновым сопротивлением вне зазора электромагнита. Для расчета резонансная линия была условно разделена на 8 участков, внутри каждого из которых зазор считался постоянным и равным среднему.

В период проектирования высокочастотной системы РЦ были изготовлены две модели в масштабе 1:10 и 1:5, на которых исследовались, главным образом, частотные свойства системы. С целью окончательного определения положения закортки и, главным образом, мощности потерь, был изготовлен полномасштабный макет высокочастотной системы.

Многочисленные экспериментальные исследования, выполненные на моделях и макете, показали, что выбранная ВЧ система оптимальным образом удовлетворяет поставленным требованиям: напряжение вдоль ускоряющей кромки постоянно с точностью 2%, экспериментальная длина системы совпадает с расчетной и такова, что дуанты с резонансными линиями размещаются между вертикальными стойками ярма электромагнита, что кардинально облегчает задачу радиационной защиты; система удобно возбуждается с помощью боковой петли связи.

Экспериментально измеренная мощность потерь в макете, выполненном из медных листов, спаянных оловянно-свинцовым припоем, составила 1150 ± 100 кВт.

Проблема повышения интенсивности пучка ускоренных частиц в области энергий до 1 ГэВ, настоятельно диктуемая требованиями повышения точности физического эксперимента, выдвинула в последние годы на передний план задачу реконструкции действующих синхротронных циклотронов.

В настоящее время реконструируются синхротроны в Невисе (США) и ЦЕРН'е и подготавливается реконструкция синхротрона ЛЯП ОИЯИ.

В пятой главе диссертации рассматриваются вопросы, связанные с разработкой высокочастотной системы синхротрона со спиральной вариацией напряженности магнитного поля.

В таком ускорителе, как синхротрон, интенсивность пучка ускоренных частиц, надежность и стабильность работы ускорителя в значительной степени зависят от параметров и характеристик высокочастотной ускоряющей системы.

Совершенно очевидным и не вызывающим сомнения способом увеличения интенсивности пучка частиц, ускоренных в синхротроне, является повышение амплитуды ускоряющего напряжения. При этом увеличиваются электрические фокусирующие силы, играющие определяющую роль на первых оборотах, возрастает отсос ионов из ионного источника, увеличивается площадь области фазовой устойчивости и повышается частота модуляции за счет сокращения времени ускорения.

Из сказанного видно, что повышение ускоряющего напряжения приводит к целому ряду положительных эффектов, однако, несмотря на очевидную полезность повышения ускоряющего напряжения, возникающие при этом радиотехнические и конструктивные трудности не позволили до настоящего времени далеко продвинуться по этому пути.

Диапазон рабочих частот синхротрона, определяемый значением магнитного поля в центре и на конечном радиусе и энергией ускоренных частиц, для больших машин чрезвычайно широк, и создание элемента перестройки частоты (вариатора частоты) для такого диапазона является очень сложной принципиальной и технической задачей.

Во всех действующих ускорителях именно вариатор частоты, в качестве которого используются вибрирующие или вращающиеся переменные конденсаторы, ограничивает возможность повышения ускоряющего напряжения.

В установке "Ф" конечный радиус ускорения составляет 2,7 м, а среднее магнитное поле растет с увеличением радиуса, что обеспечивает ускорение протонов до энергии 700 МэВ при изменении частоты ускоряющего напряжения в диапазоне 18,18+14,41 МГц.

Введение вариации и растущего с радиусом магнитного поля приводит к сужению рабочего диапазона частот по сравнению с обычными синхротронами. Однако это сопровождается резким уменьшением межполюсного зазора магнита, и при выбранной апертуре дуанта, равной 100 мм, зазор между дуантом и плакировкой камеры будет составлять всего около 8 см.

Были проанализированы различные возможности построения ВЧ системы при указанных параметрах и найдено, что в качестве ускоряющей резонансной ВЧ системы установки "Ф" наиболее целесообразно использовать плоскую однородную линию, прямоугольную в плане с центральным электродом шириной 6 м, длиной 7,5 м и постоянным зазором 78,5 мм, перестраиваемую двумя идентичными вращающимися емкостными вариаторами частоты. При этом напряжение на наиболее ответственном узле-вариаторе не превышает ускоряющего, которое для установки "Ф" принято равным 50 кВ, а вариаторы и ВЧ генератор располагаются за радиационной защитой, частично размещенной внутри резонансной линии.

Применение механической системы для перестройки частоты автоматически приводит к наличию обратного хода, во время которого частота системы возвращается от конечного состояния к начальному. В связи с тем, что уменьшение обратного хода позволяет увеличить час-

тоту посылки и тем самым интенсивность ускоренных частиц, для установки "Ф" был разработан оригинальный вариатор с увеличенным рабочим ходом. Увеличения рабочего хода по сравнению с "обычным" вариатором удалось достичь путем использования роторных лопаток малой угловой протяженности и статорных лопаток сложной формы, профилированных по высоте и толщине. На верхней частоте диапазона, когда напряжение на вариаторе достигает 50 кВ, рабочий зазор составляет 7 мм, что обеспечивает достаточную электрическую прочность.

Для проверки принятых решений и отработки системы связи и схемы автогенератора был изготовлен полномасштабный макет ВЧ системы с вариаторами и автогенератором. В результате значительного цикла исследований, благодаря использованию оригинальных решений в системе связи и способе борьбы с паразитной поперечной модой колебаний, удалось обеспечить получение ускоряющего напряжения во всем рабочем диапазоне частот с неравномерностью амплитуды $\pm 6\%$. Напряжение на вариаторе совпало с расчетным, прямой ход изменения частоты составил 72% периода модуляции.

Вариатор частоты является одним из наиболее сложных и ответственных узлов установки "Ф". Эффективность и надежность его работы в первую очередь определяет эффективность и надежность всего ускорительного комплекса в целом. С изготовлением вариатора связаны и наиболее сложные конструкторско-технологические проблемы.

В связи с этим было решено изготовить помимо макета вариатора частоты установки "Ф" его технологическую модель таким образом, чтобы использовать синхротрон ЛЯИ в качестве стенда для исследования вариатора установки "Ф" с одновременным улучшением характеристик синхротрона.

Угловая протяженность роторных и статорных пластин выбрана, как в установке "Ф".

В качестве материала роторных и статорных лопаток использован алюминиевый сплав Д-16М. Рабочая поверхность обработана по шестому классу чистоты. Острые кромки скруглены. Рабочие зазоры выставлены с точностью $3,5 \pm 0,3$ мм.

Опыт запуска, проведенных исследований и годовой эксплуатации синхротрона с новым вариатором частоты позволяет заключить, что вариатор, изготовленный из алюминиевого сплава без покрытий, с лопатками специальной формы обладает достаточной электрической прочностью, а применение лопаток специальной формы, увеличивающих протяженность рабочего хода изменения частоты синхротрона, приводит к соответствующему увеличению частоты модуляции и интенсивности ускоренных частиц.

Таким образом, результаты исследований на макете ВЧ системы и на синхротроне с новым вариатором-моделью вариатора установки "Ф" подтвердили справедливость решений и теоретических предпосылок, принятых при выборе и разработке ВЧ системы установки "Ф".

Интересным примером, показывающим возможности использования трансформационных свойств неоднородных линий для создания широкодиапазонной резонансной системы, настраиваемой емкостным вариатором частоты, является высокочастотная система модели кольцевого протонного фазотрона.

Значительное возрастание среднего значения напряженности магнитного поля вдоль радиуса в такой машине обеспечивает возможность размещения частиц с широким диапазоном импульсов в относительно узкой магнитной дорожке. При этом, в отличие от обычных синхротронов, частота обращения ионов растет в процессе ускорения.

В рассматриваемой модели частота обращения протонов в процессе ускорения возрастает в три раза. Ускоритель не имеет свободных прямолинейных промежутков для образования плоскости значительных размеров вокруг ускоряющего промежутка, и поэтому в качестве ускоряющих электродов использованы дрейфовые трубки.

Система резонансных линий с переменным волновым сопротивлением соединяет дрейфовые трубки с расположенным в центре ВЧ автогенератором, собранным по оригинальной схеме с комбинированной обратной связью. Волновые сопротивления линий и длины участков выбраны таким образом, что настройка системы при более чем трехкратном перекрытии по частоте обеспечивается чисто емкостным вариатором с вращающимся ротором.

Благодаря использованию настраиваемой резонансной системы необходимое ускоряющее напряжение получается значительно более эффективно, при значительно меньшей мощности системы ВЧ питания, чем в случае широкополосной ускоряющей системы. Амплитудные характеристики системы таковы, что изменение $U_{\text{уск}} \leq 20\%$ от среднего уровня. Экономичная система автоанодной модуляции позволяет формировать ускоряющее напряжение по желаемому закону.

В заключительном разделе диссертации резюмируются рассматриваемые в ней вопросы, связанные с получением ускоряющего напряжения и осуществлением эффективного режима ускорения частиц в циклических ускорителях со стационарным магнитным полем с пространственной вариацией. Полученные результаты можно вкратце сформулировать следующим образом.

1. Применительно к поставленной задаче проанализированы эффекты взаимодействия ускоряющих высокочастотных систем с пучком ускоряемых частиц.

2. Рассмотрены разрядные явления, возникающие в эвакуированных резонаторах при возбуждении ускоряющего высокочастотного электромагнитного поля и приведен значительный экспериментальный материал по исследованию электрической прочности зазора между ускоряющим электродом и камерой ускорителя, которая, в основном, лимитирует достижимые ускоряющие напряжения.

3. Проведен анализ систем генерации высокочастотной мощности с точки зрения их использования в ускорителях того или иного типа, что позволяет оптимальным образом осуществить их исполнение и настройку в зависимости от предъявляемых требований.

4. При анализе высокочастотных ускоряющих систем ускорителей различных типов приведены методы и результаты расчета их характеристик, возможные варианты и обоснование выбора ускоряющей структуры, результаты экспериментальных исследований.

5. Для циклотрона с повышенной моноэнергетичностью пучка обоснован вариант ВЧ системы с панельной перестройкой частоты. Принятая в циклотроне У-120М оригинальная высокочастотная система с контактной панельной перестройкой частоты и многопластинчатый триммерным конденсатором большой емкости позволяет обеспечить трехкратное перекрытие по частоте и исключительно удобную настройку системы в значительном диапазоне частот с помощью триммеров без снятия высокочастотного напряжения, что очень удобно при спектротрических исследованиях. Для анализа характеристик высокочастотной системы этой и аналогичных машин развит простой и дающий хорошее совпадение с экспериментом инженерный метод расчета.

6. Получены интересные результаты при решении проблемы обеспечения постоянства набора энергии в ускоряющей системе моноэнергетического циклотрона.

Проанализировано влияние различных факторов на постоянство набора энергии и сформулированы требования, предъявляемые к элементам системы генерации высокочастотной мощности и высокочастотным резонаторам. На модели резонатора циклотрона при возбуждении от специально разработанного генератора мощностью 4 кВт получено напряжение с долговременной стабильностью 10^{-4} , что превышает лучшие результаты зарубежных лабораторий. Проведенный анализ эффекта взаимодействия пучка с резонансной системой позволяет определить ограничения, налагаемые им на достижимую моноэнергетичность пучка ускоренных частиц.

7. Расчетные, модельные и макетные исследования, выполненные в процессе проектирования высокочастотной системы релятивистского циклотрона, позволили найти оптимальную конфигурацию системы, обеспечивающую минимальные высокочастотные потери и близкое к равномерному распределение напряжения на ускоряющей кромке при ширине системы большей, чем ее длина.

8. В установке "Ф", благодаря использованию в вариаторе статорных пластин специальной формы, профилированных по высоте и толщине, и роторных пластин малой угловой протяженности, удалось значительно повысить эффективность цикла модуляции частоты и обеспечить постоянство и относительно малую величину напряженности электрического поля в рабочих зазорах вариатора.

Эффект увеличения рабочего хода изменения частоты в вариаторе с пластинами специальной формы проверен на синхротронном циклотроне ЛЯЦ, для которого был разработан и изготовлен соответствующий вариатор. В настоящее время ускоритель работает с новым вариатором.

9. В высокочастотной системе установки "Ф" осуществлен эффективный способ воздействия на частоту паразитного поперечного резонанса и удаления его из рабочего диапазона частот. Оригинальная си-

стема связи с последовательной индуктивностью позволила осуществить генерацию высокочастотной мощности при внутренней обратной связи и обеспечить практическое постоянство ускоряющего напряжения во всем рабочем диапазоне частот.

10. Близкие к предельным возможности создания широкодиапазонной резонансной системы, настраиваемой емкостным вариатором частоты, за счет использования трансформационных свойств неоднородных коаксиальных резонансных линий реализованы при создании ВЧ ускоряющей системы модели кольцевого фазотрона. Оригинальная "изменяющаяся" схема автогенератора обеспечивает получение примерно постоянного ускоряющего напряжения при трехкратном перекрытии по частоте.

Основные материалы диссертации были доложены на ряде конференций и совещаний по ускорителям заряженных частиц и опубликованы в 27 печатных работах, список которых приводится ниже.

Литература

1. А.А.Глазов, Д.Л.Новиков, ЖТФ, XXIII, 2295 (1958).
2. Д.П.Василевская, А.А.Глазов, В.И.Данилов и др. АЭ, т.6, 657 (1959).
3. Д.П.Василевская, А.А.Глазов, В.И.Данилов и др., ОИЯИ, Р-390, (1959).
4. Д.П.Василевская, А.А.Глазов, В.И.Данилов и др. АЭ, т.8, 189 (1960).
5. Д.П.Василевская, А.А.Глазов, Ю.Н.Денисов и др., ОИЯИ, Р-930, 1962.
6. А.А.Глазов, В.А.Кочкин, Е.Схвабе, *Nukleonika*, УП, №7+8, 1962.
7. А.А.Глазов, В.А.Кочкин, Л.М.Онищенко, Е.Схвабе. *Nukleonika*, УШ, №2, 1963г.
8. А.А.Глазов, М.М.Семенов, ПТЭ, №6, 97 (1964).
9. М.А.Гашев, А.А.Глазов, Ю.Н.Денисов и др. Труды международной конференции по ускорителям, Дубна, 1963, стр.547, Атомиздат, 1964г.
10. А.А.Глазов, В.А.Кочкин, Л.М.Онищенко и др. Труды международной конференции по ускорителям, Дубна, 1963, стр. 946, Атомиздат, 1964г.
11. А.А.Глазов, Е.Схвабе, ОИЯИ, Р1-2732, Дубна, 1966.

12. А.А.Глазов, Ю.Н.Денисов, В.П.Джелепов и др., ОИЯИ, 9-3211, Дубна, 1967г.
13. А.А.Глазов, В.А.Кочкин, Л.М.Онищенко, М.М.Семенов, Труды шестой международной конференции по ускорителям высоких энергий, Кембридж (США) А-83, 1967г.
14. А.А.Глазов, Ю.Н.Денисов, В.П.Джелепов и др., ОИЯИ, Р9-3932, Дубна, 1968 г.
15. А.А.Глазов, Ю.Н.Денисов, В.П.Джелепов и др., АЭ, т.27, в.1, 16(1969).
16. А.А.Глазов, Ю.Н.Денисов, В.П.Джелепов и др., Nucl. Instr. and Meth., 70, 274 (1969).
17. А.А.Глазов, В.А.Кочкин, Л.М.Онищенко, ОИЯИ, 13-4496, Дубна, 1969, стр.55.
18. А.А.Глазов, В.А.Кочкин, Л.М.Онищенко, М.М.Семенов, ОИЯИ, 13-4496, Дубна, 1969, стр.66.
19. А.А.Глазов, Ю.Н.Денисов, В.П.Джелепов и др., ЖЭТФ, т.57, в.5, 1465, 1969.
20. Ю.Г.Аленицкий, А.А.Глазов, Ю.Н.Денисов и др., ОИЯИ, 9-5292, Дубна, 1970.
21. А.А.Глазов, В.А.Кочкин, Л.М.Онищенко, Е.Схвабе, ОИЯИ, Р9-5498, Дубна, 1971, стр.49.
22. А.А.Глазов, Л.М.Онищенко, В.И.Перегуд и др., Труды второго Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.П, стр.169, "Наука", 1972.
23. А.А.Глазов, Б.А.Сорокин, Е.Схвабе, ОИЯИ, Р9-6241, Дубна, 1972, стр. 43.
24. А.А.Глазов, В.А.Кочкин, М.М.Семенов, А.С.Устинов, ОИЯИ, Р9-6241, Дубна, 1972, стр. 60.
25. А.А.Глазов, В.А.Кочкин, М.М.Семенов, ОИЯИ, 9-7575, Дубна, 1973.
26. А.А.Глазов, В.А.Кочкин, М.М.Семенов, ОИЯИ, Р9-7339, Дубна, 1973, стр. 116.
27. А.А.Глазов, В.А.Кочкин, М.М.Семенов, ОИЯИ, Р9-7339, Дубна, 1973, стр.129.

Рукопись поступила в издательский отдел
2 января 1975 года.