

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
имени Д.В. СКОБЕЛЬЦЫНА

На правах рукописи

ГОРБАЧЕВ Валерий Петрович

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ СИСТЕМЫ МИКРОТРОНА

Специальность 01.04.20
Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2007

Работа выполнена в ГОУ ВПО Саратовский государственный университет им. Н.Г.Чернышевского и в отделе электромагнитных процессов и взаимодействия атомных ядер Научно-исследовательского института ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова.

Научные руководители: доктор технических наук,
профессор Степанчук
Виктор Петрович,
доктор физико-
математических наук,
профессор Шведун
Василий Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Каминский
Владимир Ильич
кандидат физико-математических
наук Спасский Андрей
Васильевич


Ведущая организация: Федеральное государственное
унитарное предприятие
«Научно производственное
предприятие Алмаз»

Защита состоится 17 мая 2007 года в «15» часов на заседании
Диссертационного совета К501.001.06 в Московском Государственном
Университете им. М.В. Ломоносова по адресу:
119992, г. Москва, Ленинские горы, НИИЯФ МГУ, 19 корп., ауд. 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ.

Автореферат разослан 27 марта 2007 года.

Ученый секретарь
Диссертационного совета К501.001.06
кандидат физико-математических наук

 Чуманова О.В.

Общая характеристика работы.

Актуальность темы. Ускорители электронов с энергией пучка до 100 МэВ находят применения в технологических процессах в промышленности, используются для стерилизации изделий, обработки пищевых продуктов, очистки отходящих газов и воды, широко применяются для лучевой терапии, дефектоскопии и систем безопасности, используются для производства радиоактивных изотопов и γ -активационного анализа, служат инжекторами в синхротрон и источниками электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн. Особое место среди ускорителей электронов в этой области энергий занимают классический и разрезной микротроны. Использование микротронной схемы ускорения позволяет создавать более компактные и эффективные источники электронов по сравнению с линейными ускорителями и гораздо более интенсивные по сравнению с бетатронами. Использование микротрона для решения фундаментальных и прикладных задач требует повышения энергии и увеличения тока пучка ускоренных электронов. Классические микротроны обычно работают в диапазоне энергий пучка 5-25 МэВ. При увеличении энергии до 40 МэВ происходит значительное снижение величины ускоренного тока, а энергия 60 МэВ может считаться предельной для классического микротрона. Повышение энергии электронного пучка до 50÷100 МэВ и выше, необходимое для решения ряда фундаментальных и прикладных задач, возможно в разрезных микротронах.

Одной из основных систем классического и разрезного микротронов является система высокочастотного питания. От выбора принципа построения схемы высокочастотного питания зависит максимальная величина ускоренного тока и энергетический спектр электронного пучка, уровень потерь тока пучка в процессе ускорения, простота эксплуатации ускорителя, его стоимость и надежность. Настоящая работа посвящена разработке, созданию и исследованию характеристик трех существенно различных систем высокочастотного питания классического и разрезного микротронов: 1)основанной на магнетроне системы высокочастотного питания классического микротрона и разрезного микротрона на низкую энергию, 2)системы высокочастотного питания разрезного микротрона на энергию 70 МэВ с клистроном, работающим в автоколебательном режиме, 3) системы разрезного микротрона, обеспечивающего ускорения сгустков электронов с большим зарядом, малым эмиттансом и малым энергетическим разбросом, с клистроном, работающим в режиме возбуждения от внешнего высокостабильного генератора.

Состояние вопроса. К настоящему времени в различных лабораториях мира построены десятки импульсных ускорителей электронов, основанных на схеме классического или разрезного микротронов. В результате проведенных исследований сложились два основных подхода к построению систем их высокочастотного питания. В классическом микротроне, как правило, в качестве источника высокочастотной мощности

используется магнетрон, при этом частота генерируемых колебаний стабилизируется (относительно собственной частоты резонатора) благодаря влиянию электромагнитной волны, отраженной от резонатора и возвращающейся через неидеальный ферритовый изолятор к магнетрону. В разрезном микротроне, как правило, используется ускоряющая структура со стоячей волной, питаемая через ферритовый изолятор клистроном в режиме внешнего возбуждения. Частота генератора, возбуждающего клистроном, автоматически подстраивается под резонансную частоту ускоряющей структуры, при этом сигнал ошибки формируется с помощью фазового детектора, сравнивающего фазу падающей волны и фазу поля в ускоряющей структуре.

Указанные схемы высокочастотного питания имеют ряд недостатков. В частности, на переднем фронте СВЧ импульса сигнал, отраженный от резонатора и приходящий к магнетрону, не несет информации о собственной частоте резонатора. Это может приводить к увеличению времени переходного процесса, особенно при большой длине тракта и не большой величине ослабления отраженной волны. Увеличение коэффициента стабилизации частоты за счет снижения ослабления отраженной волны и увеличения мощности сигнала, возвращающегося к магнетрону, может приводить к возбуждению и генерации паразитных колебаний. При ослаблении отраженной волны менее 16 дБ генерация на рабочей частоте, как правило, невозможна. Схема высокочастотного питания разрезного микротрона является дорогостоящей и не удовлетворяет

требованиям надежности для целого ряда применений ускорителя. Данная схема также не может быть применена для питания разрезного микротрона с внешней инжекцией от линейного ускорителя. Схемы высокочастотного питания, предложенные и реализованные в настоящей работе, позволяют преодолеть указанные выше недостатки.

Целью работы является разработка, создание и экспериментальное исследование систем высокочастотного питания микротронов, в том числе:

1. СВЧ системы с самосинхронизацией магнетрона сигналом, прошедшим через ускоряющий резонатор (ускоряющую структуру), включая оценку возможности ее применения в малогабаритном разрезном микротроне с энергией пучка до 12 МэВ;
2. автогенераторной СВЧ системы разрезного микротрона с энергией пучка до 70 МэВ, включая разработку и исследование тракта обратной связи и системы долговременной стабилизации амплитуды поля в ускоряющей структуре;
3. СВЧ системы разрезного микротрона с высокой яркостью пучка на энергию до 35 МэВ с внешней инжекцией от линейного ускорителя с СВЧ пушкой.

Научная новизна и практическая ценность работы заключаются в том, что впервые были созданы и исследованы СВЧ система с самосинхронизацией магнетрона сигналом, прошедшим через ускоряющий резонатор (ускоряющую структуру), автогенераторная СВЧ система

разрезного микротрона, включая тракт обратной связи и систему долговременной стабилизации амплитуды поля в ускоряющей структуре, СВЧ система разрезного микротрона с высокой яркостью пучка на энергию до 35 МэВ с внешней инжекцией от линейного ускорителя с СВЧ пушкой. Перечисленные системы установлены на действующих ускорителях, использующихся для прикладных и фундаментальных исследований, и могут быть применены на вновь разрабатываемых ускорителях.

Достоверность результатов подтверждается надежным функционированием разработанных систем высокочастотного питания в составе действующих ускорителей электронов.

Личный вклад автора. Все перечисленные в работе результаты получены при личном участии автора, который являлся основным исполнителем в процессе разработки, создания и экспериментального исследования высокочастотных систем микротронов, описанных в диссертации.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на международном рабочем совещании "Beam Dynamics & Optimization"—(BDO) в 2002 и 2006 гг., на Всероссийской конференции по ускорителям заряженных частиц 1992, 2002, 2004 гг., на Международной конференции по ускорителям заряженных частиц США в 2001 г.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в России и за рубежом в 10 работах, список которых приводится в конце автореферата.

На защиту выносятся следующие основные результаты:

- Результаты исследования СВЧ системы микротрона с самосинхронизацией магнетрона сигналом, прошедшим через

ускоряющий резонатор (ускоряющую структуру) и ее применения в малогабаритном разрезном микротроне с энергией пучка до 12 МэВ.

- Структура тракта обратной связи автогенераторной СВЧ системы разрезного микротрона с энергией пучка 70 МэВ, конструкция тракта обратной связи и результаты его экспериментального исследования, в том числе в составе ускорителя.

- Система долговременной стабилизации амплитуды поля в ускоряющей структуре разрезного микротрона с энергией пучка 70 МэВ и результаты ее экспериментального исследования, в том числе в составе ускорителя.

- Структура СВЧ системы разрезного микротрона с высокой яркостью пучка, ее конструкция и результаты экспериментального исследования, в том числе в составе ускорителя.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Она содержит 136 листов основного текста с иллюстрациями, 77 рисунков, 8 таблиц, список использованных источников из 106 наименований.

Содержание диссертации.

Во введении кратко представлена актуальность и проблематика работы, а также описано содержание диссертации.

В первой главе, носящей обзорный характер, рассмотрены СВЧ системы классического микротрона, работы направленные на их исследование и определение параметров, обеспечивающих устойчивую работу ускорителя. В ней также рассмотрены требования, предъявляемые к СВЧ системам разрезных микротронов с рециркуляторами на постоянных магнитах и ускоряющими структурами со стоячей волной.

Во второй главе описаны модельные представления элементов СВЧ систем и модель пучка ускоренных электронов классического микротрона. В качестве модели ускоряющего резонатора (ускоряющей структуры) и магнетронного генератора применяется одиночный колебательный контур с сосредоточенными постоянными. Он удовлетворительно описывает свойства объемных резонаторов и взаимодействие с ними электронного пучка в узкой полосе частот вблизи собственной частоты рабочего типа колебаний. Подобная модель используется также и для ускоряющих структур со стоячей волной. Рассматривается диапазон частот 3÷4 полосы пропускания контура. В каждом случае контур соединен с одной или двумя длинными линиями, имеющими волновое сопротивление равное характеристическому сопротивлению применяемых волноводов, с помощью идеальных трансформаторов.

Такой подход с одной стороны использует сравнительно простые эквивалентные схемы, а с другой позволяет учесть волновые процессы в СВЧ трактах и корректно ввести запаздывания сигнала при его распространении в тракте. Высокочастотное напряжение на контуре представлено как сумма напряжений падающей и отраженных волн, таким образом, эквивалентные схемы элементов СВЧ системы микротрона, содержат тракт, в котором распространяются падающие и отраженные волны. Это избавляет от необходимости вычислять входную проводимость тракта, присоединенного к элементам СВЧ системы, и упрощает вывод уравнений колебаний в них.

Выведены уравнения колебаний в таких элементах СВЧ системы, как ускоряющий резонатор (ускоряющая структура) и магнетрон. Они составлены относительно напряжений падающей и отраженной волн и могут быть использованы для анализа установившихся и переходных процессов в элементах СВЧ системы. С помощью метода медленно меняющихся амплитуд уравнения приведены к виду, удобному для численных расчетов. Таким образом, колебания в ускоряющем резонаторе (ускоряющей структуре) и в магнетроне описываются двумя уравнениями первого порядка - одно относительно амплитуды, а второе относительно фазы колебаний.

Описана передача квазигармонических сигналов в дисперсионных СВЧ трактах. Это позволяет корректно ввести в уравнения запаздывание сигналов при их передаче между элементами СВЧ системы, а также зависимости электрических длин участков тракта от частоты колебаний.

Ускоряющий резонатор микротрона нагружен электронным пучком со всех орбит. В работе рассматривается взаимодействие электронного пучка и ускоряющего резонатора только на первой гармонике тока. В качестве модели пучка (для классического микротрона) используем модель с запаздыванием "релейного" типа. В ее рамках ток пучка в момент времени t определяется амплитудой поля в момент времени $t - T_e$, где T_e - время пролета электрона от первой до последней орбиты. Такая модель хорошо описывает процессы установления тока пучка. Однако, она не учитывает постепенное заполнение орбит от первых до последних, при установлении тока пучка,

нагружающего резонатор. Для более точного описания динамических свойств пучка модель пучка с запаздыванием "релейного" типа была модифицирована. Орбиты микротрона поделены на три группы: "ближние", "средние" и "дальние". Ток, нагружающий ускоряющий резонатор, представлен в виде суммы токов трех групп орбит с временами запаздывания, соответствующими пролету электрона от первой орбиты до последней в каждой группе.

В контуре магнетрона течет ток, наведенный электронным потоком. Здесь также рассматривается взаимодействие на первой гармонике тока. Для его описания удобно ввести электронную проводимость. Используемая нами зависимость электронной проводимости магнетрона от высокочастотного и анодного напряжений соответствует жесткому характеру возбуждения. В качестве модели клистрона используется четырехполюсник, имеющий амплитудную характеристику (снятую экспериментально) рассматриваемого усилителя.

В третьей главе описана схема СВЧ системы с самосинхронизацией магнетрона частью мощности прошедшей через ускоряющий резонатор. Составлена эквивалентная схема СВЧ системы микротрона и система уравнений, описывающая колебательные процессы в ней. В зависимости от заданных параметров она позволяет рассчитывать установившиеся и переходные процессы, как в традиционных СВЧ системах, так и в системе с самосинхронизацией магнетрона мощностью прошедшей через ускоряющий резонатор.

Анализ установившихся процессов в системе показал отсутствие в ней дополнительных видов колебаний (с частотами находящимися за полосой пропускания ускоряющего резонатора) характерных для традиционных СВЧ систем микротрона при уменьшении развязки. Это позволяет получать большие значения коэффициента стабилизации частоты генерации (относительно собственной частоты ускоряющего резонатора). Величина динамического коэффициента стабилизации частоты магнетрона (относительно резонансной частоты ускоряющего резонатора) при типовых значениях параметров резонатора может достигать $15\div 20$ и более. Увеличение мощности магнетрона (за счет работы в "фазе нагрузки") дает возможность увеличения мощности пучка ускоренных электронов на $15\div 25$ %, в зависимости от параметров магнетрона и режима ускорения.

Для тестирования модифицированной модели пучка проведены расчеты переходных процессов при отключенной цепи синхронизации и полном поглощении в развязке отраженной резонатором волны. Реакция тока пучка на возмущающее воздействие находится в соответствии с известными из литературы результатами эксперимента.

Для исследования влияния параметров системы на процесс ускорения были проведены расчеты переходных процессов. Результаты расчетов в основном сводятся к следующему:

- 1) Отклонение электрической длины цепи синхронизации от оптимального значения ведет к отклонению частоты генерации от собственной частоты резонатора с пучком. При этом уменьшается амплитуда поля в нем и ток пучка ускоренных электронов, а колебания

частоты более эффективно преобразуются в колебания амплитуды поля, что ведет к изрезанности импульса ускоренного тока.

2) Уменьшение ослабления в цепи синхронизации ведет только к росту динамического коэффициента стабилизации частоты, мощности на выходе магнетрона, и улучшению формы импульса тока пучка ускоренных электронов, но не приводит к затягиванию переходных процессов и укорочению импульса ускоренного тока.

3) В исследуемой СВЧ системе имеет место более "гладкий" характер процессов установления амплитуды и частоты колебаний (особенно при больших длинах СВЧ тракта), чем в системах с неполной развязкой. В СВЧ системе с самосинхронизацией магнетрона через ускоряющий резонатор возможно получение большей (по сравнению с традиционными системами на основе магнетрона с неполной развязкой) мощности пучка ускоренных электронов, в зависимости от используемого режима ускорения и максимально допустимого (для магнетрона) значения коэффициента стоячей волны.

Полученные результаты показывают преимущества рассматриваемой системы, по сравнению с системами традиционной конструкции, и ее перспективность для применения в малогабаритном разрезном микротроне. Для окончательного решения вопроса необходима разработка модели пучка ускоренных электронов разрезного микротрона и проведение более детальных расчетов.

Описана экспериментальная установка, созданная для исследования СВЧ системы микротрона с самосинхронизацией магнетрона через

ускоряющий резонатор. Она работает в трехсантиметровом диапазоне ($\lambda=3,2$ см). В ней используется магнетрон МИ-505, его выходная мощность 250 кВт. Основой установки является электромагнит одного из классических микротронов СГУ. В микротроне реализован режим ускорения с приростом энергии 0,62 энергии покоя электрона, мощность потерь в резонаторе при этом около 140 кВт.

Исследовано влияние электрической длины цепи самосинхронизации на величину тока пучка ускоренных электронов (на 15 орбите). Показано, что увеличение коэффициента передачи цепи самосинхронизации (от -30дБ до -16дБ при ослаблении отраженной резонатором волны 27дБ) улучшает форму импульса тока пучка. Величина импульсного и среднего тока пучка при этом также возрастает на 20%.

Результаты расчетов и эксперимента согласуются и показывают перспективность исследованной СВЧ системы для применения в малогабаритном разрезном микротроне.

В четвертой главе кратко описан разрезной микротрон с конечной энергией пучка до 70 МэВ, созданный в НИИЯФ МГУ. Описана автогенераторная СВЧ система этого ускорителя, выполненная на основе клистрона КИУ-147А, составлена ее эквивалентная схема. Выходная мощность клистрона 6 МВт. Рабочая частота ускорителя ~ 2856 МГц. Записана система уравнений, описывающая колебательные процессы в СВЧ системе, и проведен анализ установившихся процессов в ней при нагрузке ускоряющей структуры пучком ускоренных электронов. Показано, что

электрический режим системы более устойчив при работе клистрона в режиме перевозбуждения. На основе проведенного анализа разработана структура тракта обратной связи и определены его параметры. Он предназначен для обеспечения амплитудных и фазовых условий возбуждения и генерации колебаний на резонансной частоте ускоряющей структуры. Кроме того, он должен обеспечивать возможность управления амплитудой и частотой колебаний в ускоряющей структуре (в пределах ее полосы пропускания).

Разработан тракт обратной связи, выполненный в виде моноблока. Он предназначен для обеспечения амплитудных и фазовых условий возбуждения и генерации колебаний на резонансной частоте ускоряющей структуры. Переходное ослабление тракта, диапазоны его регулировки электромеханическим и электронным аттенюаторами, а также диапазон регулировки фазового сдвига и конструкция элементов тракта обратной связи, выбраны, исходя из требуемого уровня СВЧ мощности в номинальном режиме на входе клистрона и коэффициента передачи ускоряющей структуры. Для клистрона КИУ-147А ("Берег") уровень импульсной мощности входного сигнала составляет ~20 Вт при минимальной скважности 250. Тракт состоит из следующих основных элементов: (1) Аттенюатор с электромеханическим управлением (ослабление $0,3 \div 20$ дБ, вносимый сдвиг фазы $0 \div 102^\circ$). (2) Фазовращатель с электромеханическим управлением (сдвиг фазы $0 \div 370^\circ$, изменение ослабления в диапазоне регулировки фазы не более 0,5 дБ). (3) PIN-аттенюатор (ослабление $4,7 \div 22$ дБ, вносимый сдвиг фазы $0 \div 30^\circ$). (4) СВЧ

выключатель с электронным управлением (в состоянии «ВКЛ» потери передачи не более 1 дБ, в состоянии «ОТКЛ» потери передачи не менее 50 дБ). Переходное ослабление тракта в рабочем режиме (при минимальном ослаблении всех аттенуаторов и положении СВЧ выключателя «ВКЛ») не более 6 дБ, в аварийном режиме (при положении СВЧ выключателя «ОТКЛ») не менее 50 дБ.

Испытание тракта обратной связи на специальном стенде, показало, что он обеспечивает стабильную работу клистрона в режиме автогенератора с малым запаздыванием установления автоколебаний после выхода импульса высокого напряжения на плато. Было подтверждено экспериментально, что наибольшая стабильность ускоряющего поля достигается при работе клистрона в режиме перевозбуждения. В дальнейшем была достигнута устойчивая работа клистрона в автогенераторном режиме с высокодобротной ускоряющей структурой в цепи обратной связи при отсутствии развязывающего ферритового устройства и осуществлено ускорение электронов.

При экспериментальном исследовании тракта обратной связи в составе СВЧ системы ускорителя была выявлена необходимость долговременной стабилизации амплитуды поля в ускоряющей структуре. Для этого была разработана специальная система, которая была интегрирована в систему управления этого ускорителя. Датчиком системы стабилизации СВЧ мощности клистрона является специальный модуль преобразования. Постоянное напряжение на выходе модуля пропорционально величине импульсной СВЧ мощности, рассеиваемой в

стенках ускоряющей структуры, усредненной за 10-15 импульсов, при чувствительности около 10 В/Вт. Его основной элемент - пиковый детектор, выполненный по схеме "выборки-хранения". Входное сопротивление модуля 50 Ом, а рабочий диапазон импульсной входной мощности $0,02 \div 1,0$ Вт. Выходное напряжение не зависит от скважности в диапазоне ее изменения $250 \div 65000$ и от нестабильности положения (дрожания) переднего фронта импульса огибающей СВЧ колебаний, характерного для автогенераторных систем. Нормальная работа модуля преобразования обеспечивается при длительности огибающей импульса СВЧ колебаний не менее 6 мкс. Для поддержания долговременной стабильности средней величины СВЧ мощности клистрона, питающего ускоряющую секцию, используется статический безмодельный алгоритм на основе метода секущих. Таким образом, система управления формирует значение тока, управляющего ослаблением PIN-аттенюатора. СВЧ мощность клистрона может регулироваться как вручную, путем непосредственного управления PIN-аттенюатором, так и автоматически. В последнем случае на момент переключения в режим стабилизации производится дополнительное измерение величины мощности и последующее удержание этого значения с помощью вышеописанного алгоритма. Соответственно, при возврате в режим ручного управления исполнение алгоритма стабилизации приостанавливается. После включения режима стабилизации долговременная относительная нестабильность средней мощности уменьшается с $2 \div 3\%$ до величины, не превышающей $0,5\%$. Этим обеспечивается не менее чем пятикратное улучшение стабильности

амплитуды СВЧ поля в ускоряющей секции и, как следствие, надежное прохождение электронного пучка по орбитам рециркулятора разрезного микротрона.

Экспериментальное исследование тракта обратной связи и системы долговременной стабилизации амплитуды колебаний в ускоряющей структуре в составе ускорителя подтверждает обоснованность выбора структуры тракта обратной связи и основных параметров системы стабилизации.

В пятой главе кратко описан разрезной микротрон с высокой яркостью пучка и конечной энергией 35 МэВ, созданный в НИИЯФ МГУ. Этот ускоритель работает в десятисантиметровом диапазоне (частота ~2856 МГц). Предложена структура СВЧ системы этого ускорителя. В качестве источника мощности в ней используется клистрон КИУ-111А. Его выходная мощность (6 МВт) делится на 3 канала для питания СВЧ пушки, инжектора и основной ускоряющей секции. В каждом канале предусмотрена независимая регулировка величины мощности, фазовый сдвиг регулируется в двух каналах. Тракт высокого уровня мощности состоит из следующих основных элементов: двух трехдецибельных мостов с согласованными нагрузками; трех аттенюаторов поглощающего типа; двух фазовращателей; трех циркуляторов с поглощающими нагрузками, трех направленных ответвителей Бете и трех вакуумных окон. Аттенюаторы имеют следующие основные параметры: коэффициент стоячей волны не более 1,2; диапазон

изменения ослабления $0,2 \div 9$ дБ; фазовый сдвиг, вносимый при максимальном ослаблении, не более 130° . Фазовращатели реализованы с помощью замыкания подвижными сдвоенными короткозамыкателями (выполненными в виде дроссельных поршней) двух выходных плеч трехдецибелных мостов. Они обеспечивают сдвиг фазы $0 \div 420^\circ$, при изменении мощности на выходе не более 0,5 дБ. Между ускоряющими структурами и циркуляторами установлены направленные ответвители. Они имеют переходное ослабление 20 дБ при направленности 30 дБ. Сигнал с выходов направленных ответвителей пропорционален падающей волне на входах ускоряющих структур. Он дополнительно ослабляется на 20 дБ с помощью аттенуаторов с фиксированным ослаблением и поступает в тракт низкого уровня мощности.

Возбудитель клистрона содержит полупроводниковый задающий генератор и выходной усилитель. Полупроводниковый задающий генератор состоит из: синтезатора частоты, умножителя частоты и выходных усилителей. Синтезатор генерирует непрерывный сигнал с частотой $56 \text{—} 56,04$ МГц. В нем используется генератор, управляемый напряжением (ГУН), охваченный цепью фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Опорная частота синтезатора 5 МГц. Часть сигнала синтезатора ответвляется и через выходной усилитель поступает на синхронизацию лазера (~ 56 МГц 1 В). Затем частота умножается на 51 и сигнал усиливается. Выходные сигналы: непрерывный 2856 МГц 100 мВт (подается как опорный в тракт низкого уровня мощности), импульсный 2856 МГц 1 Вт.

Относительная нестабильность частоты 2856 МГц задающего генератора примерно $\pm 10^{-6}$ отн. ед., диапазон настройки ± 2 МГц с шагом 11 кГц.

Импульсный сигнал с частотой ~ 2856 МГц и мощностью 1 Вт поступает на вход двухкаскадного усилителя У2И-2. Длительность СВЧ импульса 6 мкс, а частота следования 150 Гц. Выходная мощность усилителя регулируется в диапазоне 0–200 Вт. К выходу усилителя присоединены направленный ответвитель с детекторной секцией и ферритовый вентиль. Сигнал с детекторной секции используется для контроля формы импульса огибающей на выходе усилителя. Он же поступает на вход схемы долговременной стабилизации выходной мощности. Неравномерность вершины импульса огибающей на выходе возбудителя не хуже $\pm 10^{-3}$ отн. ед., а долговременная стабильность амплитуды не хуже $\pm 5 \times 10^{-3}$ отн. ед.

Тракт низкого уровня мощности предназначен для контроля амплитуды колебаний в СВЧ пушке, инжекторе и основной ускоряющей структуре, фазового сдвига между ними, а так же отклонений их резонансных частот от частоты задающего генератора. Он содержит: три делителя СВЧ мощности на три канала, 6 фазовращателей, которыми устанавливаются нули фазовых детекторов; 6 фазовых детекторов и три детекторных секции. На делители мощности поступает сигнал с петель связи из ускоряющих структур. Мощность, выводимая из каждой структуры, делится поровну между двумя фазовыми детекторами и детекторной секцией. Три фазовых детектора служат для определения отклонений резонансных частот секций от частоты входного сигнала. На них подаются сигналы с направленных ответвителей (падающая волна на

входах ускоряющих структур) и $1/3$ часть мощности выводимой из этих структур с помощью петель связи. В остальных фазовых детекторах сравниваются фазы колебаний в структурах с фазой опорного сигнала, поступающего через делитель с задающего генератора. Нули фазовых детекторов устанавливаются дистанционно. Детекторные секции используются для контроля амплитуды колебаний и формы огибающих колебаний в ускоряющих структурах. Конструктивно, тракт низкого уровня выполнен в виде моноблока, размещенного вблизи ускорителя. Все соединения элементов блока и внешние подключения выполнены жесткими коаксиальными кабелями.

Проведена разработка и экспериментальное исследование входящих в нее элементов: тракта высокого уровня мощности и входящих в него волноводных элементов, возбуждителя клистрона и коаксиально - полоскового тракта низкого уровня мощности. СВЧ система микротрона собрана, проведена доводка и наладка ее элементов, выполнены эксперименты с ней на высоком уровне мощности. На первом этапе получен пучок ускоренных электронов на выходе инжектора. Получена зависимость энергии инжекции от фазового сдвига между ускоряющими структурами пушки и инжектора. Впоследствии были получены проектные параметры пучка ускорителя. Сгусток с зарядом 150 пК был ускорен до энергии 34,2 МэВ. Проведенные исследования подтвердили обоснованность предложенной структуры СВЧ системы этого микротрона.

В заключении приведены основные результаты работы. В процессе выполнения диссертационной работы при непосредственном участии автора были получены следующие основные результаты:

1. Предложена и разработана СВЧ система микротрона с самосинхронизацией магнетрона через ускоряющий резонатор, рассчитаны стационарные и переходные процессы в ней, проведено ее экспериментальное исследование на существующем в СГУ микротроне. Оценена возможность ее использования в разрезном микротроне с энергией пучка до 12 МэВ.
2. Разработана структура тракта обратной связи автогенераторной СВЧ системы разрезного микротрона с энергией пучка до 70 МэВ, созданного в НИИЯФ МГУ. Разработан тракт обратной связи. Проведено экспериментальное исследование элементов тракта и тракта в сборе, на низком уровне мощности, проведены исследования работы тракта в составе микротрона.
3. Разработана система долговременной стабилизации амплитуды поля в ускоряющей структуре и элементы, входящие в нее. Проведено экспериментальное исследование аппаратного модуля преобразования импульсного значения СВЧ мощности в пропорциональное ей постоянное напряжение. Проведено экспериментальное исследование системы стабилизации в составе микротрона.

4. Разработана структура СВЧ системы разрезного микротрона с высокой яркостью пучка и энергией до 35 МэВ, созданного в НИИЯФ МГУ. Разработаны и исследованы элементы системы, создана СВЧ система, с помощью которой были получены проектные параметры пучка ускоренных электронов.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Алексеев И.В., Владимиров Н.В., Горбачев В.П., Степанчук В.П. /Высокочастотная система микротрона. АС № 1176819 СССР Кл H05h // БИ №41.1992.
2. Алексеев И.В., Владимиров Н.В., Горбачев В.П., Степанчук В.П. / Система высокочастотного питания микротрона на самосинхронизированном магнетроне // Труды двенадцатого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. - Т-2. Дубна: ОИЯИ.,1992 - С 228—232.
3. Алексеев И.В., Горбачев В.П., Степанчук В.П. / Самосинхронизация магнетрона через ускоряющий резонатор микротрона // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. 2000. №1 (475). С. 9-12.

4. Barday R.A., Gorbachev V.P., Gorokhov A.M., Knapp E.A., Shvedunov V.I., Sobenin N.P., Sulimov A.A., Trower W.P., Vetrov A.A., Zayarny D.A., / High Brightness Race-Track Microtron Injector // Proceedings of 2001 Particle Accelerator Conferens.
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/p01/html/>, ТРАН161.- Chicago, Illinois, 2001.-P 1601.
5. Шведунув В.И., Бардай Р.А., Алексеев И.В., Горбачев В.П., Степанчук В.П. / СВЧ система разрезного микротрона на 35 МэВ // Труды 8 международного совещания Динамика и оптимизация пучков. 2002, Саратов: СГУ. С 107-112.
6. Долговременная стабилизация СВЧ мощности клистрона в ускорителе электронов / Грибов И.В., Ермаков А.Н., Горбачев В.П., Степанчук В.П. // Труды 18 конференции по ускорителям заряженных частиц.- Т-2. Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ 2004.- С 581-585.
7. Ermakov A.N., Gorbachev V.P., Gribov I.V., Ishkhanov B.S., Kamanin A.N., Pakhomov N.I., Chepurinov A.S., Shvedunov N.V., Shvedunov V.I., Sobenin N.P./ Conceptual Design of the Miniature Electron Accelerator Dedicated to IORT// XIX Всероссийская конференция по ускорителям заряженных частиц. (RuPAC-2004) 4-9 октября 2004 г. Дубна, Россия
<http://www.jinr.ru/RuPAC2004>.

8. Shvedunov V.I., Barday R.A., Gorbachev V.P., Frolov D.A., Gribov I.V., Knapp E.A., Novikov G.A., Pakhomov N.I., Shvedunov I.V., Skachkov V.S., et al / A Race-Track Microtron with High Brightness Beams // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators,

Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2004. V-531. 1 October N3, P 346-366.

9. Горбачев В.П., Степанчук В.П., Шведунув В.И. / СВЧ система малогабаритного разрезного микротрона // The Thirteenth International Workshop Beam Dynamics & Optimization (BDO'2006). St. Petersburg State University. 2006. December 21–23, Program and Abstracts. Saint-Petersburg. 2006- P-29.

10. Горбачев В.П., Ишханов Б.С., Полиектов В.В., Степанчук В.П., Шведунув В.И. / Источник электронов с большой яркостью пучка и его применения // Вестник СГТУ. 2007. №1, С 106-110.

Отпечатано в типографии
ООО "Ракурс"
Тираж 100 экз. Заказ N334