

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи



Мациевский Сергей Викторович

**Разработка и моделирование элементов резонансных
ускоряющих структур методом эквивалентных схем**

Специальность 01.04.20 —
«Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва — 2021

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Собенин Николай Павлович

Официальные оппоненты: **Павлов Юрий Сергеевич**,
доктор технических наук,
Институт физической химии и электрохимии
им. А. Н. Фрумкина Российской академии наук,
заведующий лабораторией радиационных техноло-
гий

Фещенко Александр Владимирович,
доктор физико-математических наук,
Институт ядерных исследований Российской ака-
демии наук,
врио заместителя директора по научной работе

Шведун Василий Иванович,
доктор физико-математических наук, профессор,
Научно-исследовательский институт ядерной фи-
зики им. Д. В. Скобельцына Московского государ-
ственного университета им. М. В. Ломоносова,
главный научный сотрудник

Защита состоится 26 мая 2021 г. в 15 часов на заседании диссертационного со-
вета МИФИ.01.05 при НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, г. Москва, Каширское
шоссе, д. 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте
<https://ds.mephi.ru/>.

Отзывы на автореферат в одном экземпляре, заверенные печатью учреждения,
просьба направлять по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31, учё-
ному секретарю диссертационного совета МИФИ.01.05.

Автореферат разослан _____ 2021 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета
МИФИ.01.05,
к-т тех. наук



Лалаян М. В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В настоящее время развитие ускорителей заряженных частиц (УЗЧ) происходит в двух основных направлениях: прикладном и научном.

Для прикладного направления особый интерес представляют ускорители электронов с выходной энергией пучка до 10 МэВ [1] в силу того, что в указанной области энергий электронов отсутствует рождение радиоактивных изотопов на материалах ускорителя и мишени [2]. Для прикладных целей часто используют линейные ускорители электронов (ЛУЭ), построенные с использованием цепочек связанных резонаторов (ЦСР). Данный вид ускорителей компактен, технологичен, имеет хорошие параметры пучка и широкие возможности для перестройки энергии.

Другим актуальным направлением развития ускорительной техники является создание крупных ускорительных комплексов для фундаментальных научных исследований. В таких установках широкое применение находят сверхпроводящие (СП) ускоряющие структуры (УС), обладающие целым рядом особенностей, отсутствующих у структур, работающих при нормальной температуре и требующих специального рассмотрения. Одним из крупных проектов ускорительного комплекса, использующего СП УС, является ионный коллайдер NICA [3].

Для расчёта электродинамических характеристик (ЭДХ) ячеек обычно используются метод конечных элементов (МКЭ) или метод конечных разностей (МКР). Программы, построенные на данных методах, непосредственно решают уравнения Максвелла на аппроксимирующей геометрию устройства сетке и позволяют найти решение задачи распределения электрического поля с высокой точностью. При проектировании реальных устройств размер решаемой задачи может быть большим, и её решение может требовать значительного количества вычислительных ресурсов ЭВМ и занимать длительное время. При учёте связи не только между соседними ячейками УС, но и с удалёнными ячейками, размер решаемой задачи при использовании данных методовкратно возрастает.

Для уменьшения времени, требуемого для оптимизации характеристик ЦСР, можно воспользоваться методом эквивалентных схем (МЭС). Данный метод позволяет исследовать как одиночные резонаторы, так и секции на стоячей волне (СВ) и бегущей волне (БВ) [4–6]. При этом, количество решаемых уравнений равно количеству ячеек секции, благодаря чему метод является значительно менее требовательным к ресурсам ЭВМ. Кроме того, аналитический анализ некоторых типов УС позволяет в упрощённом случае находить оптимальные параметры ячеек секций [7]. Применение МЭС в комбинации с МКР и МКЭ позволяет значительно сократить трудозатраты на разработку УС, тем самым снизив их стоимость.

ЛУЭ на СВ получили широкое распространение в диапазоне энергий до 10 МэВ за счёт высокого КПД в стационарном режиме работы и относительной простоты настройки [8]. Однако, заполнение ускоряющих секций на СВ мощностью занимает некоторое время, из-за чего начало импульса тока задерживается относительно начала импульса СВЧ мощности. Заполнение УС на БВ мощностью происходит значительно быстрее, но их КПД при этом меньше. Гибридные ЛУЭ, состоящие из группирователя на СВ и ускоряющей секции на БВ сочетают в себе качества УС на СВ и БВ — короткий переходной процесс, эффективную группировку без необходимости использования внешнего магнитного поля, хорошие параметры пучка [9; 10]. Такая схема использована некоторых промышленных ускорителях [11—13]. Однако вопросы СВЧ питания таких структур освещены недостаточно.

В настоящее время растёт количество ускорителей, в том числе прикладного применения, работающих в СП режиме. Особенности СП ускорителей требуют особой проработки узлов СВЧ питания, в частности, устройств ввода мощности (УВМ). Разработка и исследование УВМ СП резонаторов является важной задачей, т.к. большой степени УВМ определяет как эффективность, так и надёжность всей установки [14]. Между тем, применение МЭС в сочетании с другими методами расчёта может позволяет существенно облегчить задачу разработки и оптимизации УВМ.

Цели и задачи исследования:

1. Развитие математической модели УС, представленных в виде цепочек элементов с сосредоточенными параметрами. Обобщение метода на случай связи ячеек УС как с соседними, так и с удалёнными ячейками; учёт устройств связи с подводющим трактом, соединительных трактов.
2. Разработка основанной на МЭС программы численного моделирования и оптимизации ЭДХ резонаторов и ЦСР.
3. Сравнение результатов расчётов УС различных конфигураций, проведённых при помощи разработанной программы, с данными моделирования с использованием МКЭ.
4. Численное моделирование и расчёт характеристик гибридного ЛУЭ, состоящего из группирователя на СВ и УС на БВ, при различных токах пучка и длинах секций. Экспериментальное исследование характеристик макета группирователя на СВ.
5. Разработка и оптимизация параметров УВМ в СП полуволновый резонатор для проведения криогенных тестов, а также для работы в составе ускорительного комплекса с широким диапазоном тока ускоряемого пучка NICA.

Научная новизна:

1. Разработана программа расчёта резонаторов и ЦСР с произвольными ЭДХ ячеек, построенная на основе МЭС, позволяющая без больших затрат машинных ресурсов и времени проводить моделирование и оптимизацию УС на СВ и БВ с большим количеством ячеек с учётом связи

как с соседними, так и с удалёнными ячейками; с учётом устройств связи с подводющим трактом, соединительных трактов. Проведена экспериментальная проверка разработанных алгоритмов и программ на макете группирователя на СВ.

2. Предложен и реализован метод моделирования переходных процессов в секциях на СВ и БВ с возможностью учёта связи с соседними и удалёнными ячейками.
3. Проведён анализ системы питания гибридного ЛУЭ с группирующей секцией на СВ и ускоряющей секцией на БВ при различных токах пучка и длинах секций. Сформулированы требования к секциям гибридного ЛУЭ, обеспечивающие устойчивую работу генератора.
4. Предложена схема УВМ в СП полуволновый резонатор с широким диапазоном рабочего тока пучка, обеспечивающая существенное снижение механических напряжений в керамическом СВЧ окне.

Практическая значимость:

1. Разработанная и верифицированная программа численного расчёта резонаторов и ЦСР на СВ и БВ позволяет значительно ускорить разработку УЗЧ за счёт использования МЭС. Алгоритм позволяет моделировать УС с учётом связи соседних и удалённых ячеек. Код зарегистрирован в реестре программ для электронных вычислительных машин ФИПС под именем LinacCalc и номером 2018664631 [A1].
2. Обоснованы требования к системе питания гибридного ЛУЭ, состоящего из секций на СВ и БВ, обеспечивающие устойчивую работу установки. Использование рассмотренной схемы питания позволяет эффективно использовать СВЧ мощность за счёт сокращения времени заполнения секции на СВ мощностью. Результаты проведённого исследования характеристик ускоряющей секции с энергиями пучка около 10 МэВ позволили разработать технический проект гибридного ЛУЭ в S-диапазоне с импульсным током пучка порядка 0,1 А.
3. Разработано УВМ для СП полуволнового резонатора коллайдера NICA. Устройство обеспечивает более эффективное, чем в устройствах с фиксированной антенной, использование СВЧ мощности. Предложенная конструкция со скользящими контактами снижает механические напряжения в керамическом СВЧ окне, тем самым повышая надёжность устройства. Разработанное устройство предполагается к использованию в инжекторе ионного коллайдера NICA.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика, алгоритм, выражения и программа для расчёта распределения ускоряющих полей, входных сопротивлений и переходных процессов ускоряющих структур различных типов с учётом связи соседних и удалённых ячеек, подводящих и соединительных трактов при помощи метода эквивалентных схем в секциях на стоячей и бегущей волнах.

2. Результаты верификации разработанной программы расчёта характеристик резонаторов и цепочек связанных резонаторов методом эквивалентных схем путём сравнения результатов моделирования с результатами моделирования в других программах. Результаты экспериментальной проверки расчётных результатов на макете группирователя на стоячей волне.
3. Результаты оценки требований к системе питания гибридного линейного ускорителя электронов, состоящего из секций на стоячей и бегущей волнах, обеспечивающих устойчивую работу СВЧ генератора на рабочей частоте секции. Результаты моделирования и оптимизации характеристик электронной пушки, группирователя на стоячей волне и ускоряющей секции на бегущей волне; расчёта динамики электронных пучков в них. Результаты экспериментального исследования и настройки макета группирователя на стоячей волне гибридного линейного ускорителя электронов.
4. Результаты электродинамического, теплового и механического моделирования, оптимизации параметров и настройки устройства ввода мощности в сверхпроводящий полуволновый резонатор для ионного инжектора коллайдера NICA.

Достоверность полученных результатов численного моделирования обеспечивается использованием многосторонне апробированного программного обеспечения, сравнением результатов расчётов, проведённых различными программами, сравнением расчётов тестовых моделей со справочными данными и результатами измерений ЭДХ макетов устройств.

Достоверность математических выкладок обеспечивается проверкой при помощи библиотек символьного вычисления, а также сравнения результатов расчётов с тестовыми моделями.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты работы докладывались на российских и международных конференциях

- XXIX Linear Accelerator Conference (LINAC 18), Beijing, China, 2018;
- XVIII International Conference on RF Superconductivity (SRF 2017), Lanzhou, China, 2017;
- VIII International Particle Accelerator Conference (IPAC 17), Copenhagen, Denmark, 2017;
- XXVIII Linear Accelerator Conference (LINAC 16), East Lansing, MI USA, 2016;
- VII International Particle Accelerator Conference (IPAC 16), Busan, Korea, 2016;
- XXVI Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 2018), Portvino, Russia, 2018.
- XXV Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 2016), Saint-Petersburg, Russia, 2016;

- XXIV Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 2014), Obninsk, Russia, 2014;
- I–IV Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз, 2017–2020;
- Научная сессия НИЯУ МИФИ, Москва 2013–2015;

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 14 печатных работах, из них 3 — в научных изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, 1 — в рецензируемых изданиях, включённых в Перечень ВАК, 1 — свидетельство на программу для электронных вычислительных машин, 9 — в сборниках трудов международных конференций.

Личный вклад. Дополнен разработанный рядом авторов метод эквивалентных схем для анализа системы связанных резонаторов выводами для двух вариантов нормировок выражений — ёмкостной и индуктивной связи между резонаторами. Проведено обобщение выражений и алгоритмов численного расчета характеристик переходного процесса в системах связанных резонаторов.

Проведена оценка требований к секциям на СВ и БВ гибридного ЛУЭ, обеспечивающих устойчивую работу устройства на рабочей частоте в отсутствии ферритовой развязки. Настроена электронная пушка, группирователь и ускоряющая секция, проведён расчёт динамики электронного пучка. Измерен и настроен макет трёхячеечного группирователя на СВ, построенного на основе ячеек бипериодической ускоряющей структуры (БУС).

Для СП полуволнового резонатора обоснованы требования к мощности генератора и диапазону подстройки связи. Разработана модель тестового и рабочего УВМ, проведены электродинамические, тепловые и механические расчёты.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируются цели и задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

В **первой главе** проводится обзор выражений, описывающих УС и резонаторы при помощи МЭС. Эквивалентная схема (ЭС) ячейки секции с комбинированной связью изображена на рис. 1. В ней для описания распределённого электромагнитного поля используются сосредоточенные радиотехнические элементы. Ёмкостные и индуктивные элементы соответствуют областям с преобладающим электрическим и магнитным полями соответственно. Резистивные элементы позволяют учесть омические потери в стенках ячеек. Для ячеек секций с комбинированной связью между всеми ячейками секции проведён вывод системы уравнений в стационарном случае в двух вариантах нормировки амплитуды ускоряющего поля. Получены выражения дисперсионной характеристики бесконечной однородной УС для случая с потерями и без; выражения для нахождения входного сопротивления ячеек ТТВ.

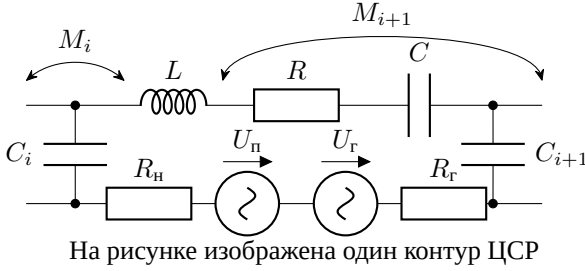


Рис. 1 — ЭС ускоряющей ячейки с комбинированной связью

Для нахождения комплексных коэффициентов матрицы рассеяния секций на БВ на основе расчёта МЭС предложено использовать дисперсионные характеристики ячеек УС в области проводимости секции и свойство унитарности матрицы рассеяния за пределами этой области.

$$S_{11} = \frac{\hat{Z}_{\text{вх}} - 1}{\hat{Z}_{\text{вх}} + 1}.$$

$$S_{12} = \begin{cases} \sqrt{1 - |S_{11}|^2} \exp\left(-2\pi f \sum_{n=1}^N \frac{D_n}{v_{\text{гp}n} Q_n}\right) \times \\ \times \exp\left(j \sum_{n=1}^N \arccos\left(\frac{f_{0n}^2 - f^2}{f^2 K_n^H + f_{0n}^2 K_n^E}\right)\right), & \frac{f_0^2 - f^2}{f^2 K_n^H + f_{0n}^2 K_n^E} \in [-1, 1]; \\ \sqrt{1 - |S_{11}|^2} \exp\left(j \left[\angle S_{11} + \frac{\pi}{2}\right]\right), & \frac{f_0^2 - f^2}{f^2 K_n^H + f_{0n}^2 K_n^E} \notin [-1, 1]. \end{cases}$$

На основе этих выражений рассмотрено два способа анализа систем, состоящих из нескольких секций — метод внесения эквивалентного сопротивления в схему и метод обобщённого многополюсника.

Представлена система дифференциальных уравнений, описывающая секцию связанных резонаторов во временной области в виде [A10]

$$[T][\ddot{X}] = [G(x, t)],$$

где каждое уравнение системы имеет вид

$$\sum_{n=1}^N \left(\frac{K_n^H}{2} \frac{f_0}{f_n} \frac{d^2 x_n}{dt^2} - 2\pi^2 K_n^E f_0^2 x_n \right) + \frac{d^2 x}{dt^2} = -\frac{2\pi f_0}{Q_0} (1 + \chi_r + \chi_n) \frac{dx}{dt} - 4\pi^2 f_0^2 x + 8\pi f_0 f_r \sqrt{\frac{\pi f_0 P_r \chi_r}{Q_0}} \cos(2\pi f_r t + \varphi_0).$$

Для решения системы численно, она сведена к виду

$$\begin{cases} [\dot{X}] = [Y], \\ [\dot{Y}] = [T]^{-1}[G(x, t)]. \end{cases}$$

Представлены выражения нахождения оптимальной частоты ячеек ТТВ и их связи с подводющим волноводом для однородной полубесконечной секции на БВ без потерь.

Для одиночного резонатора предложен способ определения оптимальных параметров коэффициента связи и мощности подводящего СВЧ генератора для случая подключения к одиночному резонатору. При нахождении этих получены приведены выражения, позволяющие учесть расстройку частоты резонатора.

Показано, что для случая превалирующей связи по электрическому или магнитному полю соседних ячеек выражения с ёмкостной и индуктивной нормировкой могут быть использованы для формулировки задачи нахождения собственных значений и собственных векторов $[A][X] = \Omega[X]$.

Во второй главе проведено сравнение расчётов тестовых УС, выполненных с использованием МЭС и МКЭ. Для проверки выражений в частотной области проведён анализ секций на СВ (рис. 2а) и БВ (рис. 2б).

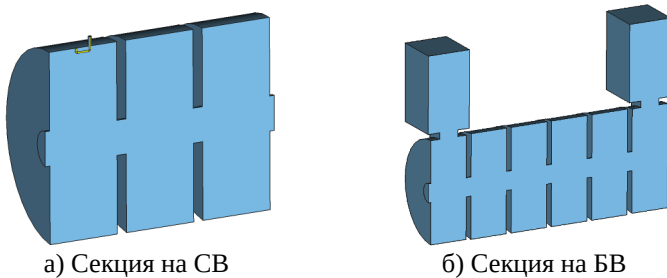
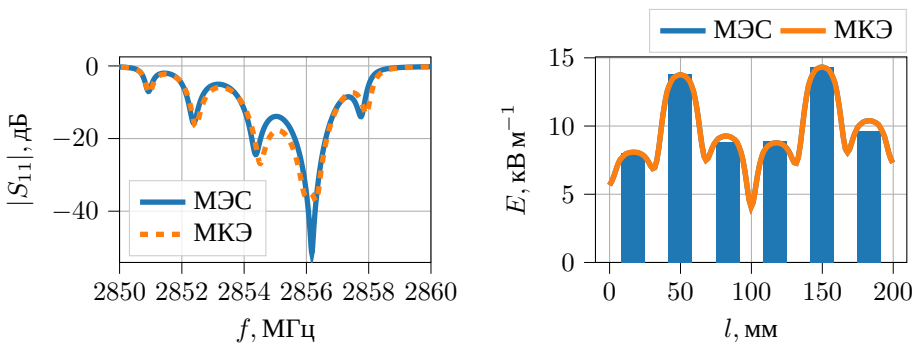


Рис. 2 — Сечения моделей УС

Сравнение проведено для расчётов распределения ускоряющего поля, модуля коэффициента отражения S_{11} (рис. 3). Сравнение показало, что точность расчёта МЭС превосходит точность, достигаемую при изготовлении УС, что позволяет использовать разработанную программу LinacCalc для моделирования и настройки УС как на СВ, так и на БВ [A1].

Сравнение расчёта дисперсионных характеристик секций проведено для трёх типов УС: круглого диафрагмированного волновода (КДВ), круглого диафрагмированного волновода с магнитной связью (КДВ-М) и ячейки ВЧ дефлектора на БВ [A5], применяемых в различных ускорительных установках. Три типа ячеек имеют различный характер связи с соседними ячейками: ёмкостной, индуктивный и комбинированный. Сравнение показало, что точность расчёта МЭС



а) Модуль коэффициента отражения от входа секции б) Распределение ускоряющего поля в секции

Рис. 3 — Результаты моделирования секции на БВ при помощи МЭС и МКЭ

превосходит точность, достигаемую при изготовлении УС, что позволяет использовать разработанную программу LinacCalc для моделирования и настройки УС как на СВ, так и на БВ.

Для УС ВЧ дефлектора исследован случай большой связи между ячейками. Моделирование показало, что в этом случае учёт связи удалённых ячеек позволяет точнее смоделировать поведение секции при помощи МЭС (рис. 4).

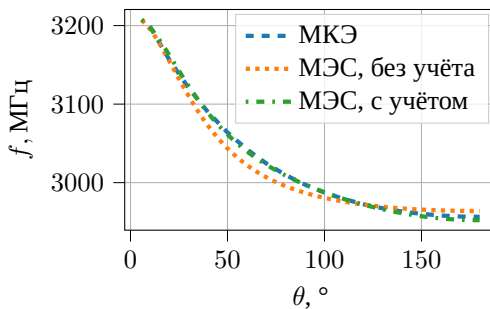


Рис. 4 — Результаты моделирования дисперсионной характеристики секции ВЧ дефлектора на БВ при помощи МКЭ и МЭС с и без учёта связи удалённых ячеек

Для проверки выражений расчёта переходных процессов проведено сравнение распределения амплитуд электрического поля в секции во временной и частотной областях. Сравнение показало, что распределение амплитуды ускоряющего поля после окончания переходного процесса, рассчитанное во временной области, совпадает с распределением, рассчитанным в частотной области (рис. 5) [A10].

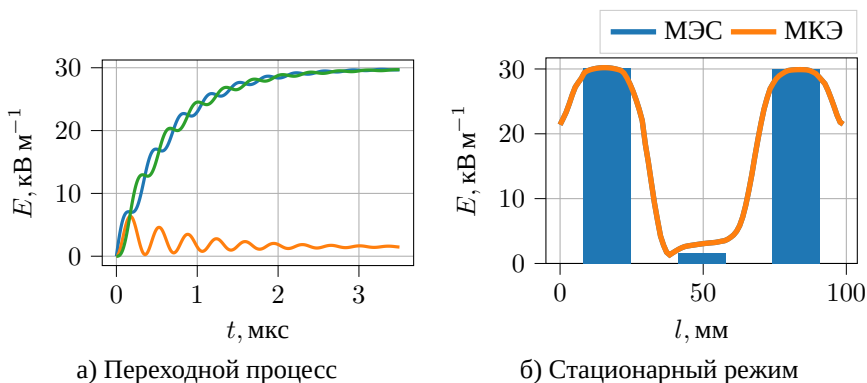


Рис. 5 — Распределение амплитуды ускоряющего поля в секции

Проведена проверка метода анализа устройств, состоящих из нескольких УС. Для проверки использованы две секции на БВ, соединённые волноводом. Выполнен анализ модуля коэффициента отражения от секций при различных длинах соединяющего волновода (рис. 6); найдены значения среднеквадратичного отклонения разности положения и амплитуды резонансных пиков, рассчитанных двумя методами. Сравнение показало, что точность расчёта МЭС превосходит точность, достигаемую при изготовлении УС, что позволяет использовать разработанную программу LinacCalc для моделирования и настройки УС как на СВ, так и на БВ.

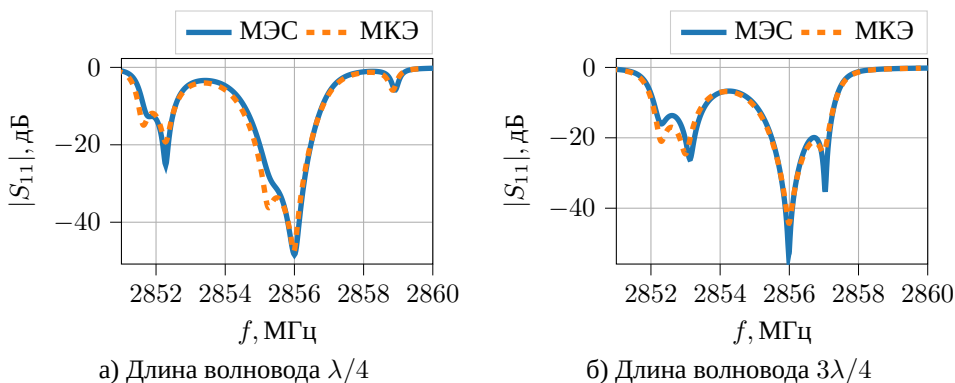
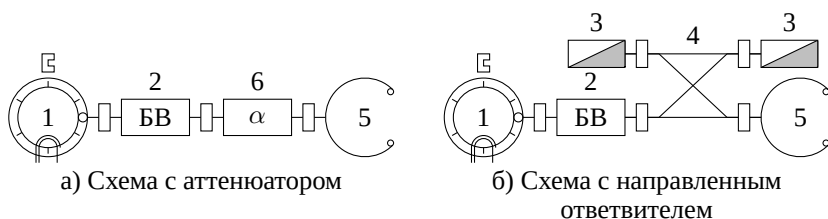


Рис. 6 — Зависимость модуля коэффициента отражения секций на БВ от частоты для различных длин соединяющего волновода

По результатам проверки работы различных модулей программы LinacCalc сделан вывод о том, что она обеспечивает эффективное и корректное моделирование характеристик УС на СВ и БВ.

В **третьей главе** исследуется гибридный ЛУЭ, состоящий из секций на СВ и БВ [А11]. Рассмотрена схема питания ЛУЭ с секцией на БВ с отрицательной дисперсией (КДВ-М), реализованная при помощи аттенуатора (рис. 7а) или направленного ответвителя (рис. 7б).



1 — СВЧ генератор, 2 — секция на БВ, 3 — поглощающая нагрузка, 4 — волноводный мост, 5 — секция на СВ, 6 — аттенуатор

Рис. 7 — Схема питания гибридного ЛУЭ с секцией на БВ с отрицательной дисперсией

На основе анализа баланса энергий и мощностей в секциях ускорителя в диапазоне токов пучка 0,1–0,5 А при помощи МЭС определены оптимальные длины секций (рис. 8а) и отражение от входа УС (рис. 8б). Определены оптимальные длины секций, при которых не требуется использования специальной развязки генератора с УС; найдены длительности импульсов тока пучка, при которых КПД гибридного ЛУЭ, с учётом задержки импульса тока, больше КПД ускорителей со сходными параметрами на СВ и БВ.

Для импульсного тока пучка 0,1 А при энергии на выходе 10 МэВ проведено моделирование и оптимизация характеристик трёхэлектродной электронной пушки, группирователя на СВ (рис. 9а) и секции на БВ (рис. 9б). Проведено экспериментальное исследование макета группирователя на СВ.

Ввод мощности в секции на СВ и БВ рассчитывался с использованием МЭС. Для секции на БВ предварительная настройка ячеек ТТВ была выполнена при помощи аналитических выражений с последующим уточнением при помощи МКЭ [А7; А8]. Предварительные результаты оказались близки к оптимальным значениям, что позволяет использовать разработанную программу для ускорения расчёта характеристик секций на БВ.

Расчёт динамики частиц в электронной пушке [А6] был произведён при помощи программы egun [15], секции на СВ и БВ рассчитывались при помощи программ семейства Beamdulac [16]. В таблице приведены параметры Твисса,

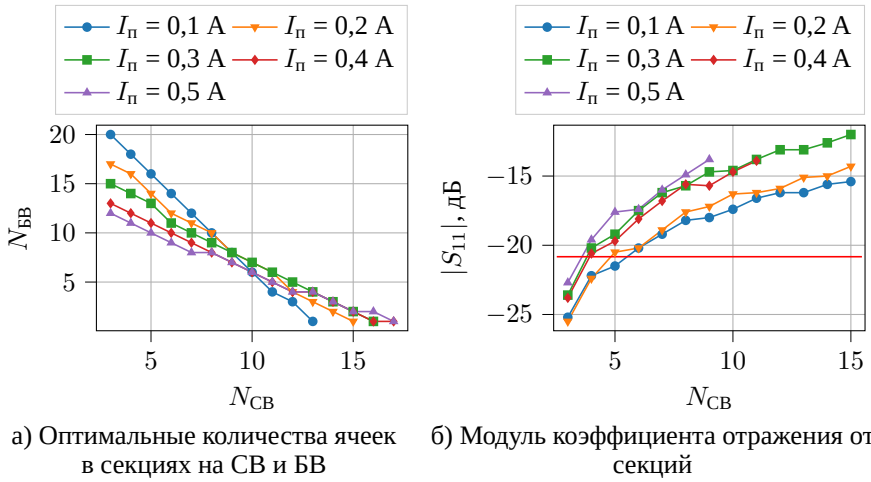
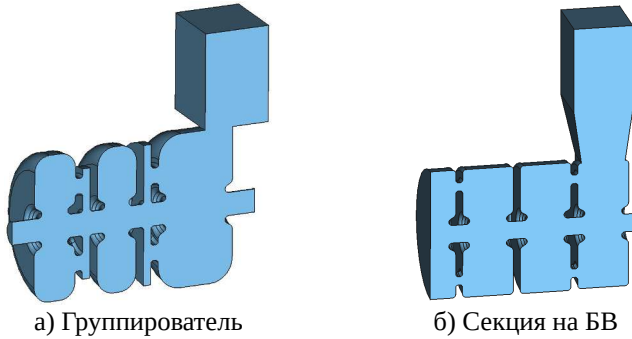


Рис. 8 — Зависимости параметров гибридного ЛУЭ в зависимости от количества ячеек в секции на СВ



Модель секции на БВ ограничена тремя ячейками

Рис. 9 — Сечения моделей оптимизированных секций

импульсный ток и средняя энергия пучка электронов на выходе из секций ускорителя [А6—А8].

Приведены результаты измерения и настройки макета трёхячеечного группирователя (рис. 10) [А3; А4; А9]. Описана разработанная программа beadpull для измерительного комплекса ПИРС.

Четвёртая глава посвящена вопросам разработки УВМ в СП полуволновый резонатор в диапазоне тока пучка $10^{-4} - 10^{-2}$ А [А2; А12—А14].

Параметры ускоряемого пучка на выходе из секций

Параметр	Электронная пушка	Секция СВ	Секция БВ
α	-0,97	-0,49	-0,57
β , см рад ⁻¹	6,45	3,46	28,6
ϵ , см мрад	16,2	6,2	2,3
I , А	0,25	0,1	0,1
W , МэВ	0,03	0,96	9,98



а) В сборе



б) В разобранном виде

Рис. 10 — Макет группирователя на СВ

При помощи МЭС проведён анализ необходимой подводимой мощности при подстраиваемой связи генератора с резонатором. Оптимальные величины связи изображены на рис. 11. Исходя из этих величин было определено значение необходимого диапазона движения антенны УВМ для обеспечения изменения связи, которое составило 12 мм.

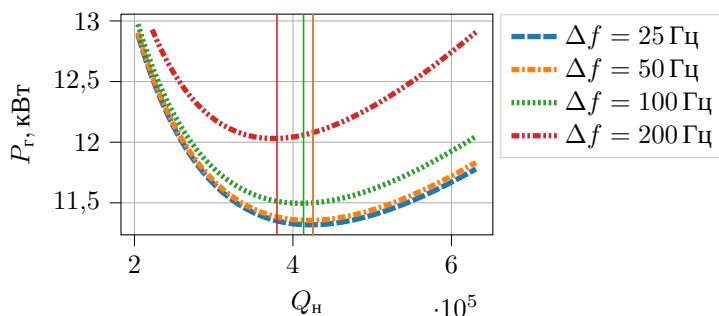


Рис. 11 — Зависимость необходимой подводимой мощности от величины нагруженной добротности резонатора для различных значений расстройки частоты при токе пучка 10^{-2} А

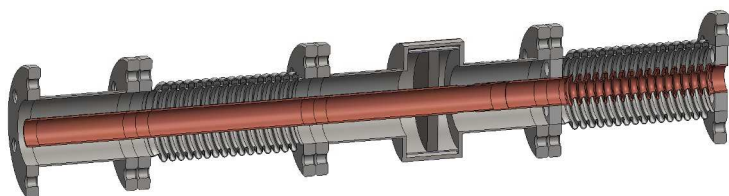


Рис. 12 — Сечение модели УВМ в СП полуволновый резонатор

Разработана модель УВМ (рис. 12). Проведены электродинамические, тепловые и механические расчёты и оптимизация его характеристик [А13]. Расчёты показали, что при номинальных условиях работы ускорителя динамические тепловые нагрузки на криосистему будут незначительными. Основным фактором, влияющим на надёжность устройства, оказалось наличие статических механических нагрузок на керамическое СВЧ окно, возникающее при изменении положения антенны устройства. Для снятия этих напряжений предложено использование скользящего контакта центрального проводника в воздушной части УВМ, что позволило снизить уровень механических напряжений в окне примерно в два раза. Проведено исследование опасных уровней мультипакторного разряда в УВМ. Разработан вариант УВМ для проведения вертикальных тестов ячеек (рис. 13). Устройство изготовлено в НИИ ЯП БГУ.



а) Сечение модели устройства



б) Устройство в сборе

Рис. 13 — Прототип УВМ для проведения вертикальных тестов полуволновых СП резонаторов

В **заключении** приведены основные результаты работы:

1. Проведена проверка и обобщение представленных в литературе выражений анализа УС при помощи МЭС с учётом связи соседних и удалённых ячеек; подводящих и соединительных трактов.
2. На основе анализа математической модели ЦСР получены выражения для моделирования переходных процессов в ускоряющих секциях на СВ и БВ с учётом связи соседних и удалённых ячеек.
3. Разработана программа математического моделирования УС с помощью МЭС.

4. Проведена проверка полученных выражений путём сравнения расчётов УС различных конфигураций с результатами моделирования другими программами.
5. Проведён анализ баланса мощностей и энергий в линейном ЛУЭ, состоящем из группирователя на СВ и ускоряющей секции БВ, питающихся от одного СВЧ генератора. Определены условия устойчивой работы ускорителя. Разработаны и настроены трёхэлектродная электронная пушка, группирователь на СВ и секция на БВ. Измерены характеристики макета трёхячеечного группирователя на СВ, построенного на основе ячеек БУС. Рассчитана динамика электронов в ускорителе.
6. Определены требования к системе питания полуволнового СП резонатора. Разработаны УВМ для тестового и в рабочего криостатов. Для обоих устройств проведены электродинамическое, тепловое и механическое моделирование; рассчитаны уровни возникновения мультипакторного разряда.

Публикации автора по теме диссертации

- A1. LinacCalc / С. В. Мациевский // Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем. Официальный бюллетень. — ФИПС, М., 2018. — 20 нояб. — № 2018664631.
- A2. Development of the QWR power coupler for the NICA injector [Text] / S. V. Matsievskiy, T. A. Lozeeva, [et al.] // Physics of Atomic Nuclei. — 2018. — Nov. — Vol. 81, no. 11. — P. 1643—1645. — (Web of Science, Scopus).
- A3. Investigation of the hybrid electron linac with negative group velocity [Text] / S. V. Matsievskiy, E. A. Savin, [et al.] // Journal of Physics : Conference Series. — 2016. — Vol. 747, no. 012078. — P. 1—4. — (Web of Science, Scopus).
- A4. Combined generating-accelerating buncher for compact linear accelerators [Text] / S. V. Matsievskiy, E. A. Savin, N. P. Sobenin, [et al.] // Journal of Physics : Conference Series. — 2016. — Vol. 747, no. 012079. — P. 1—4. — (Web of Science, Scopus).
- A5. Анализ высокочастотных дефлекторов на бегущей и стоячей волнах [Текст] / С. В. Мациевский, А. Ю. Смирнов [и др.] // Вестник национального исследовательского ядерного университета МИФИ. — М., 2014. — Т. 3, № 1. — С. 78—84. — (ВАК).
- A6. Matsievskiy, S. V. Three electrode electron gun with the decreased anode voltage geometry optimization [Text] / S. V. Matsievskiy, E. A. Savin // Proc. of RuPAC2014 (Obninsk). — 06/2016. — P. 45—47.
- A7. Hybrid electron linac with standing and travelling wave accelerating sections [Text] / S. V. Matsievskiy, E. A. Savin, [et al.] // Proc. of IPAC'16 (Busan, Korea). — 06/2016. — P. 1791—1793.

- A8. Electron beam dynamics calculation and accelerating structure geometry design in 10 MeV hybrid electron linac [Text] / S. V. Matsievskiy, E. A. Savin, [et al.] // Proc. of RuPAC'16 (St. Petersburg). — 02/2017. — P. 228—230.
- A9. Compact standing wave electron linac with the hybrid accelerating and power generation cell [Text] / S. V. Matsievskiy [et al.] // Proc. of IPAC'16 (Busan, Korea). — 07/2016. — P. 1797—1799.
- A10. *Matsievskiy, S. V.* Simulation of the transitional process in accelerating sections by equivalent circuit method [Text] / S. V. Matsievskiy, V. I. Kaminskiy, Ya. V. Shashkov // Proc. of LINAC'18 (Beijing, China). — 08/2018. — P. 145—147.
- A11. *Matsievskiy, S. V.* Traveling wave accelerating structure power input calculation with equivalent circuit method [Text] / S. V. Matsievskiy, V. I. Kaminskiy // Proc. of LINAC'16 (East Lansing, USA). — 05/2017. — P. 864—866.
- A12. Input power coupler for NICA injector coaxial quarter wave SC cavity [Text] / S. V. Matsievskiy, T. A. Bakhareva, [et al.] // Proc. of SRF'17 (Lanzhou, China). — 01/2018. — P. 61—63.
- A13. *Matsievskiy, S. V.* Input power coupler for NICA injector coaxial half wave SC cavity [Text] / S. V. Matsievskiy, M. A. Gusarova, M. V. Lalayan // Proc. of RUPAC'18 (Protvino). — 11/2018. — P. 375—377.
- A14. Low beta superconducting cavity for the new injector linac for Nuclotron – NICA [Text] / S. V. Matsievskiy [et al.] // Proc. of IPAC'17 (Copenhagen, Denmark). — 05/2017. — P. 1058—1060.

Список литературы

1. *Шведунов, В. И.* Новое поколение ускорителей электронов НИИЯФ МГУ [Текст] / В. И. Шведунов. — 05.2013. — презентация.
2. *Барбье, М.* Наведённая радиоактивность в ускорителях [Текст] / М. Барбье // Труды международной конференции по ускорителям (Дубна, 1963). — М., 1964. — С. 1005.
3. Status of R&D on new superconducting injector linac for Nuclotron – NICA [Text] / G. V. Trubnikov [et al.] // Proc. of IPAC'17 (Copenhagen, Denmark). — Geneva, 05/2017. — P. 3282—3285.
4. *Wilson, P. V.* High energy electron linacs: applications to storage ring RF systems and linear colliders [Text] / P. V. Wilson ; SLAC. — Accelerator Center, SLAC, 2575 Sand Hill Rd., Menlo Park, CA 94025, USA, 11/1991.
5. *Калужный, В. Е.* Ускоряющие системы с бегущей и стоячей волной для коллайдеров [Текст] : дис. ... д-ра тех. наук : 01.04.20 / Калужный Валентин Егорович. — М. : МИФИ, 2006. — 305 с.

6. *Степнов, В. В.* Расчёт характеристик линейного ускорителя электронов со стоячей волной на основе модели связанных контуров [Текст] : дис. ... канд. тех. наук : 01.04.20 / Степнов Владимир Викторович. — М. : МИФИ, 1983. — 191 с.
7. Анализ и оптимизация узлов высокочастотных секций линейных ускорителей и deflectоров заряженных частиц с помощью эквивалентной схемы [Текст] / В. Е. Калужный [и др.] // Журнал технической физики. — СПб., 2014. — Сент. — Т. 84, № 7. — С. 101—109.
8. *Flöttmann, K.* Comparison of standing and traveling wave operations for a positron pre-accelerator in the TESLA linear collider [Text] / K. Flöttmann, V. A. Moiseev, V. V. Paramonov // Proc. of EPAC'00 (Vienna, Austria). — JA-CoW. Geneva, 01/2000.
9. Design of hybrid electron linac with standing wave buncher and traveling wave structure [Text] / S. V. Kutsaev, N. P. Sobenin, [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research : Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2011. — Vol. 636, no. 1. — P. 13—30.
10. *Pei, S.* Studies on the S-band bunching system with the hybrid accelerating structure [Text] / S. Pei, B. Gao // Proc. of SAP'17 (Jishou, China). — Geneva, 02/2018. — P. 79—82.
11. *Бойко, В. А.* Формирование пикосекундных импульсов тока пучка электронов на волноводных ускорителях [Текст] / В. А. Бойко, Р. М. Воронков, Ю. С. Павлов // Вопросы атомной науки и техники. — Харьков, 1983. — Т. 15, № 3. — С. 57—59.
12. Мощный линейный ускоритель для нейтронной спектроскопии [Текст] / Ю. С. Павлов [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. — Харьков, 1985. — Т. 23, № 2. — С. 3—5.
13. Ускоряющая структура линейного ускорителя электронов УЭЛВ-10/5-15С [Текст] / Ю. В. Зуев [и др.]. — М., 2001. — 23 с.
14. *Delayen, J.* RF superconductivity: physics, technology and applications [Text] : Couplers / J. Delayen. — 2015. — USPAS.
15. *Herrmannsfeldt, B.* EGUN:Electron Optics Simulations [Electronic Resource] / B. Herrmannsfeldt. — 2019. — URL: <http://egun-igun.com/>.
16. *Bondarenko, T. V.* Beamdulac-BI code for 3D simulation of electron beam dynamics taking into account beam loading and coulomb field [Text] / T. V. Bondarenko, E. S. Masunov, S. M. Polozov // Problems of atomic science and technology. — 2013. — Dec. — Vol. 6(88). — P. 114.

Мацевский Сергей Викторович

Разработка и моделирование элементов резонансных ускоряющих структур методом эквивалентных схем

Автореф. дис. на соискание учёной степени канд. тех. наук

Подписано в печать _____.____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____

