

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Левичева Алексея Евгеньевича «Разработка и экспериментальная проверка концепции линейного ускорителя электронов-инжектора источника синхротронного излучения четвертого поколения ЦКП «СКИФ»

Источники синхротронного излучения (СИ) в настоящее время широко используются в мире для проведения фундаментальных и прикладных исследований в различных областях науки и техники. В нашей стране в соответствии с Федеральной научно-технической программой синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на период до 2030 года и дальнейшую перспективу создается современный источник СИ Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов» (ЦКП «СКИФ»). Диссертационная работа А.Е.Левичева посвящена разработке и созданию достаточно сложной и критичной части комплекса ЦКП «СКИФ» - инжектора на основе линейного ускорителя, включая разработку и создание источника электронов, ускоряющей структуры, мощного клистрона - генератора СВЧ излучения и других систем. Таким образом, **решаемая в ходе выполнения работы задача безусловно является актуальной и чрезвычайно важной.**

Для проверки принятых при разработке линейного ускорителя электронов-инжектора СКИФ решений абсолютно правильно и целесообразно был разработан, создан и введен в действие экспериментальный стенд, включающий в себя источник электронов, группирователь и первую ускоряющую секцию, на котором **проведены испытания и исследования, позволившие подтвердить адекватность и/или оптимизировать отдельные узлы и компоненты комплекса инжектора.** Кроме этого, достоверность полученных результатов подтверждена сравнением с расчетными и теоретическими данными, что неоднократно докладывалось на конференциях. Результаты опубликованы в 15 работах, из которых 12 в научных журналах, рекомендованных ВАК.

Поскольку комплекс источника СИ четвертого поколения создается в России впервые, **научная новизна представленной работы не вызывает сомнения.** При этом особо следует отметить, что в ходе выполнения работы **впервые в России разработан и изготовлен мощный клистрон с рабочей частотой 2856 МГц.** Также впервые разработана и реализована схема линейного ускорителя-инжектора источника СИ на основе субгармонической ВЧ пушки с термоэмиссионным катодом и управлением тока пучка по сетке, с одним группирователем в режиме бегущей волны.

Личный вклад А.Е.Левичева в результаты, выносимые на защиту, является определяющим.

Диссертация изложена на 203 страницах и состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. В конце каждой главы дается заключение к ней.

Во Введении описываются актуальность и степень разработанности темы исследований; определяются цель диссертационной работы и задачи, которые необходимо решить для ее достижения; обосновываются научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследований; приводятся основные положения, выносимые на защиту; определяется личный вклад автора.

Первая глава посвящена описанию линейного ускорителя инжектора ЦКП «СКИФ». Приводятся параметры и описание всего комплекса источника СИ и отдельных его частей и систем. Представлена схема всего линейного ускорителя и схемы, требуемые параметры и описание таких его узлов и систем как источник электронов, система группировки и предускорения, ускоряющая структура, волноводная система и клистрон, магнитная система фокусировки пучка, система диагностики пучка, вакуумная система, система охлаждения и термостабилизации.

Вторая глава посвящена моделированию и оптимизации пучка в линейном ускорителе. Получены условия оптимального захвата пучка в режим ускорения. Моделируется динамика пучка ВЧ пушки и управления током пучка модулирующим напряжением. Приведены результаты расчета канала группировки и фокусирующей системы. Проведен расчет влияния ошибок выставки элементов ускорителя на параметры пучка.

Третья глава обосновывает требования к изготовлению ускоряющей структуры. Определяются влияние ошибок в изготовлении ускоряющих ячеек на рабочий вид колебания в структуре, влияние точности частоты ВЧ генератора и ошибок набега фазы на набор энергии частицами.

Четвертая глава описывает процесс и результаты изготовления элементов ускорителя. Рассмотрены конструкция и технология изготовления ВЧ пушки и резонатора-группирователя. Описано изготовление различных магнитных элементов фокусирующей системы ускорителя. Приведены процессы изготовления элементов ускоряющих секций и измерений их параметров, а также результаты изготовления элементов диагностики пучка, термостабилизации ускоряющей структуры, волноводного тракта и некоторых других.

Пятая глава посвящена разработке и изготовлению генератора СВЧ мощности – клистрона. Определены основные параметры и критерии выбора конструкции клистрона. Приведены расчеты катодного узла, поперечной динамики пучка и необходимое распределение магнитного поля от катушек с током внутри соленоида. Даны описания и результаты расчета возбуждающего резонатора и канала группировки. Описаны конструкция клистрона и основные параметры группирующих резонаторов. Приведены процессы изготовления клистрона и его элементов, а также методика и результаты измерения параметров клистрона.

Шестая глава посвящена разработке, созданию и работе стенда ЛИНАК-20. Приведены схема стенда ЛИНАК-20, являющегося реальной начальной частью линейного ускорителя ЦКП «СКИФ» до второй секции регулярной ускоряющей структуры. Приведены результаты исследований и измерений, полученные при работе стенда и выработаны соответствующие решения и рекомендации для создания и ввода в действие линейного ускорителя – инжектора ЦКП «СКИФ».

В Заключение описаны результаты решения поставленных в ходе выполнения диссертационной работы задач.

В качестве основных результатов, имеющих **научную и практическую ценность**, можно выделить следующие:

1. Разработка и реализация схемы линейного ускорителя электронов – инжектора источника СИ ЦКП «СКИФ».

2. Разработка и создание отечественного клистрона с импульсной мощностью 50 МВт на частоте 2856 МГц.
3. Расчет и определение условий достижения проектных параметров линейного ускорителя для выбранной схемы инжектор источника СИ.
4. Расчет динамики пучка и оценка влияния погрешностей изготовления и настройки отдельных элементов на параметры пучка.
5. Создание испытательного стенда ЛИНАК-20, включающего в себя критически важные элементы ускорителя. Проведение экспериментов и исследований, позволяющих определить работоспособность и достижение необходимых проектных параметров пучка.

Результаты, полученные в диссертационной работе, могут быть использованы при разработке и создании линейных ускорителей заряженных частиц для проведения фундаментальных и прикладных исследований.

В качестве замечаний и пожеланий можно отметить следующие:

1. Во Введении приведен обзор действующих в мире источников синхротронного излучения четвертого поколения, однако не упомянут новый источник СИ HEPS (High Energy Photon Source), Китай, в котором в качестве инжектора используется линейный ускоритель электронов на энергию 500 МэВ.
2. На стр.19 сказано, что «Проведенные исследования привели к созданию отечественного мощного СВЧ усилителя-клистрона...Ранее в России такая техника не производилась.» Действительно проделанная ИЯФ СО РАН и лично автором работа по разработке и созданию клистрона на 50 МВт и 2856 МГц это огромное достижение, в том числе и по импортозамещению, но приведенное выше утверждение, что «такая техника ранее в нашей стране не производилась» не совсем корректно.
3. В Главах 2 и 3 излишне подробно описана достаточно хорошо известная теория по динамике пучка и электродинамике в круглом диафрагмированном волноводе. Вместе с тем на основе этих глав, может быть выпущено учебное и методическое пособие по разработке и созданию ускоряющей структуры линейного ускорителя электронов с конкретными параметрами пучка.
4. Показалось странным использование фазовращателя с прогибом стенок волновода. Сказано, что диапазон перестройки фазы 180 градусов, но информация о диапазоне КСВ от фазовращателя при такой перестройке отсутствует. Можно было бы рассмотреть фазовращатель в виде моста с двумя подвижными плунжерами с дросселями.
5. На стр. 96 сказано, что коэффициент теплового расширения медных резонаторов S-диапазона 50 кГц/ градус, хотя эта величина для частоты 2856 МГц составляет 46,1 кГц/градус.
6. Работа в целом написана хорошим языком и достаточно хорошо иллюстрирована, однако имеется ряд опечаток и небрежностей. Например, в табл. 1.9 отсутствует единица измерения длительности импульса, стр. 31 «сектой» вместо «сеткой», стр.110 «пьезоактюатор», стр.123 рис.4.21 «калодки», ряд рисунков мелкие и слепые – рис.1.11, 1.17, 1.18, 1.19, 2.9, 5.1, 5.30, 6.1; стр.191 «эммитнса», стр. 172 «ратчик» вместо «датчик».

Следует подчеркнуть, что данные замечания не имеют принципиального характера и не снижают высокой оценки результатов автора диссертации.

Аннотация полностью соответствует содержанию диссертации.

Диссертация А.Е.Левичева представляет собой законченную научную работу, решающую важнейшую задачу разработки и создания линейного ускорителя – инжектора первого отечественного источника синхротронного излучения четвертого поколения, в том числе разработки и создания отечественного мощного генератора СВЧ – клистрона.

Диссертационная работа «Разработка и экспериментальная проверка концепции линейного ускорителя электронов - инжектора источника синхротронного излучения четвертого поколения ЦКП «СКИФ» полностью отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор Левичев Алексей Евгеньевич, безусловно, **заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук** по специальности 1.3.18 Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Я, Кравчук Леонид Владимирович, согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации соискателя, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

Главный научный сотрудник

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Института ядерных исследований Российской академии наук,

Член-корреспондент РАН, доктор технических наук

по специальности 01.04.20 - Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

_____ / Кравчук Леонид Владимирович /

тел. +7 9037904680

e-mail: kravchuk@inr.ru

117312, Москва, В-312, проспект 60-летия Октября, 7а.

«22» 07 2025 г.

Подпись Кравчука Л.В. заверяю

Зам.директора ИЯИ РАН

Член-корр. РАН

Доктор физико-математических наук

/ Рубцов Григорий Игоревич /