

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИЭФ УрО РАН,

член-корр. РАН

Чайковский С.А.

«12» ИЮЛЯ 2023 г.



ОТЗЫВ

Ведущей организации на диссертацию

Сандалова Евгения Сергеевича

«Исследование поперечной неустойчивости килоамперного пучка релятивистских электронов в линейном индукционном ускорителе применительно к его приложениям»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18. «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника»

Актуальность темы диссертации. Работа посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям поперечной неустойчивости электронного пучка с килоамперным током и энергией 5-10 МэВ в линейном индукционном ускорителе (ЛИУ). Одной из основных целей развития физики и техники ЛИУ является расширение их применения в областях, где требуются импульсные электронные пучки с высокой яркостью, энергией 10–20 МэВ, током ~ 1 –10 кА и длительностью ~ 0.1 –1 нс. Эта совокупность параметров практически недоступна для высокочастотных, циклических и ускорителей прямого действия. Поэтому ЛИУ уже нашли многочисленные применения в фундаментальных и прикладных исследованиях. Среди них для развития отечественной науки особо перспективна генерация электромагнитного излучения лазерами на свободных электронах (ЛСЭ). В настоящее время важной задачей ИЯФ СО РАН и РФЯЦ-ВНИИТФ (г. Снежинск) в области физики и техники ускорителей является реализация ЛИУ для генерации сильноточного релятивистского электронного пучка (РЭП) с током килоамперного уровня и энергией электронов до 10 МэВ. Малый угловой разброс скоростей электронов должен позволить сжать пучок до диаметра 2 мм и менее, что приемлемо для терагерцового ЛСЭ. Таким образом, важен поиск источников возмущения траекторий электронов в ЛИУ и выработка мер по их подавлению.

В аспекте несомненной актуальности работы Сандалова Е. С. отметим, что направления его исследований конкретно обозначены в Программе фундаментальных исследований РФ (2021-2030 гг.) в ряду основных научных задачи и ожидаемых прорывных результатов по физике. Это пункты 1.3.6.2 и 1.3.3.5, где отмечено «Развитие методов генерации, усиления, преобразования и приема электромагнитных волн», а также задачи в области физики ускорителей заряженных частиц, включая лазеры на свободных электронах, представляющие рекордно-мощные источники излучения, в том числе, терагерцового, с уникальными параметрами.

Оценка структуры и содержания работы. Диссертация Сандалова Е.С. состоит из введения, пяти глав и заключения, в конце работы приведен список из 109 цитированных источников. Общий объем работы 141 страница с 41 рисунком и 9 таблицами.

Во введении представлен детальный обзор литературы, включая описание истории развития исследований и разработок ЛИУ, приведены основные области применения генерируемых сильноточных электронных пучков, показана важность исследований их поперечной неустойчивости. На основании проведенного анализа обоснована актуальность работы диссертанта, формулируются цели, задачи и методы исследований.

Первая глава посвящена теоретическим основам механизма возбуждения поперечной неустойчивости сильнооточного релятивистского электронного пучка в ЛИУ. В начале главы автор приводит подробное описание общей структуры ЛИУ и его ускорительных модулей, электродинамические свойства которых будут исследованы далее. Также приведены теоретические оценки инкремента поперечной неустойчивости и также описаны основные элементы программного комплекса для моделирования динамики развития поперечной неустойчивости пучка в ЛИУ с магнитной системой в виде отдельных магнитных линз. Приведён анализ основных факторов, влияющих на динамику поперечной неустойчивости для ЛИУ, разработанного в ИЯФ СО РАН. На основе модельного представления физических процессов, составляющих механизм поперечной неустойчивости, в первой главе представлено описание разработанного соискателем программного комплекса для численных расчетов развития неустойчивости в разных условиях. В первом из них производился расчет спектров дипольных мод и их полей в ускорительных модулях ЛИУ, во втором – расчет ускоряющих электрических и фокусирующих магнитных полей, а в третьем модуле осуществлялось моделирование распространения электронного пучка в ускорительной структуре ЛИУ с учетом его взаимодействия с дипольными модами, возбуждаемыми им в ускорительных модулях.

Вторая глава посвящена экспериментальным исследованиям электродинамических свойств ускорительных модулей ЛИУ. Как отмечает автор, при проектировании и исследовании таких модулей особое внимание уделяют исследованиям в области минимизации поперечного импеданса, поскольку он существенным образом влияет на рост поперечной неустойчивости пучка. Целью диссертационной работы в этой области было измерение спектра частот и добротностей дипольных мод для верификации компьютерных моделей, с помощью которых определялись коэффициенты связи мод с пучком. Для проведения «холодных» измерений (без электронного пучка) автором был создан стенд, на котором были измерены спектры дипольных мод всех модификаций ускорительных модулей комплекса ЛИУ. Созданный экспериментальный стенд и разработанная методика измерений частотных свойств электродинамической системы ускорительного модуля позволили определить спектр основных дипольных колебаний и их добротности. Данные «холодных» измерений, моделирования и спектры колебаний из экспериментов с пучком, показали хорошее совпадение. Полученные в моделировании частоты наиболее неустойчивых «вакуумных» мод, поля которых в основном сосредоточены в транспортном канале пучка, с точностью до 10–15 МГц совпадают с результатами «холодных» измерений, что говорит об ошибке определения частот в спектре собственных мод не более нескольких процентов.

В рамках третьей главы подробно представлены исследования, направленные на решение задачи подавления собственных ЭМ-колебаний в каждом ускорительном модуле ЛИУ. Как описывает автор, эта работа предполагала геометрические изменения внутренней структуры ускорительного модуля, применение специально разработанных поглотителей ЭМ-колебаний на основе ферритосодержащих материалов и материалов с низкой проводимостью, разведение модулей по частотам наиболее неустойчивых мод за счет изменения геометрии экранирующих электродов и т.д. Решались и описаны три основные задачи: 1) выбор оптимального размещения поглотителей на основе пространственной картины распределения электромагнитных полей этих мод по объему модуля и определения мест их преимущественной локализации; 2) разработка конструкций крепления поглотителей, выбор материалов для эффективного поглощения энергии ЭМ-колебаний, описание их физических и химических свойств; 3) расчеты электродинамических свойств ускорительных модулей с поглотителями и сравнение расчетов с данными «холодных» измерений. Таким образом, были предложены пассивные методы подавления колебаний наиболее неустойчивых дипольных мод модуля, разработана конструкция эффективного поглотителя их энергии. За счёт разведения по

частотам указанных мод в различных ускорительных модулях была сформирована структура ЛИУ, действующего в настоящее время.

В четвертой главе проведено моделирование динамики поперечной неустойчивости сильнооточного релятивистского электронного пучка в ЛИУ двух реализованных версий: с энергией пучка 5 и 10 МэВ. Исследовалось влияние поперечной неустойчивости в различных условиях ее возбуждения на транспортировку и ускорение пучка в ЛИУ с дискретной магнитной системой. Изучены режимы развития поперечной неустойчивости и влияние на ее инкремент таких параметров экспериментов, как ток пучка, спектр дипольных мод, возбуждаемых пучком в ускорительных модулях, их добротности, а также величина магнитного поля фокусирующей системы ускорителя. Экспериментальные данные сопоставлены с результатами моделирования в целях подтверждения достоверности расчета как всего пакета программ для описания развития поперечной неустойчивости, так и его отдельных модулей. Экспериментальные данные взяты при различных режимах работы ускорителя, когда варьировалась энергия и ток пучка, а также величина магнитного поля в линзах.

Отметим следующие результаты. Во-первых, в расчетах динамики поперечной неустойчивости пучка показано, что применение пассивных поглотителей приводит к существенному снижению инкремента усиления колебаний пучка от модуля к модулю, в результате чего амплитуда колебаний в каждом ускорительном модуле нарастает только в течение части импульса пучка, а затем затухает. Во-вторых, увеличение фокусирующего магнитного поля в линзах и уменьшение тока пучка приводят к снижению инкремента.

На основании полученных результатов можно отметить, что разработанный автором программный комплекс позволяет моделировать динамику возбуждения и развития поперечной неустойчивости пучка в ЛИУ, а также рассчитывать значение инкремента усиления колебаний центроида пучка от модуля к модулю, которое совпадает с его величиной, измеренной в эксперименте, в пределах ошибки измерения этой величины $\sim 20\%$. В результате применения мер по снижению инкремента неустойчивости до требуемого уровня была достигнута проводка пучка в ЛИУ, при которой амплитуда колебаний его центроида в режиме транспортировки с током 1.4 кА при энергии электронов до 10 МэВ в магнитном поле 0.8 Тл не превышала 1 мм.

В пятой главе обсуждается возможность применения пучка, генерируемого в ЛИУ, в качестве драйвера для ЛСЭ ТГц диапазона, предложенного и создаваемого в ИЯФ СО РАН совместно с ИПФ РАН. Принципиальным отличием такого генератора от реализованных ранее является большая длительность импульса тока пучка, превышающая сотню наносекунд. Сочетание большой длительности импульса и килоамперного уровня тока пучка ЛИУ открывает возможность его использования для реализации длинноимпульсных субгигаваттных ЛСЭ с энергозапасом в импульсе 10–100 Дж в диапазоне частот 0.3–1.2 ТГц. Описана структура будущего ЛСЭ, его основные элементы.

Проведен анализ возможности реализации подобного ЛСЭ при конкретизации требований к однородности поперечных скоростей электронов в винтовом ондуляторе, а также к качеству сжатого по сечению пучка для обеспечения эффективной генерации излучения. С этой же целью получена оценка ограничений сверху на разброс исходных продольных скоростей электронов пучка. Так как пучок с током 1 кА и энергией 5 МэВ, генерируемый в ЛИУ, имеет достаточно низкий разброс по продольным скоростям вследствие малого энергетического ($\sim 10^{-4}$) и углового ($\sim 10^{-3}$) разброса электронов, то он оказывается приемлемым для ЛСЭ с КПД генерации излучения на уровне 2 – 3%.

В заключении диссертационной работы представлены основные выводы и результаты исследований, среди которых выделим наиболее важные, корректно отраженные в положениях, выносимых на защиту:

1. Создан программный комплекс, позволяющий рассчитывать поля ЭМ в ускорительных модулях ЛИУ, определять характеристики дипольных мод, являющихся

основным фактором порождения поперечной неустойчивости электронного пучка. Использование созданных программ позволило специфицировать более двухсот собственных дипольных мод в интервале частот 0.3–1.1 ГГц, определить их добротности и коэффициенты связи с пучком, выделить наиболее опасные с точки зрения развития поперечной неустойчивости пучка.

2. Созданный программный комплекс позволяет моделировать динамику поперечной неустойчивости электронного пучка, выделять её закономерности, при этом сравнение расчетных значений параметров пучка с экспериментальными показало, что их расхождение не превышает 20%.

3. Численным моделированием, а также экспериментами продемонстрирована эффективность применения поглотителей колебаний радиочастотного диапазона для существенного (до значений $Q = 10 - 15$) снижает добротности наиболее опасных дипольных мод ускорительного модуля.

4. Предложены методы подавления дипольных мод ускорительных модулей, позволившие уменьшить поперечные колебаний центроида килоамперного пучка с энергией до 10 МэВ на выходе ЛИУ до 2 мм, что является одним из основных требований его использования в перспективном ЛСЭ-генераторе терагерцового диапазона длин волн.

Научная новизна диссертационной работы Сандалова Е. С. заключается в том, что впервые было проведено комплексное теоретическое и экспериментальное исследование возбуждения и подавления поперечной неустойчивости пучка в созданном специалистами ИЯФ СО РАН и РФЯЦ-ВНИИТФ линейном индукционном ускорителе с дискретной фокусирующей магнитной системой, специальными ускоряющими трубками с градиентными кольцами и устройствами подавления дипольных мод. В результате использования этих методов и результатов исследований была экспериментально продемонстрирована устойчивая транспортировка килоамперного субмикросекундного пучка с энергией до 10 МэВ в ускорителе.

Теоретическая и практическая значимость. В диссертационной работе автора подробно рассмотрен механизм возбуждения поперечной неустойчивости электронного пучка с током килоамперного уровня в ЛИУ с дискретной магнитной системой. В расчетах и экспериментах продемонстрировано, что известная теория Нила-Купера-Холла качественно правильно предсказывает зависимость амплитуды колебаний центроида пучка от параметров фокусирующей системы и электродинамических свойств модуля ЛИУ. На этой основе разработаны, исследованы и созданы способы подавления неустойчивости пучка, применимые к анализируемому ЛИУ. Также стоит отметить, что полученные автором результаты «холодных» измерений, экспериментов с пучком и результатами моделирования его неустойчивости позволяют оценивать ее инкремент и прогнозировать амплитуду колебаний на выходе ЛИУ. Созданный комплекс программ по расчету поперечной неустойчивости пучка, в совокупности с экспериментальными данными, позволяет оптимизировать конструкции ускорителей подобного класса. Интенсивные электронные пучки с малым поперечным эмиттансом и амплитудой поперечных колебаний могут быть эффективными драйверами в уникальных субгигаваттных терагерцовых лазерах на свободных электронах.

Замечания по диссертационной работе

1. Отсутствует информация о параметрах ускоряющих импульсов, их синхронизации с электронным пучком, динамике этих импульсов в холодном (без пучка) и в горячем (с пучком) режимах работы ускоряющих модулей.
2. Не отмечено влияние объемного заряда и магнитного поля пучка на его поперечную устойчивость.

3. Не приводится информация о конструкции и характеристиках форинжектора сильнооточного пучка, ускоряемого в дальнейшем в секциях ЛИУ. Можно было бы описать тип и характеристики многочисленных источников питания («питающих длинных линий») первичных обмоток индукторов в секциях ЛИУ, дать информацию о материале и свойствах сердечников индукторов.
4. Была бы интересна информация о структуре поперечного сечения пучка (например в виде отпечатков, и т.п.) в различных точках каскада структур ЛИУ.
5. Для формулы 1.1 раскрыты не все обозначения.
6. Встречаются примеры жаргона, например, «панорама», «могильник»; комбинация «динамика развития» может с успехом быть заменена одним из этих слов.

Данные замечания не снижают качества работы в целом и значимости полученных результатов.

Заключение расширенного семинара Лаборатории электронных ускорителей ИЭФ УрО РАН

1. Содержание диссертационной работы Сандалова Евгения Сергеевича «Исследование поперечной неустойчивости килоамперного пучка релятивистских электронов в линейном индукционном ускорителе применительно к его приложениям» соответствует паспорту научной специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника (пункты 1, 3, 9 раздела «Направления исследований»). Диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу с хорошим научным уровнем. Результаты, полученные в диссертационной работе (методы подавления колебаний пучка), несомненно, будут использованы при разработке подобных ускорительных комплексов. Разработанная модель для расчета поперечной неустойчивости электронного пучка позволит изучать и предсказывать ее динамику и в других ускорителях электронов.

2. Представленные в диссертационной работе результаты исследований являются актуальными, достоверными, обладают признаками новизны и научной значимости, выводы и заключения автора по отдельным частям исследования обоснованы.

3. Вклад автора, согласно представленному списку публикаций и докладу соискателя на семинаре, является определяющим. Выносимые на защиту положения доказаны и подтверждают персональный вклад автора в представленную работу.

4. Результаты работы опубликованы в трёх статьях в рецензируемых изданиях, что соответствует требованиям Высшей аттестационной комиссии для защиты кандидатских диссертаций по физико-техническим направлениям. Также материалы исследований представлялись соискателем на научных мероприятиях различного уровня. Упомянутые труды раскрывают содержание диссертационной работы.

5. Автореферат оформлен в соответствии с требованиями Высшей аттестационной комиссии и в достаточной мере отражает содержание диссертации.

6. Диссертация Сандалова Е. С. «Исследование поперечной неустойчивости килоамперного пучка релятивистских электронов в линейном индукционном ускорителе применительно к его приложениям» соответствует требованиям и критериям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, установленным в п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор, Сандалов Евгений Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Отзыв составил:


главный научный сотрудник Лаборатории электронных ускорителей ИЭФ УрО РАН,
академик РАН, профессор, доктор технических наук,
специальность - 01.04.13 Электрофизика

Яландин Михаил Иванович

Тел.: +7-912-249-11-60, email: yalandin@iep.uran.ru

Подпись: 

Дата: 12 июля 2023г.

Подпись  заверяю


Ученый секретарь
к.ф.-м.н.  Е.Е. Кокорина

Материалы диссертации Сандалова Е. С. «Исследование поперечной неустойчивости килоамперного пучка релятивистских электронов в линейном индукционном ускорителе применительно к его приложениям», а также отзыв на диссертацию рассмотрены на расширенном семинаре Лаборатории электронных ускорителей ИЭФ УрО РАН 12 июля 2023 года (Протокол №2).

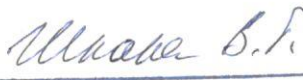
Руководитель расширенного семинара Лаборатории электронных ускорителей ИЭФ УрО РАН, заведующий лабораторией, академик РАН, доктор технических наук,

Шпак Валерий Григорьевич

Тел.: +7-343-267-87-96, email: radan@iep.uran.ru

Подпись: 

Дата: 12.07.2023

Подпись  заверяю

Ученый секретарь
к.ф.-м.н.  Е.Е. Кокорина

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики
Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН)
620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106
Тел.: 8 (343) 267-87-96
Факс: (343) 267-87-94
E-mail: admin@iep.uran.ru