

ОТЗЫВ **официального оппонента на диссертацию**

Стрельникова Никиты Олеговича

на тему «Проблемы создания прецизионных ондуляторов на постоянных магнитах для рентгеновских лазеров на свободных электронах» по специальности 01.04.20 - физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Актуальность темы диссертационной работы

Специализированные магнитные системы для генерации электромагнитного излучения релятивистскими электронами были предложены В. Л. Гинзбургом более полувека назад. Подобные магнитные системы, создающие периодическое магнитное поле, также широко используются в электромеханических преобразователях энергии – электрических двигателях и генераторах с возбуждением от постоянных магнитов. Несмотря на довольно широкое применение магнитных систем для генерации электромагнитного излучения и создания периодических магнитных полей, дальнейшее совершенствование ондуляторов остаётся весьма **актуальной задачей**. Это связано с двумя обстоятельствами. Во-первых, число установок для генерации электромагнитного излучения с использованием ондуляторов постоянно растёт. Строятся новые специализированные электронные накопители – источники рентгеновского излучения, а также лазеры на свободных электронах рентгеновского и инфракрасного диапазонов. Во-вторых, развитие ускорительной техники приводит к постоянному улучшению параметров электронных пучков. Чтобы полностью использовать такие пучки требуются ондуляторы с улучшенными параметрами магнитного поля (например, с большим числом периодов и, следовательно, повышенными требованиями к регулярности поля).

В диссертации Н. О. Стрельникова исследована новая конструкция ондулятора с переменным зазором и рассмотрены основные источники ошибок поля ондулятора. Для достижения необходимой для рентгеновских

лазеров на свободных электронах регулярности магнитного поля ондулятора требуются уникальная точность измерения сильно неоднородного магнитного поля и воспроизводимость этого поля при изменениях его амплитуды. Это потребовало применения новых научно-технических решений. Была экспериментально проверена точность измерения поля различными датчиками Холла и выбраны датчики Холла, обеспечивающие необходимую точность измерений интересующей компоненты магнитного поля. Кроме того, был разработан и исследован первый в мире ондулятор с компенсацией магнитных сил, действующих на противоположные (в данном случае – правую и левую) половины ондулятора, коническими пружинами.

Степень обоснованности научных положений и достоверность полученных результатов

Обоснованность полученных положений, выводов и результатов подтверждается грамотной постановкой задач и применением корректного математического аппарата.

Результаты исследований, проведённых в диссертации, выводы и рекомендации достаточно полно отражены в печатных работах и докладывались на научно-технических конференциях всероссийского и международного уровня.

Достоверность результатов аналитических исследований подтверждается результатами численных расчётов и моделирования, а также экспериментальными исследованиями изготовленных образцов.

Научная новизна и практическая ценность полученных результатов

К основным результатам, полученным Стрельниковым Н.О. и обладающими научной новизной, можно отнести следующие:

1. Автором впервые подробно экспериментально и теоретически изучено влияние остаточного магнитного поля в помещении («поля Земли») на поле внутри ондулятора.

2. Прделанная работа доказала возможность генерации вертикально поляризованного жёсткого рентгеновского излучения на современных рентгеновских ЛСЭ.
3. Впервые были применены для уравнивания магнитных сил наборы конических пружин с заданными нагрузочными характеристиками.

Практическая ценность результатов работы Н. О. Стрельникова несомненна. Результаты измерений и расчёта поля Земли должны учитываться при разработке всех ондуляторов на постоянных магнитах. Компенсация магнитных сил коническими пружинами (и, вообще, пружинами с оптимальной зависимостью деформации от приложенной силы) новый приём, позволяющий существенно упростить конструкцию ондуляторов с переменным зазором и обеспечить необходимую точность задания поля. Разработанная и испытанная конструкция будет использована в строящемся лазере на свободных электронах рентгеновского диапазона LCLS-II (США). В России результаты диссертации могут быть использованы в ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН, Курчатовском институте и других научных центрах.

Структура и содержание диссертационной работы

Диссертация Н. О. Стрельникова состоит из введения, четырех глав, и заключения.

- Во **введении** обоснована актуальность работы, дана ее общая характеристика, сформулированы цели и дано краткое содержание разделов.
- В **первой главе** описано ондуляторное излучение. Рассмотрено движение электрона в магнитном поле ондулятора. Приведены формулы для расчёта поля излучения по известной траектории электрона. Обсуждаются параметры, характеризующие ондуляторное излучение. Глава носит вводный характер. Её содержание необходимо для

формулировки требований, предъявляемых к регулярности магнитного поля ондуляторов.

- **Вторая глава** посвящена изучению датчиков Холла, применяющихся при измерении магнитного поля ондуляторов. Проводились измерения датчиками Холла и движущимися катушками. Изучены ошибки измерения поля и влияние различных факторов на ошибки измерений. Результаты этой главы обосновывают возможность достижения точности измерений, необходимой при испытаниях современных ондуляторов.
- В **третьей главе** изучено влияние магнитного поля Земли на поле в рабочем зазоре ондулятора. Учёт поля Земли важен из-за того, что направления оси ондулятора на стенде магнитных измерений и в ускорительном зале, где используется ондулятор, различны. Кроме того, «поле Земли» в этих помещениях тоже различно, так как в него вносят вклад стальные элементы здания и другие металлоконструкции. Проведён экспериментальный и теоретический анализ эффекта. Показано, что поле, наведённое в зазоре гибридного ондулятора, имеет подчёркнутую составляющую вдоль основного поля, которая превышает соответствующую составляющую поля Земли.
- В **четвертой главе** рассмотрен ондулятор на постоянных магнитах с переменным зазором и компенсацией магнитных сил коническими пружинами. Так как амплитуда поля в современных ондуляторах превышает 1 Тл, погонная сила притяжения половин ондулятора может быть порядка 10 кН/м. Эта сила деформирует балки, на которых закреплены постоянные магниты и магнитомягкие полюса (концентраторы потока) ондулятора. Деформации зазора могут привести к неприемлемому изменению зазора ондулятора. Стандартное решение проблемы состоит в использовании жёстких несущих балок большого поперечного сечения. Кроме того, механизмы, изменяющие зазор с микронной точностью, должны преодолевать силу несколько тонн. Альтернативой является компенсация магнитных сил пружинами,

распределёнными вдоль несущей балки. Так как квадрат амплитуды поля зависит от величины зазора нелинейно, для компенсации применены конические пружины с нелинейной зависимостью силы от деформации. Проведены расчёты и оптимизация расстановки компенсирующих пружин. Измерено поле ондуляторов (короткого прототипа и полномасштабного ондулятора) при различных зазорах. Сделан вывод о пригодности ондуляторов нового типа для рентгеновского лазера на свободных электронах.

- В **заключении** перечислены основные результаты работы

Основные результаты работы опубликованы в 4 печатных работах и докладывались на международных конференциях. Результаты работы Н. О. Стрельникова были использованы для разработки и создания ондуляторов для новых источников рентгеновского излучения.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертационной работы

Замечания по диссертационной работе

1. Наличие опечаток в некоторых формулах, например, (1), (53) и нумерованная формула на с. 27. Формулы главы 1 написаны в системе единиц СГС, а главы 2 и 4 – в СИ.
2. Нумерация формул и рисунков выполнена не по ГОСТ
3. Число компенсирующих пружин нового ондулятора кажется неоправданно большим. При меньшем числе пружин между ними осталось бы свободное место для приводов. Тогда не пришлось бы нарушать равномерность расстановки пружин, что привело к неполной компенсации деформаций несущей балки ондулятора.
4. Не показано влияние теплового расширения на точностные показатели ондулятора.

Указанные замечания носят скорее рекомендательный характер и не снижают общий высокий уровень диссертационной работы и её практическую ценность.

Заключение

Диссертация Стрельникова Никиты Олеговича на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение ряда задач по разработке и исследованию прецизионных ондуляторов, имеющей существенное значение для соответствующей отрасли знаний, а именно физике пучков заряженных частиц и ускорительной технике. По объёму выполненных исследований, их новизне, научному и практическому значению результатов диссертация «Проблемы создания прецизионных ондуляторов на постоянных магнитах для рентгеновских лазеров на свободных электронах» является законченной научно-квалификационной работой соответствующей требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Стрельников Никита Олегович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 - физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Официальный оппонент, заведующий
кафедры электромеханики Новосибирского
государственного технического университета,
доктор технических наук, профессор



А.Ф.Шевченко

30.11.2016



Сведения:

Организация. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Почтовый адрес. 630073, г. Новосибирск, пр. К.Маркса 20,

Ф.И.О. - Шевченко Александр Фёдорович.

Должность - зав. кафедрой электромеханики.

Шифр и наименование научной специальности 05.09.01 – электромеханика и электрические аппараты.

Телефон (383) 346-13-87

Адрес электронной почты - a.shevchenko@corp.nstu.ru