

На правах рукописи

СТРЕЛЬНИКОВ Никита Олегович

**ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ
ОНДУЛЯТОРОВ НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ
ДЛЯ РЕНТГЕНОВСКИХ
ЛАЗЕРОВ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ**

**01.04.20 – физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

НОВОСИБИРСК – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

ВИНОКУРОВ – доктор физико-математических наук,
Николай Александрович член-корреспондент РАН, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

ШЕВЧЕНКО – доктор технических наук, профессор,
Александр Фёдорович Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего обра-
зования Новосибирский государственный
технический университет, г. Новосибирск,
заведующий кафедрой.

ЧЕРНОУСОВ кандидат технических наук,
Юрий Дмитриевич Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт химической
кинетики и горения им. В.В. Воеводского
Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск,
старший научный сотрудник.

ВЕДУЩАЯ – Международная межправительственная орга-
ОРГАНИЗАЦИЯ низация Объединенный институт ядерных
исследований, г. Дубна.

Защита диссертации состоится « 27 » декабря 2016 г.
в « 12:15 » часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института
ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального
государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики
имени Г.И. Будкера СО РАН и на сайте www.inp.nsk.su.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

П.А. Багрянский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Существующие и разрабатываемые в настоящее время рентгеновские лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) нацелены на генерацию пространственно-когерентного рентгеновского излучения высокой яркости и его последующего использования для уникальных научных экспериментов в различных дисциплинах, охватывающих физику, химию, материаловедение и биологию. Для генерации такого излучения необходимо применение ондуляторов с предельно достижимыми параметрами (достаточно широкий диапазон изменения поля, короткий период, малый магнитный зазор) и жёсткими допусками на магнитное поле. Разработка, строительство, настройка и введение в строй подобных устройств требуют значительных ресурсов и времени, и зачастую необходимо применение новых идей и технологий для реализации такого проекта.

На абсолютном большинстве источников рентгеновского излучения (РИ), использующих релятивистские электроны, включая ЛСЭ, применяются ондуляторы с вертикально ориентированным магнитным полем (см., например, [1], [2]). Предпочтительность такой ориентации является результатом сильной асимметрии поперечного сечения электронного пучка в источниках РИ 3-го поколения – горизонтальный размер намного больше вертикального. И, хотя электронный пучок в ЛСЭ довольно симметричен в поперечном сечении, это не используется в конструкции ондуляторов. Такое положение может измениться в ближайшее время благодаря строительству новых рентгеновских ЛСЭ и появлению электронных накопителей со сверхмалым эмиттансом. В связи с этим задача разработки новых типов плоского ондулятора с горизонтальным магнитным полем становится актуальной.

Существует по крайней мере два основных достоинства поворота поля ондулятора на 90 градусов. Одно из них связано с поворотом поляризации излучения, который существенно упрощает конструкцию и улучшает параметры монохроматоров и систем распределения излучения [3]. Второе преимущество связано с «гравитационно-нейтральной» конструкцией механических систем самого ондулятора. Если объединить подобную конструкцию с системой компенсации магнитных сил, механизм контроля зазора ондулятора может стать довольно компактным и простым без ущерба для воспроизводимости и точности установки зазора ондулятора.

В настоящее время на ЛСЭ во всём мире применяют традиционный подход при конструировании механизмов контроля зазора ондуляторов вне зависимости от типа устройства: вневакуумные, вакуумные, типа APPLE и т.д. Эти конструкции включают очень жёсткие и зачастую очень громоздкие балки, которые способны выдерживать значительные (десятки кН) магнитные

силы без заметных деформаций, и очень точные механические компоненты, которые позволяют контролировать магнитный зазор такого ондулятора на микронном уровне. Обычно производство таких устройств требует уникальных станков, которые могут обрабатывать балку длиной несколько метров с точностью до нескольких микрон.

Недавно, после более чем десяти лет разработки, в рамках проекта Европейского Рентгеновского ЛСЭ (EXFEL) было успешно построено несколько десятков ондуляторов длиной 5 метров каждый с очень сложной системой контроля зазора, которая удовлетворяет требованиям EXFEL [4]. При разработке ондулятора для рентгеновского ЛСЭ SACLA XFEL в Японии была выбрана конструкция вакуумного ондулятора, разработанного для накопителя SPring-8 [5], а для ЛСЭ FERMI в Триесте (Италия) используются ондуляторы типа APPLE [6]. Строящийся рентгеновский ЛСЭ в Поханге (Южная Корея) адаптирует конструкцию ондулятора EXFEL [7], а на Швейцарском ЛСЭ применяют подход SACLA с вакуумными ондуляторами [8]. Однако все эти устройства представляют собой ондуляторы с вертикальным магнитным полем и массивными балками, на которых устанавливается магнитная структура, и, соответственно, обладают всеми выше перечисленными недостатками. Поворот этих устройств для создания горизонтального магнитного поля, делает их очень громоздкими.

Для того чтобы сократить поперечный размер ондуляторов без ущерба для воспроизводимости и точности выставки зазора устройства, необходимо уменьшить механизм управления зазором ондулятора и в первую очередь несущие балки. Как уже упоминалось ранее, сделать это позволяет система компенсации магнитных сил. Впервые полная компенсация магнитной силы между магнитными структурами ондулятора была предложена Р. Карром [9]. Его идея заключалась в компенсации магнитной силы дополнительной, дублирующей магнитной структурой. При этом дублирование осуществлялось для каждой балки в отдельности, что увеличивало количество магнитов и полюсов – одних из самых дорогих элементов устройства – в три раза. Таким образом, данный способ значительно усложнял конструкцию и делал устройство громоздким и дорогим. Разработкой ондулятора с компенсацией магнитной силы так же занимаются в RIKEN SPring-8 Center. Было предложено два способа реализации данной идеи. Первый следует подходу, предложенному Р. Карром. Уравновешивание магнитной силы осуществляется дополнительными магнитными структурами [10]. Второй способ заключается в фазовом сдвиге верхней и нижней магнитных структур относительно друг друга [11]. Реализация данного подхода возможна только для магнитной структуры Хальбаха, оставаясь непригодной для широко распространённого гибридного ондулятора.

Наиболее перспективным в настоящее время видится использование пружин в качестве контрсилы. Их применение не является чем-то новым при

строительстве ондуляторов и вигглеров. Например, при строительстве вакуумного вигглера WSV50 в SOLEIL (Франция) была применена компенсация магнитной силы набором линейных пружин [12]. При этом использовалось два типа линейных пружин с разным коэффициентом жёсткости. В данном устройстве пружины были установлены непосредственно в зазоре между несущими балками. Данный подход имеет два существенных недостатка. Первый – это ограниченный доступ в зазор между магнитными структурами, что сильно осложняет размещение вакуумной камеры во вневакуумных устройствах, а также проведение магнитных измерений и магнитную настройку устройства. Вторым – зависимость магнитной силы существенно нелинейна, и аппроксимация её двумя прямыми приводит к значительной некомпенсированной силе. Это сохраняет необходимость использования достаточно массивных несущих балок.

Таким образом, несмотря на постоянные попытки решить задачу компенсации магнитной силы при строительстве ондуляторов и вигглеров, в настоящее время не построено ни одного штатно работающего устройства с полной компенсацией магнитной силы.

Из всего вышеизложенного можно сделать вывод, что создание компактных ондуляторов с горизонтальным магнитным полем и компенсацией магнитных сил, удовлетворяющей жёстким требованиям источников РИ 4-го поколения, является актуальной и востребованной задачей.

Цель диссертационной работы

Данная работа посвящена исследованию некоторых аспектов создания прецизионных ондуляторов на постоянных магнитах, позволяющих удовлетворять жёстким требованиям современных рентгеновских ЛСЭ. Целями работы являются разработка концепции точной компенсации магнитных сил для несущего механизма ондулятора с горизонтальным полем и изменяемым зазором, а также усовершенствование методов магнитных измерений, применяемых при измерении полей ондуляторов. Для достижения поставленных целей необходимо решить следующие **задачи**:

1. Сформулировать допуски и возможные источники ошибок при проведении магнитных измерений ондулятора с изменяемым зазором и его последующей настройке; определить способы улучшения точности магнитных измерений до уровня, соответствующего требованиям, предъявляемым к источникам РИ 4-го поколения.
2. Исследовать влияние механических деформаций несущих балок на магнитные свойства ондулятора с горизонтальным полем.

3. Согласно проведённому исследованию и требованиям к будущему ондулятору LCLS-II определить требования к механизму компенсации магнитных сил и соответствующие допуски.
4. Произвести анализ механизма компенсации магнитных сил с помощью пружин. Определить возможные способы корректировки силы, генерируемой компенсирующим механизмом.
5. Разработать подобный механизм для короткого (0,847 м) прототипа «горизонтального» ондулятора с магнитной структурой UNA 33. Экспериментально исследовать механические свойства данного прототипа. Определить основные недостатки разработанного механизма компенсации магнитных сил и возможные способы их устранения.
6. На основе полученных данных разработать систему компенсации магнитных сил для полноразмерного (3,4 м) прототипа «горизонтального» ондулятора LCLS-II. Экспериментально исследовать механические свойства данного прототипа.

Личный вклад автора включает участие в постановке задачи, проведение численных и аналитических расчётов, проведение экспериментальной работы, анализ результатов и подготовку публикаций.

Результаты выполненной работы докладывались на следующих конференциях:

1. Isaac Vasserman, Nikita Strelnikov, Emil Trakhtenberg, Joseph Xu, Efim Gluskin. *Results of magnetic measurements of 2.8 m long vertically polarizing undulator with the dynamic compensation of magnetic forces.* // International Particle Accelerator Conference. 2015. Richmond, USA.
2. Joseph Z. Xu, Nikita Strelnikov and Isaac Vasserman. *Algorithms to automate gap dependent integral tuning for the 2.8-meter long horizontal field undulator with a dynamic force compensation.* // International Synchrotron Radiation Instrumentation conference. 2015. New York, USA.
3. O. Schmidt, D. Jensen, N. Strelnikov, K. Suthar, E. Trakhtenberg, I. Vasserman, J. Xu and E. Gluskin. *Horizontal-Gap Vertically-Polarizing Undulator (HGVP) Design Challenges and solutions.* // Mechanical Engineering Design of Synchrotron Radiation Equipment and Instrumentation (MEDSI) conference. September 2016. Barcelona, Spain.

Научная новизна

Впервые проведена тщательная проверка точности двухосевого датчика Холла фирмы Senis.

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

Построенные в Аргоннской национальной лаборатории (ANL, США) короткий (0,847 м) и полноразмерный (3,4 м) прототипы ондулятора с горизонтальным магнитным полем и изменяемым магнитным зазором являются первыми в мире специализированными ондуляторами для генерации РИ с вертикальной поляризацией. Использование подобных устройств становится возможным благодаря строительству новых источников РИ 4-го поколения. К тому же данные устройства являются первыми компактными ондуляторами с полной компенсацией магнитных сил во всём диапазоне рабочих зазоров. Для уравнивания магнитных сил впервые были применены наборы конических пружин, обладающих нагрузочной характеристикой, точно соответствующей зависимости силы от зазора для данной магнитной структуры.

Научная и практическая ценность

Проделанная работа доказала возможность генерации вертикально поляризованного жёсткого рентгеновского излучения на современных рентгеновских ЛСЭ. Результаты данной работы послужили основанием для разработки и создания полноразмерного (3,4 м) прототипа серийного ондулятора с горизонтальным полем для рентгеновского ЛСЭ LCLS-II. При строительстве ондуляторов данного типа на последнем будет генерироваться жёсткое рентгеновское излучение с вертикальной поляризацией в диапазоне энергий фотонов 1 – 25 КэВ.

Практическая же ценность проделанной работы состоит в простоте и относительной дешевизне изготовления предлагаемого ондулятора, его компактности. Кроме того, вертикальная поляризация генерируемого излучения значительно упрощает использование монохроматоров и строительство экспериментальных станций. В процессе выполнения работы была усовершенствована применяемая в ANL методика магнитных измерений и настройки ондуляторов, что упростит и ускорит процесс настройки серийных устройств. Разработанные методы улучшения точности магнитных измерений и конструкция ондулятора могут быть использованы в ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН, НИЦ «Курчатовский институт» и других ускорительных центрах.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Применение датчика Холла для измерений основных параметров ондулятора, включая его интегральные характеристики, с точностью до 0,05 Гс (17 Гс·см для первого интеграла поля).
2. Изучено влияние внешних магнитных полей на настройку и рабочие характеристики ондуляторов с учётом магнитно-восприимчивых элементов конструкции.
3. Исследована зависимость деформаций несущих балок от конфигурации механизма компенсации магнитной силы.

4. Изучена зависимость деформации несущей балки от магнитной нагрузки при её компенсации сосредоточенными силами.
5. Изучена деформация несущей балки при наличии ошибок в системе компенсации магнитной силы.
6. Изучена зависимость основных параметров ондулятора (фазовых ошибок) от деформаций несущих балок.
7. Разработан и экспериментально изучен механизм компенсации магнитных сил с помощью конических пружин. Предложены и исследованы способы корректировки сосредоточенных сил компенсирующего механизма.
8. Построен и экспериментально изучен короткий прототип (0,8 метра) горизонтального ондулятора с системой компенсации магнитной силы. Создан и настроен полноразмерный прототип (3,4 метра) горизонтального ондулятора с системой компенсации магнитной силы для проекта рентгеновского ЛСЭ LCLS-II, удовлетворяющий всем требованиям LCLS-II.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Текст диссертации содержит 135 страниц, 103 рисунка и 2 таблицы. Список литературы состоит из 36 работ.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении рассматриваются основные типы современных ондуляторов, создаваемых для рентгеновских лазеров на свободных электронах (ЛСЭ). Обсуждаются устройства и прототипы, на которых применена компенсация магнитных сил. На основании проведенного обзора даётся оценка актуальности работы.

В первой главе делается краткий обзор физики ондуляторного излучения в рентгеновских ЛСЭ и его зависимости от основных параметров ондулятора (фазовых ошибок, эффективного коэффициента ондуляторности – K_{eff} , первого и второго интегралов поля, эффективного пикового поля – B_{eff}).

Длина волны n -ой гармоники ондуляторного излучения вперёд в приближении синусоидального поля определяется выражением

$$\lambda_n = \frac{\lambda_0}{2n\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right), \quad (1)$$

где λ_0 – период ондулятора, γ – отношение энергии электрона к его энергии покоя mc^2 , K – коэффициент ондуляторности [2]. Для движения в синусоидальном магнитном поле с амплитудой B_0 коэффициент ондуляторности равен $K = eB_0\lambda_0/2\pi mc^2 = 0,934 \cdot B_0[\text{Тесла}] \cdot \lambda_0[\text{см}]$. В произвольном периодическом магнитном поле пространственный период

излучения вперёд λ_1 равен отставанию электрона от поля излучения на периоде ондулятора

$$\lambda_1 = \int_{z_1}^{z_1 + \lambda_0} \left(\frac{1}{2\gamma^2} + \frac{x'^2}{2} \right) dz = \frac{\lambda_0}{2\gamma^2} \left(1 + \gamma^2 \int_{z_1}^{z_1 + \lambda_0} x'^2 dz \right), \quad (2)$$

Где $x'(z) = \frac{dx}{dz} \approx -\frac{e}{\gamma m_e c} I_{1y}(z)$ – угол отклонения электрона в горизонтальной плоскости (в случае вертикального магнитного поля), а

$$I_{1y}(z) = \int_{z_0}^z B_y(z') dz' – \text{первый интеграл для вертикальной компоненты}$$

поля. Сравнив (1) и (2), получаем величину коэффициента ондуляторности K_{eff} для произвольного плоского ондулятора, выраженную через интеграл по периоду ондулятора от квадрата первого интеграла поля. По коэффициенту ондуляторности можно найти соответствующую ему амплитуду B_{eff} для ондулятора с синусоидальным полем, обеспечивающего излучение с теми же длинами волн, что и реальный.

Вторая глава посвящена проблемам достижения необходимой точности магнитных измерений при настройке ондуляторов для источников РИ четвёртого поколения. В данной главе подробно рассматривается двухосевой датчик Холла фирмы Senis, который имеет значительные преимущества в сравнении с использовавшимися ранее в APS датчиками Холла Bell и Sentron: стабильность смещения при нулевом поле и скомпенсированный планарный эффект Холла. При правильной калибровке данный датчик может использоваться даже для измерения первого и второго интегралов поля.

В разделе 2.1 приводится описание методов магнитных измерений, применяемых в лаборатории магнитных измерений (ММ1) ускорительного комплекса Advanced Photon Source (APS) Аргонской национальной лаборатории (ANL) (рис. 1).

Раздел 2.2 посвящён изучению стабильности «нуля» датчиков Холла Sentron и Senis, доступных в ММ1. Любой дрейф выходного сигнала датчика Холла, не связанный с изменением измеряемого магнитного поля, в том числе и дрейф «нуля», или дрейф выходного сигнала датчика Холла при нулевом внешнем поле, способен существенно ухудшить точность определения интегралов поля, параметров, определяющих угол и смещение заряженной частицы при прохождении ондулятора. Неучтённое смещение показаний датчика даже на 0,1 Гаусс создаёт ошибку в 34 Гс-см для первого интеграла поля при сканировании области длиной 3,4 метра. При этом допуск на этот параметр, например, для будущих ондуляторов LCLS-II составляет ± 40 Гс-см. Одним из способов проверки дрейфа «нуля» датчиков Холла

является измерение временной зависимости показаний датчиков, зафиксированных в одном положении, при измерении поля Земли.

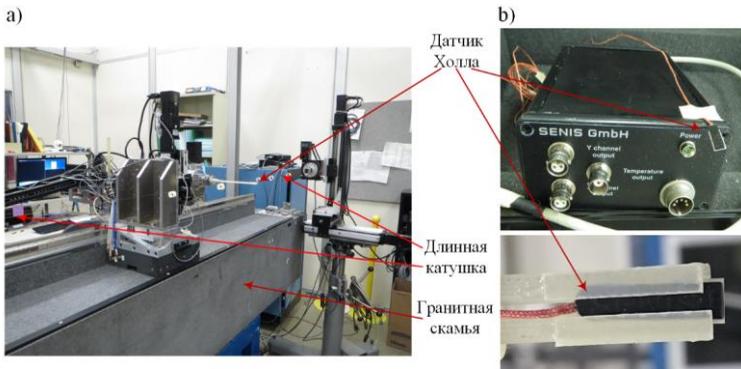


Рисунок 1. а) Основные инструменты для магнитных измерений в ANL – датчик Холла и длинная, вращающаяся катушка. б) Датчик Холла фирмы Senis с серийным номером №067-11.

В разделе 2.3 анализируется точность и стабильность измерений сильного магнитного поля, присутствие которого может вызвать систематический дрейф выходного сигнала датчика Холла.

В разделе 2.4 рассматривается проблема планарного эффекта Холла как для ранее использовавшихся в ANL датчиков Bell, Areproс, Sentron, так и для применяемых в настоящее время датчиков Senis.

Выходное напряжение идеального датчика Холла может быть представлено следующим образом [13]:

$$U = C_1 B_{\perp} I + C_2 B_{\parallel}^2 I \sin(2\varphi), \quad (3)$$

где B_{\perp} – измеряемая компонента магнитного поля (перпендикулярная к плоскости датчика Холла), B_{\parallel} – лежащая в плоскости датчика Холла компонента поля, I – пропускаемый через датчик ток, φ – угол между B_{\parallel} и I , $C_{1,2}$ являются константами в первом приближении. Второе слагаемое в правой части этого равенства отвечает за планарный эффект Холла. Согласно (3) выходное напряжение датчика Холла имеет сильную зависимость от величины лежащей в плоскости этого датчика компоненты магнитного поля и угла между этой компонентой и током I . Так как величина основной компоненты поля в плоском ондуляторе на несколько порядков больше неосновной компоненты ($B_y \gg B_x$ для «вертикального» ондулятора), измерения последней датчиком Холла могут быть весьма затруднительными. Благодаря зависимости от двойного угла в (3) поворот датчика в его плоскости на 90° меняет знак планарного эффекта Холла. Таким образом, если выполнять по 2 измерения в каждой точке, отличающихся ориентацией

тока в датчике на 90° , то можно практически полностью избавиться от влияния данного эффекта на результаты магнитных измерений, что и было реализовано в случае с датчиками Senis.

В разделе 2.5 сравниваются измерения, выполненные различными методами: датчиками Холла Senis, длинной катушкой и короткой катушкой, перемещающейся вдоль ондулятора. Показывается, что ошибки, возникающие при калибровке датчиков Холла Senis, способны внести искажения в определение параметров ондулятора, сравнимые с допусками на прецизионные ондуляторы для рентгеновских ЛСЭ. Обсуждаются определённые способы работы с калибровочными кривыми, позволяющие в некоторых случаях значительно улучшить точность выполняемых магнитных измерений.

В разделе 2.6 анализируется обнаруженное в ходе тестов колебание температуры, регистрируемое встроенным в датчик Холла Senis температурным датчиком при измерении магнитного поля ондулятора.

В третьей главе подробно рассматривается влияние внешнего магнитного поля Земли на магнитные свойства ондулятора и учёт этого влияния при магнитных измерениях и настройке ондулятора. Внешнее поле и ориентация ондулятора по отношению к нему в ускорительном зале, где работает ондулятор, и в помещении, где проводятся магнитные измерения, различны. Поэтому поле в ондуляторе, скорректированное при магнитных измерениях с требуемой точностью, может значительно измениться после установки ондулятора на рабочее место.

Раздел 3.1 посвящён экспериментальному исследованию прохождения поля Земли в зазор ондулятора. Для идеальной магнитной структуры зависимость данного эффекта от ориентации ондулятора должна наблюдаться только для горизонтальной компоненты поля, анализ измерений которой приводится в **разделе 3.1.1**. Наиболее простым способом определить вклад поля Земли в первый интеграл поперечной горизонтальной компоненты (вдоль оси X в системе координат ММ1) первого интеграла поля ондулятора является измерение этого интеграла для двух ориентаций ондулятора, отличающихся поворотом на 180° вокруг вертикальной оси (Y в системе координат ММ1). В этом случае X компонента первого интеграла поля для исходной ($I_{IX}(0^\circ)$) и повернутой на 180° ($I_{IX}(180^\circ)$) ориентации запишутся как:

$$I_{IX}(0^\circ) = I_{IXU} + I_{IXE}, I_{IX}(180^\circ) = -I_{IXU} + I_{IXE},$$

где I_{IXE} – вклад поля Земли, I_{IXU} – вклад собственного поля ондулятора. Соответственно, вклад поля Земли в X компоненту первого интеграла получается равным:

$$I_{IXE} = [I_{IX}(0^\circ) + I_{IX}(180^\circ)]/2.$$

В ходе эксперимента величина этого вклада была измерена для двух ондуляторов APS27 #5s и UNA33 #6 с периодами 27 и 33 мм соответственно. При этом у APS27 #5s несущая рама выполнена из магнитно-восприимчивой

стали, а у UNA33 #6 рама практически не намагничивается. Таким образом, было экспериментально проверено влияние магнитно-восприимчивых элементов конструкции на вклад внешнего поля.

В ходе анализа полученных результатов было показано, что установленные для ондуляторов допуски могут быть превышены, если вклад поля Земли не учтён для различных положений ондулятора.

Для лучшего понимания экспериментальных результатов в разделе 3.2 эффекты, описываемые выше, анализируются с помощью численного моделирования.

В пункте 3.2.1 приводится описание используемой модели расчётов и их методика. Все расчёты выполнены с помощью кодов Radia и Opera.

Пункт 3.2.2 посвящён анализу полученных результатов для моделей, которые соответствуют ондуляторам APS27 #5s и UNA33 #6. Рассматривается прохождение горизонтальной и вертикальной компоненты поля Земли в зазоре ондулятора с рамой и без рамы, выполненной из магнитно-восприимчивого материала, а также эффект от поворота горизонтальной компоненты поля Земли на 180°. Расчётные данные сравниваются с результатами магнитных измерений, приведённых в разделе 3.1.

В пункте 3.2.3 описанные выше шаги повторяются для модели 0,8-метрового прототипа ондулятора с горизонтальным полем (HGVPV). Показывается, что эффект от прохождения поля Земли в зазор ондулятора не нарушает основное ограничение на смещение траектории частицы в пределах 2 мкм для секции ондулятора длиной 3,4 м.

Четвертая глава посвящена анализу механических ошибок при конструировании несущего механизма ондулятора и разработке принципиально нового несущего механизма для прототипа горизонтального ондулятора под проект LCLS-II, основанного на полной компенсации магнитной силы набором пружин с нелинейной нагрузочной характеристикой.

В разделе 4.1 решается задача прогиба несущей балки с магнитной структурой под действием магнитной нагрузки с учётом и без учёта компенсирующих сил. Рассматриваются возможные варианты компоновки компенсирующего механизма, а также эффект от механических ошибок в системе компенсации магнитной нагрузки.

В пункте 4.1.1 приводится аналитическое решение задачи для балки с распределённой силой и набором из N сосредоточенных сил. В случае горизонтального ондулятора все силы действуют в плоскости XZ , тогда зависимость поперечного прогиба x от z определяется дифференциальным уравнением четвёртого порядка

$$EI_2 x'''' - K_x = 0.$$

Здесь $x' = \frac{dx}{dl} \approx \frac{dx}{dz}$, EI_2 – жёсткость стержня на изгиб в плоскости XZ , E – модуль Юнга, $I_2 = hb^3/12$ – момент инерции балки с прямоугольным сечением (h – поперечный размер по оси Y , b – по X), K_x – действующая на балку внешняя сила, отнесённая к единице её длины, в нашем случае равная $K_x(z) = w(z) - \sum_i F_i \delta(z - z_i)$, где $w(z)$ – распределённая нагрузка, а F_i – сосредоточенные силы.

Пункт 4.1.2 посвящён расчёту магнитной силы для магнитной структуры LCLS-II с учётом полного распределения магнитного поля. Для ондулятора с основной компонентой поля вдоль оси X сила, создаваемая потоком магнитного поля через малый участок $dydz$ в медианной плоскости этого ондулятора и действующая на одну из его магнитных структур со стороны противоположной ей, задаётся следующим образом [14], [15]:

$$dF = \frac{B_x^2}{2\mu_0} dydz.$$

Распределение магнитного поля B_x вдоль продольной оси ондулятора ($x=0$, $y=0$) было получено с помощью кода Radia и затем отнормировано на величину пикового поля при данном зазоре. Зависимость пикового поля от магнитного зазора была вычислена как численно, с помощью кода Opera 3d, так и аналитически.

После выполнения численного интегрирования по всей длине ондулятора была получена зависимость полной магнитной силы, приложенной ко всей балке с магнитной структурой, от зазора (рис. 2) и её

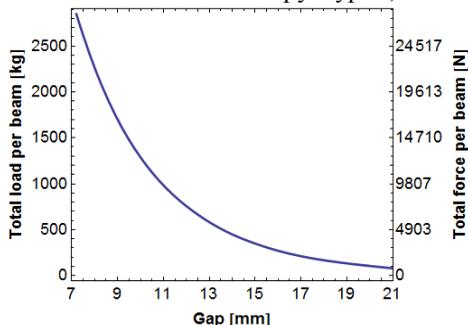


Рисунок 2. Зависимость от зазора полной магнитной силы, приложенной ко всей балке.

распределение в продольном направлении. Оказалось, что распределение силы не является равномерным на краях магнитной структуры. И в случае достаточно длинного ондулятора, когда края устройства находятся на

значительном удалении от опор, эта неоднородность силы может создавать момент, достаточный для деформации балки на несколько микрон. Данный эффект рассматривается в пункте 4.1.3.

В пункте 4.1.3 рассматривается влияние неоднородности поля на краях магнитной структуры на прогиб балки. Сравнение двух случаев прогиба балки ондулятора под действием равномерно распределённой нагрузки и реально распределённой нагрузки в магнитной структуре LCLS-II показало разницу в 1,7 мкм, что в случае малых прогибов (~10 мкм) составляет ~17% от максимального прогиба. Таким образом, при расчёте малого прогиба балки необходимо либо учитывать реальное распределение нагрузки вдоль балки и в особенности на её краях, либо использовать не полную длину магнитной структуры (в нашем случае $L=3372$ мм), а эффективную, соответствующую распределению магнитной нагрузки $w(z)$. В противном случае момент на концах ондулятора будет слабее, чем между точками подвеса, и середина ондулятора слегка «провалится».

В пункте 4.1.4 показано, как учитывается влияние прогиба балки на распределение магнитного поля в зазоре ондулятора.

Как следствие из предыдущего пункта, в пункте **4.1.5** показывается необходимость учёта изменения нагрузки на балку и компенсирующих сил при её деформации. Это может быть сделано как аналитически, так и численно в ходе нескольких итераций.

В пункте 4.1.6 анализируется прогиб несущей балки для магнитной структуры будущего ондулятора LCLS-II под действием магнитной нагрузки без компенсации и с компенсацией набором из 18 сосредоточенных сил. Используя полученное в **4.1.1** аналитическое решение для общего случая из N сосредоточенных сил и распределённой нагрузки $w(z)$ (полученное в **4.1.2**), подбирается оптимальное расположение подвеса в случае без компенсирующих сил и с ними, а также оптимальная компоновка компенсирующих блоков, при которой прогиб балки сохраняется минимальным даже при наличии ошибок в компенсирующих силах.

В случае с компенсацией магнитной силы 18 сосредоточенными силами оптимальной их компоновкой является размещение 10 из них между опорами и по 4 на краях. При этом расстояния между точками приложения компенсирующих сил пришлось сделать разными. Для установки опор были увеличены расстояния между 4 и 5, а также 14 и 15 точками. При этом расстояния между точками приложения сил на краях были сделаны немного больше, чем расстояния между точками приложения сил между опорами, чтобы скомпенсировать момент, возникший из-за неоднородности распределения сосредоточенных компенсирующих сил. Если выразить отношение расстояния от конца балки до ближайшей опоры к полной длине балки через, то оптимальным размещением опор для такой компоновки

соответствует $c = 0,2298$. В этом случае толщины балки $b = 150$ мм достаточно для удержания максимального прогиба в пределах 10 мкм.

Пункт 4.1.7. посвящён анализу систематических и случайных ошибок в системе компенсации магнитной нагрузки, их влиянию на прогиб несущей балки полноразмерного прототипа ондулятора LCLS-II и возможным способам ослабить их эффект.

В разделе 4.2 анализируется влияние механических деформаций балок на магнитные характеристики прототипа ондулятора LCLS-II. Определяются влияние систематических и случайных ошибок в компенсирующем механизме на фазовые ошибки ондулятора и соответствующие им допуски.

В разделе 4.3 рассматриваются два возможных способа практической реализации компенсирующего механизма. Первый – с помощью наборов линейных пружин, аппроксимирующих зависимость магнитной силы от зазора ондулятора. Второй – с использованием конических пружин, обладающих нагрузочной характеристикой, наиболее близкой к нужной зависимости. Анализируются ошибки, вносимые каждым способом при создании необходимых усилий, и возможные методы настройки нагрузочной характеристики компенсирующего механизма. Показывается преимущество второго способа над первым.

Раздел 4.4 посвящён экспериментальной проверке концепции компенсации магнитной силы между «челюстями» ондулятора набором конических пружин. Для проверки данного подхода в ANL был построен короткий (0,847 м) прототип с магнитной структурой ондулятора UNA 33 (период 33 мм) (рис. 3), широко применяемого в ANL [16].

Целью работы с данным прототипом было показать повторяемость и стабильность основных магнитных параметров ондулятора (B_{eff} , K , фазовых ошибок) в пределах допусков, соответствующих требованиям к будущему ондулятору LCLS-II, а также определить недостатки несущего механизма данного прототипа и их влияние на магнитные свойства всего устройства.

В пункте 4.4.1 приводится описание данного устройства и используемой магнитной структуры.

Пункт 4.4.2 посвящён расчёту силы для данной магнитной структуры, определению нагрузочной характеристики для конических пружин компенсирующего механизма (рис. 4). Также приводится описание изготовленных пружин, определение их реальных нагрузочных характеристик и сортировка в наборы для пружинных блоков.

В пункте 4.4.3 анализируются механические свойства короткого прототипа и наблюдаемые механические деформации различных элементов системы. Результатом этого является определение слабых мест построенного прототипа с точки зрения механической воспроизводимости зазора с заданной точностью и способов устранения этих недостатков.

Пункт 4.4.4 посвящён магнитным измерениям короткого прототипа и анализу полученных в ходе работы с ним данных. Механизм компенсации магнитной силы данного прототипа обеспечивает воспроизводимость основных магнитных свойств в пределах необходимых требований ($\Delta B_{eff} \leq 1$ Гс) вплоть до зазора 10,5 мм (с эффективным полем 8526 Гс) (рис. 5).

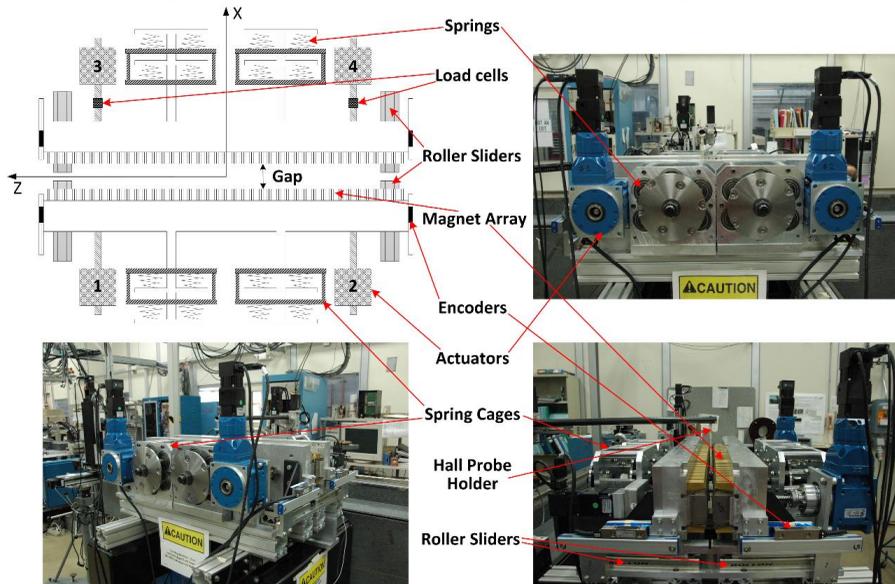


Рисунок 3. 0,8-метровый прототип ондулятора с компенсацией магнитной силы.

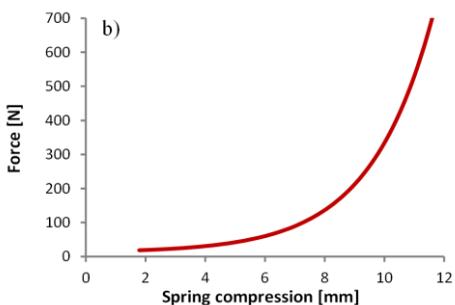


Рисунок 4. а) коническая пружина, используемая в механизме компенсации магнитной силы; б) нагрузочная характеристика для идеальной пружины.

Стоит отметить, что, согласно требованиям, максимальное значение эффективного поля для проекта LCLS-II составляет 10100 Гс, что соответствует минимальному рабочему зазору 7,2 мм для магнитной

структуры LCLS-II (период равен 26 мм). Результаты выполненных тестов показали, что устройство, построенное на основе данного подхода, способно удовлетворить требованиям, предъявляемым как к ондулятору для проекта LCLS-II в частности, так и к источникам РИ 4-го поколения в целом. Успешные испытания 0,8-метрового прототипа послужили основанием для разработки полноразмерного (3,4 м) прототипа ондулятора с горизонтальным магнитным полем и компенсацией магнитной силы набором конических пружин.

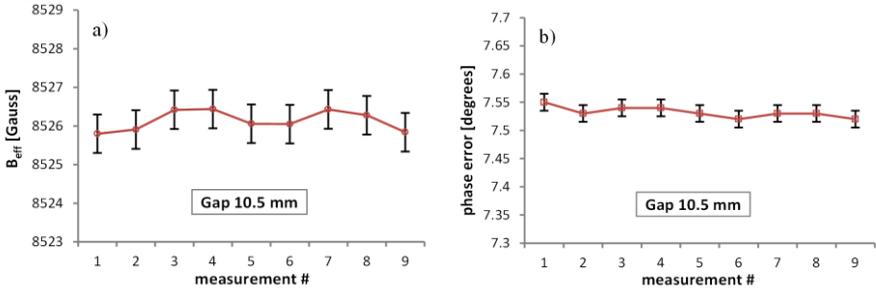


Рисунок 5. Результаты тестов для зазора 10,5 мм: а) повторяемость B_{eff} ; б) повторяемость значения фазовой ошибки.

Раздел 4.5 посвящён построенному в ANL полноразмерному (3,4 м) прототипу горизонтального ондулятора HGVPU (Horizontal Gap Vertically Polarizing Undulator), разработанного как прототип будущего ондулятора LCLS-II (рис. 6). Приводится описание разработанной системы компенсации магнитных сил для данного (3,4 м) прототипа, а также результаты тестов его механических и магнитных характеристик.



Рисунок 6. Полноразмерный (3,4 м.) прототип горизонтального ондулятора LCLS-II с динамической компенсацией магнитной силы (HGVPU).

В пункте 4.5.1 даётся описание основных элементов конструкции полноразмерного (3,4 м) прототипа HGVPU. Антисимметричная магнитная

структура состоит из 129,5 периодов и одного полюса (260 полюсов и 259 магнитов). Полная длина магнитной структуры составляет 3372 мм, длина периода $\lambda_u = 26$ мм. Геометрия полюсов и магнитов была оптимизирована таким образом, чтобы при заданных значениях амплитуды магнитного поля и ширины области «хорошего» поля в поперечном направлении Y получить минимальную магнитную нагрузку. Ондулятор нацелен на генерацию излучения при рабочих зазорах 7,2 – 20 мм, поэтому компенсация магнитной силы происходит только в этом диапазоне.

Для выравнивания поверхности полюсов вместо механических шимов, которые обычно используются для этой процедуры при настройке ондуляторов APS, было применено специальное соединение кассеты с магнитной структурой и несущей балки длинными болтами, нагруженными тарельчатыми шайбами-пружинами, как это показано на рисунке 7.

Поперечные размеры каждой балки составляют 205 мм × 150 мм в вертикальном и горизонтальном направлении соответственно. Балки выполнены из алюминиевого сплава 7075 с модулем упругости $E = 7311$ кгс/мм². Линейные направляющие, пружинные блоки и приводы устанавливаются на единую несущую плиту/балку, которая в свою очередь размещается на двух опорах, сохранившихся от ондулятора LCLS-I (рис. 6). Для компенсации магнитной силы к каждой балке крепится по 18 блоков с пружинами. Их размещение вдоль балки и порядок установки обсуждалось в п. 4.1 – 4.2. Вакуумная камера также устанавливается на основную плиту/балку ондулятора. Каждая секция ондуляторной линии содержит свой участок вакуумной камеры.

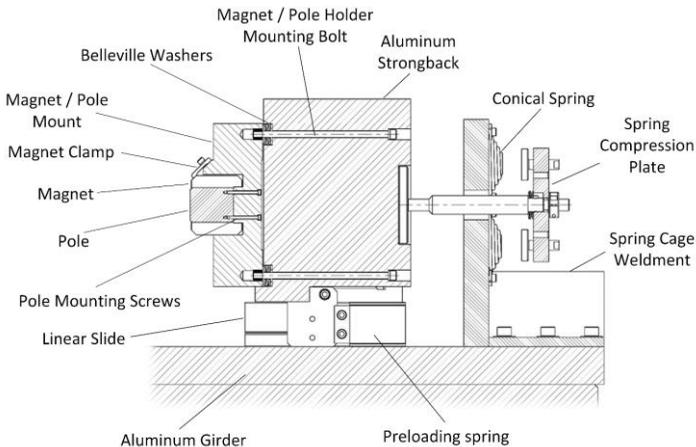


Рисунок 7. Поперечное сечение HGVPU (показана только правая половина).

Пункт 4.5.2 посвящён основному элементу системы динамической компенсации магнитной силы – пружинным блокам. Каждый блок содержит

4 пружин двух типов (по две каждого типа) с различной нагрузочной характеристикой (рис. 8). Для настройки момента задействия всех пружин в блоке, другими словами начала сжатия всего блока, предусмотрен специальный механизм, который позволяет смещать нагрузочную кривую всего блока относительно кривой зависимости магнитной силы от зазора. Подобным образом может изменяться и момент зайдствования отдельно взятой пружины. Это позволяет настраивать итоговую нагрузочную характеристику всего блока и используется при калибровке.

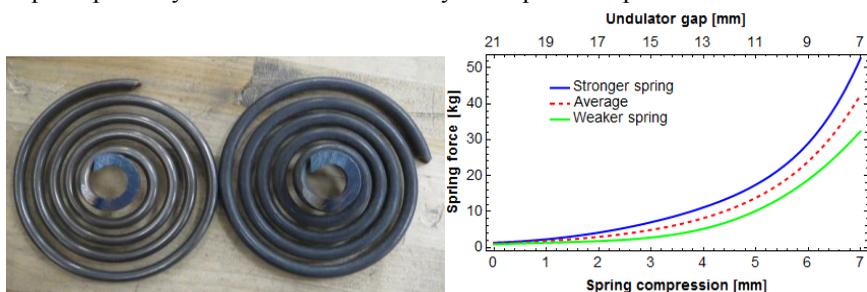


Рисунок 8. Использованные конические пружины с различной нагрузочной характеристикой и создаваемая ими сила в зависимости от зазора ондулятора/сжатия пружины.

Перед сборкой и калибровкой пружинных блоков были измерены нагрузочные характеристики всех пружин по отдельности. После чего они были отсортированы в наборы по 4 (по 2 каждого типа). Собранные блоки были откалиброваны. Для измерения нагрузочных характеристик пружин и блоков с пружинами в лаборатории магнитных измерений MM1 APS был создан калибровочный стенд.

В пункте 4.5.3 приводится описание постановки и результатов тестов механических характеристик HGVPU, подтверждающих соответствие построенного прототипа основному требованию к ондуляторам с изменяемым зазором LCLS-II – воспроизводимость характеристик и малые деформации несущих балок во всём диапазоне рабочих зазоров.

Для проверки воспроизводимости пружинных блоков было выполнено около 30000 циклов сжатия одного из блоков на калибровочном стенде. При каждом сжатии измерялась нагрузочная характеристика блока. Повторяемость генерируемой им силы при максимальном сжатии, соответствующем минимальному зазору ондулятора (7,2 мм) и полной нагрузочной характеристике блока (среднеквадратичное отклонение σ при различной степени сжатия) показаны на рисунке 9. Из графиков на рисунке 9, что при длительной эксплуатации пружинных блоков не наблюдается значительной деградации свойств пружин, способной вызвать неприемлемый прогиб несущих балок.

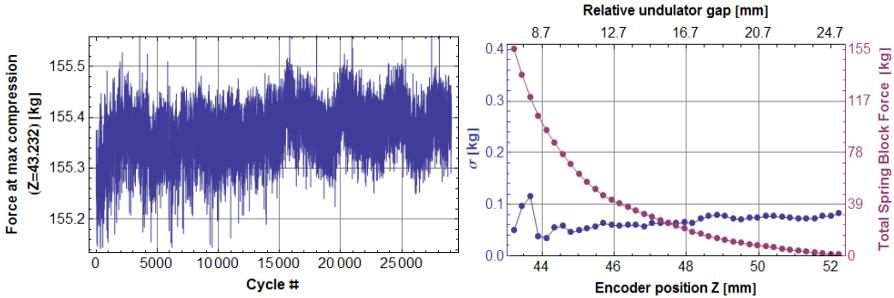


Рисунок 9. Повторяемость нагрузочной характеристики пружинного блока в ходе 30000 циклов. Воспроизводимость силы при максимальной сжатии (левый график) и среднеквадратичное отклонение при различной величине сжатия (правый). На левом графике экспоненциальная кривая показывает зависимость создаваемой пружинным блоком силы от магнитного зазора (правая шкала).

Наиболее показательным, с точки зрения воспроизводимости магнитных характеристик ондулятора, является стабильность и повторяемость эффективного коэффициента ондуляторности K_{eff} . Допуск LCLS-II на относительное изменение K_{eff} при фиксированном зазоре – $|\Delta K/K| \leq 2,3 \cdot 10^{-4}$. С целью исследования повторяемости K_{eff} при длительном использовании устройства было выполнено 2000 циклов закрывания/открывания магнитного зазора от 25 мм до 7,2 мм. Каждые 50 циклов производилось сканирование датчиком Холла при зазоре 7,2 мм. Повторяемость $\Delta K/K$ в ходе эксперимента показана на рисунке 10.

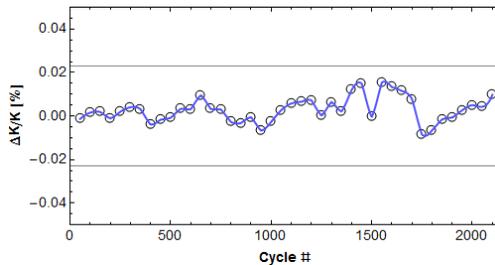


Рисунок 10. Относительное изменение K_{eff} , измеренное в зазоре HGVPU 7,2 мм, при многократном открывании/закрывании зазора. Требование LCLS-II $\pm 0.023\%$ (горизонтальные линии).

Также была измерена прямолинейность магнитного зазора HGVPU (в диапазоне 7,2–20 мм) после механической настройки ондулятора. Для этого была использована система измерения зазора на базе ёмкостных датчиков Saracites HPS-1x4G-A-200-FX. Из результатов измерений видно, что отклонение профиля зазора в диапазоне от 7,2 мм до 20 мм от

прямолинейного сохраняется в пределах ± 10 мкм, что соответствует допускам LCLS-II.

Пункт 4.5.4 посвящён результатам магнитных измерений HGVPU. Итоговое отклонение траектории электронов с энергией 14 ГэВ лежит в пределах ± 2 мкм, а значение среднеквадратичной фазовой ошибки не превышает 4° (см. рис. 11 и таблицу 1) во всей области рабочих зазоров. При расчёте траектории был учтён корректор на входе в устройство, создающий необходимый угол у влетающей частицы.

При зазоре ондулятора 7,2 мм эффективное значение амплитуды поля превышает 1,06 Т, что превосходит требуемые LCLS-II 1,01 Т.

В таблице 2 показаны итоговые значения для 1го и 2го интегралов поля, требования LCLS-II составляют: $I_{x,y} \leq 40$ Гс·см, $I_{2x,y} \leq 15$ кГс·см² соответственно. Таким образом, магнитные характеристики построенного прототипа вертикально поляризующего ондулятора (HGVPU) LCLS-II удовлетворяют всем требованиям и допускам к будущему ондулятору LCLS-II для генерации жёсткого рентгеновского излучения (HXR).

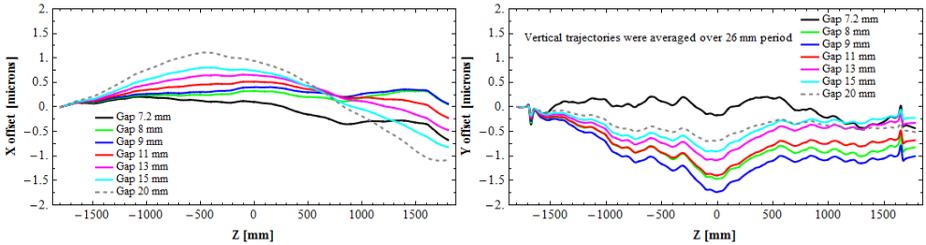


Рисунок 11. Траектория опорной частицы с энергией 14 ГэВ в плоскости XZ (верхний график) YZ (нижний) после магнитной настройки.

Таблица 1. Среднеквадратичное значение фазовой ошибки и эффективное значение пикового поля (B_{eff}) HGVPU.

Магнитный зазор (мм)	Среднеквадратичная фазовая ошибка ($^\circ$)	B_{eff} (Гс)
7.2	3.34	10604
8.0	2.96	9451
9.0	3.33	8788
11.0	3.09	6217
13.0	2.62	4777
15.0	2.50	3705
20	1.44	1997

Таблица 2. Интегралы поля прототипа ондулятора LCLS-II (HGVPV).

Магнитный зазор [мм]	I_x (Гс·см)	I_x (кГс·см ²)	I_y (Гс·см)	I_y (кГс·см ²)
7.2	15	-0.9	36	2.3
8.0	-37	-4.6	26	0.2
9.0	-33	0.2	22	-0.4
11.0	-17	5.5	22	0.4
13.0	-2	3.7	20	2.5
15.0	10	5.5	13	4.1
20	35	8.1	-25	4.7

В заключении диссертации сформулированы основные результаты работы:

1. Усовершенствован процесс калибровки датчиков Холла. В настоящее время используемые в ANL датчики Холла Senis удовлетворяют требованиям к точности магнитных измерений, необходимой при настройке прецизионных ондуляторов для источников РИ 4-го поколения, и могут быть использованы как единый инструмент для всех типов измерений магнитных полей ондулятора.
2. Установлено, что интегралы поля ондулятора могут превысить установленные допуски, если не учитывается различие в ориентации ондулятора относительно поля Земли при его настройке и эксплуатации. На примере ондулятора APS27 #5s продемонстрирован эффект экранирования вертикальной компоненты поля Земли рамой из магнитно-восприимчивого материала. Усиление за счёт полюсов вертикальной компоненты поля Земли в 1,55 раза было уменьшено до 0,71 при изменении материала рамы на магнитно-восприимчивый. Такой же эффект наблюдается и при прохождении горизонтального поля Земли в зазор ондулятора с горизонтальным полем. Расчёт показал, что наличие горизонтальной компоненты поля Земли не нарушает основное требование проекта LCLS к отклонению траектории опорной частицы в пределах 2 мкм на сегменте ондулятора длиной 3,4 метра.
3. В результате анализа полученного аналитического выражения для изгиба балки, нагруженной распределённой нагрузкой и 18 сосредоточенными силами, было определено оптимальное расположение приводов и пружинных блоков вдоль несущей балки полноразмерного прототипа ондулятора LCLS-II с горизонтальным полем. Найденное решение позволяет уменьшить максимальное значение прогиба балки до величины, не превышающей 4,7 мкм, и сделать его менее чувствительным к ошибкам в системе компенсации.

4. В ходе анализа возможных ошибок в системе компенсации магнитной силы продемонстрировано, что систематическая ошибка компенсирующих сил имеет очень слабое влияние на деформацию несущей балки. Относительное изменение прогиба балки при ослаблении каждого блока на 2 кгс (согласно производителю, деградация не превышает 1,5 кгс) примерно равно 1 мкм. Ослабление пружин при длительном их использовании может ухудшить фазовые ошибки максимум на $0,5^\circ$, что несложно учесть в ходе настройки ондулятора.
5. Эффект от случайных ошибок компенсирующих сил, напротив, может превысить установленные допуски. Простая сортировка блоков позволяет значительно сократить прогиб. Это делает необходимым измерение нагрузочной характеристики каждого блока и его калибровку.
6. Разработан и создан короткий (0,8 м) прототип ондулятора с горизонтальным полем, переменным зазором и механизмом компенсации магнитной силы во всем диапазоне рабочих зазоров. В ходе серии испытаний построенного прототипа было показано, что ондуляторы, использующие данную концепцию, способны удовлетворить требованиям, предъявляемым к ондуляторам для рентгеновских ЛСЭ. Положительные результаты работы с коротким прототипом послужили основанием для разработки и создания полноразмерного прототипа длиной 3,4 метра для проекта рентгеновского ЛСЭ LCLS-II.
7. Разработан и создан полноразмерный прототип длиной 3,4 метра для проекта рентгеновского ЛСЭ LCLS-II, механические и магнитные тесты которого показали, что данное устройство удовлетворяет всем требованиям и допускам к будущим ондуляторам LCLS-II.
8. В ходе всей работы было показано, что применение компенсации магнитных сил пружинами с нелинейной характеристикой позволяет создавать компактные ондуляторы, удовлетворяющие жёстким требованиям источников РИ 4-го поколения.

Разработанные методы улучшения точности магнитных измерений и конструкция ондулятора могут быть использованы в ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН, НИЦ «Курчатовский институт» и других ускорительных центрах.

Используя представившуюся возможность, автор выражает **благодарность** Н.А. Винокурову и И.Б. Вассерману за общее руководство работой и постоянное внимание, Э.М. Трахтенбергу как автору идеи динамической компенсации магнитной нагрузки набором нелинейных пружин, Е.С. Глускину за постоянный интерес к работе, ценные обсуждения и помощь, Д. Шу за многочисленные обсуждения и помощь, А.А. Жоленцу за ценные обсуждения и помощь, а также всему коллективу группы магнитных устройств APS ANL, участвовавших при создании прототипа ондулятора HGVPV.

Результаты данной работы опубликованы в следующих работах (из них 3 (№1, 2 и 3) публикации соответствуют требованиям ВАК):

1. B. Vasserman, N. O. Strelnikov, and J. Z. Xu. *Some aspects of achieving an ultimate accuracy during insertion device magnetic measurements by a Hall probe.* // Review of Scientific Instruments. 2012. 84, 025004.
2. N. O. Strelnikov and I. B. Vasserman. *Earth's field effect on magnetic performance of horizontally and vertically polarizing undulators.* // Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams. 2014. 17, 062401.
3. N. Strelnikov, E. Trakhtenberg, I. Vasserman, J. Xu, and E. Gluskin. *Vertically polarizing undulator with the dynamic compensation of magnetic forces for the next generation of light sources.* // Review of Scientific Instruments. 2014. 85, 113303.
4. A. Zholents, J. Lui, N. Strelnikov, K. Suthar, and E. Trakhtenberg. *Mechanical design of the undulator with the horizontal gap and spring compensation of the magnetic force.* // ANL APS Technical Note, MD-TN-2015-001. 2015.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Clarke J. A. The science and technology of undulators and wigglers // Oxford University Press, 2004.
- [2] E. Levicev, N. Vinokurov Undulators and Other Insertion Devices // Rev. of accel. science and technology, 2010, Vol. 3, pp203-220.
- [3] D. Fritz Impact of a Vertically Polarized Undulator on LCLS Hard X-ray Experiments // SLAC report, SLAC-R-1048.
- [4] J. Pflueger European XFEL. Undulator Systems for the European XFEL // EFST Workshop on Advanced Undulator Physics and Technology for Light Sources, December 3-4, 2009, Shanghai.
- [5] T. Tanaka, S. Goto, T. Hara, T. Hatsui, H. Ohashi, et al. Undulator commissioning by characterization of radiation in x-ray free electron lasers // Phys. Rev. ST-AB, 15, 2012, 110701.
- [6] D. La Civita, R. Bracco, B. Diviacco, G. Tomasin, D. Zangrando Fermi@Elettra Undulator Frame Study // Proceedings of European Particle Accelerator Conference, 2008, pp. 2276-2278.
- [7] Dong Eon Kim Status of the PAL-XFEL Undulator System // Proceedings of International Particle Accelerator Conference, 2012, pp. 3509-3511.
- [8] Conceptual Design Report // SwissFEL Project, April 2012, pp. 91–102, Paul Scherrer Institut, Switzerland.
- [9] R. Carr Magnetic Counterforce for Insertion Devices // SLAC publication, 2002, SLAC-pub-9594.

- [10] R. Kinjo and T. Tanaka Development of a magnet system to cancel the attractive force toward structural reform of undulators // proceedings of FEL conference, 2014, pp. 75-79.
- [11] R. Kinjo and T. Tanaka Phase combination for self-cancellation of magnetic force in undulators // Phys. Rev. ST-AB, 17, 2014, 122401.
- [12] O. Marcouillé, P. Brunelle et. al. An in vacuum wiggler WSV50 for producing hard X-ray at SOLEIL // proceedings of European Particle Accelerator Conference, 2008, pp. 2288 - 2290.
- [13] E.H. Putley The Hall effect and related phenomena // Butterworth, 1960, London.
- [14] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц Теория поля // Том II, § 33, М.: Наука, 1973.
- [15] Дж. Джексон Классическая электродинамика // М.: «Мир», 1965.
- [16] Roger J. Dejus, Isaac B. Vasserman, Shigemi Sasaki, and Elizabeth R. Moog Undulator A Magnetic Properties and Spectral Performance // ANL/APS/TB-45 39, 2002.

СТРЕЛЬНИКОВ Никита Олегович

**Проблемы создания прецизионных
Ондуляторов на постоянных магнитах
для рентгеновских лазеров
на свободных электронах**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 11.10.2016 г.

Подписано в печать 13.10.2016 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 1.6 усл. печ.л., 1.3 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 20

Обработано на РС и отпечатано

на ротапринте ИЯФ СО РАН,

Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11