

**ОТЗЫВ официального оппонента**  
**на (о) диссертацию(и) на соискание ученой степени кандидата**  
**физико-математических наук Калитенко Александра Михайловича**  
**на тему: «Исследование влияния динамики пучка электронов на**  
**генерацию гармоник в однопроходных лазерах на свободных**  
**электронах»**  
**по специальности 1.3.3. Теоретическая физика**

Лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) представляют собой мощные источники когерентного излучения, охватывающие широкий спектр длин волн — от микроволн до рентгеновского диапазона. Возможность перестройки длины волны излучения делает лазер на свободных электронах незаменимым инструментом исследования в материаловедении, кристаллографии, биологии и медицине. Проектирование и реализация ЛСЭ с заданным набором характеристик требуют глубокого теоретического анализа электронно-волнового взаимодействия. Излучение в ЛСЭ возникает в процессе движения релятивистских электронов в магнитном поле ондулятора, когда воздействие на электроны излучаемой волны приводит к их группировке. Для расчета излучения ЛСЭ необходимо решить самосогласованную задачу, включающую уравнения Максвелла и уравнения движения большого числа частиц. Решение указанных задач осуществляется посредством компьютерного моделирования. Современные ЛСЭ в основном описываются классической электродинамикой, и квантовые эффекты пока не играют существенной роли, однако создание численных моделей на основе квантовой теории представляет собой интересную научную задачу, которая может найти применение в будущем. Бетатронные колебания электронов, обусловленные поперечной неоднородностью ондуляторного поля, могут влиять на характеристики излучения ЛСЭ, включая группировку электронов и генерацию четных гармоник. Генерация второй гармоники в кристаллах является основным нелинейно-оптическим эффектом. Поэтому в экспериментах, где ЛСЭ

применяются как инструмент исследования, необходимо учитывать мощность второй гармоники. Лазеры на свободных электронах способны генерировать излучение высокой яркости в рентгеновском диапазоне. Однако некоторые задачи требуют генерации тераваттных импульсов в жестком рентгеновском диапазоне, что невозможно достичь при использовании традиционных ЛСЭ с фиксированным периодами амплитудой ондуляторного поля. Для повышения эффективности извлечения энергии из электронного пучка применяется метод тейперинга, который заключается в изменении параметра ондуляторности вдоль лазера. Возможность применения тейперинга уже была продемонстрирована экспериментально.

Диссертационная работа Калитенко А.М. вносит существенный вклад в решение указанных выше вопросов, что свидетельствует о ее актуальности и важности для развития исследований физики ЛСЭ.

Основное содержание работы изложено в пяти главах. **В первой главе** рассматриваются теоретические положения, связанные с исследованиями лазеров на свободных электронах. Описываются основные методы и выводятся формулы, необходимые для расчета излучения релятивистского электрона в периодическом магнитном поле ондулятора. В разделе 1.1.3 описано изменение фазового пространства электронов при взаимодействии пучка электронов с излучением с использованием авторской программы моделирования излучения ЛСЭ. В последнем разделе первой главы демонстрируется, что квантовые эффекты не оказывают значительного влияния в современных рентгеновских лазерах на свободных электронах. Это подтверждает, что методы классической электродинамики остаются эффективными и применимыми в данной области.

**Во второй главе** описывается методика построения программ для численного моделирования излучения гармоник в однопроходных ЛСЭ. Хотя численные методы и алгоритмы для моделирования гармоник давно

известны, автор диссертации провел анализ актуальной литературы и сравнение некоторых методов и алгоритмов, например, алгоритмов создания начальной группировки электронов в банче. Также автор проводит сравнение и обсуждение результатов вычислений собственной программы с программами других авторов. Программа автора написана на современной версии языка C++, учитывает такие эффекты, как асимметрия пучка электронов, энергетический разброс электронов, бетатронные колебания, начальную группировку, сдвиг поля относительно частиц, фокусировка пучка электронов, сдвиг фаз между секциями ондуляторов и начальное излучение в ЛСЭ. В созданную программу автор внедрил новые выведенные им аналитические формулы для коэффициентов связи между электронами и излучением с учетом бетатронных колебаний для ЛСЭ с однопериодическим плоским и спиральным ондуляторами, которые уточняют ранее выведенные коэффициенты. Методика теоретического исследования и программа автора поддерживает параллельные вычисления с произвольным количеством потоков.

**В третьей главе** получены аналитические выражения для коэффициентов связи между электронами и излучением с учетом бетатронных колебаний для ЛСЭ с однопериодическим плоским и спиральным ондуляторами, а также проведен анализ излучения ЛСЭ с различными типами ондуляторов с учетом бетатронных колебаний. Было проведено моделирование эксперимента LCLS (Linac Coherent Light Source - США) в мягком рентгеновском диапазоне, где было обнаружено излучение на второй гармонике. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными. Для моделирования излучения на второй гармонике были получены оригинальные соотношения для коэффициентов связи, которые отличаются от использованных ранее другими авторами. Уточненные автором коэффициенты связи между электронами и излучением для четных

гармоник увеличивают вклад второй гармоники примерно на 70% для эксперимента LCLS в мягком рентгеновском диапазоне. Численное моделирование показало следующие соотношения мощностей гармоник: отношение мощности третьей гармоники к первой составляет примерно 3%, отношение мощности второй гармоники к первой составляет примерно 0,04%, что хорошо согласуется с экспериментальными данными. Проведено моделирование пространственного распределения интенсивности второй гармоники. Указанное распределение имеет двойную структуру, которую также наблюдали в эксперименте. В диссертации были получены также новые соотношения, описывающие взаимодействие электронов с гармониками излучения в случае спирального ондулятора. Для ускорения моделирования второй гармоники в спиральном ондуляторе были выведены упрощенные коэффициенты.

**В четвертой главе** проведен анализ процесса подавления излучения высших гармоник в ЛСЭ с использованием тейперинга на основе специализированной программы, разработанной автором. Исследование базируется на модифицированных моделях Кролла–Мортон–Розенблюта. Рассмотрены две версии фазового сдвига. Показано, что фазовый сдвиг между электронным пучком и лазерным излучением после каждой секции ондулятора значительно снижает относительный вклад высших гармоник. Подавление высших гармоник является критически важным для улучшения качества исследований в области нелинейной оптики, поскольку изучение генерации второй, третьей и четвертой гармоник в веществах требует минимизации их присутствия в исходном лазерном излучении.

**В пятой главе** представлен инновационный математический метод решения уравнений для ЛСЭ, основанный на применении технологий машинного обучения. В настоящее время машинное обучение является универсальным инструментом для проведения исследований в различных областях. Для построения модели автор использовал численное

моделирование для сбора данных о двух тысячах различных конфигураций ЛСЭ. Были разработаны алгоритмы преобразования данных и подобрана оптимальная архитектура нейронной сети. Исследование показало, что нейронная сеть работает намного быстрее, чем обычные численные программы, и при этом достигает тех же результатов.

Полученные автором диссертации результаты являются новыми и имеют научную ценность. Они представляют интерес для научно-исследовательских институтов и групп, в которых проводятся аналогичные исследования, и могут быть рекомендованы для включения в программы специальных курсов в российских высших учебных заведениях. Достоверность и обоснованность результатов подтверждается использованием хорошо апробированных методов и подходов, причем результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментами.

По содержанию диссертации можно сделать ряд замечаний, часть из которых следует рассматривать как пожелание для последующего развития:

1. В первой главе некоторые аспекты описаны излишне кратко, хотелось бы видеть более детальное описание. Например, в разделе 1.1.3 приведен подробный вывод коэффициента Бесселя для первой гармоники в плоском ондуляторе, а для спирального ондулятора указано лишь значение аналогичного коэффициента, хотя методика его вывода не менее значима, чем в первом случае.

2. Формула (1.61) выведена в приближении  $f_1=1$ , однако формула (1.79) выражена уже с учетом произвольности коэффициента  $f_1$ . Конечно, это не влияет на основные результаты диссертации, но детальное обоснование возможности использования идентичности ответов для частного выбора и общего значения улучшило бы понимание результатов диссертационной работы.

3. Автор приводит сравнения своих результатов с результатами других работ последних лет. Однако генерация высших гармоник в лазерах на свободных электронах рассматривалась и в более ранних работах, например, в работе Н.С. Гинзбурга «Перестройка частоты излучения и генерация высших гармоник в лазерах на свободных электронах с интенсивным полем накачки» в журнале ЖТФ, т.51, вып.4, с.764-770 (1981). Сравнительный анализ последних работ с ранними работами усилил бы диссертацию и сделал бы некоторые математические результаты более доступными.

4. В четвертой главе автором рассмотрена генерация первой, третьей и пятой гармоник в ЛСЭ с тейперингом и приведен качественный аргумент, что вторая и четвертая гармоники дают меньший вклад по сравнению с указанными тремя. Строгое численное обоснование таких выводов необходимо было сделать, тем более что математические методы и программное обеспечение, разработанные автором, это позволяют.

Указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.3. Теоретическая физика (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Калитенко Александр Михайлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. Теоретическая физика.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук,  
профессор, член-корреспондент РАН,  
заведующий отделом высокочастотной релятивистской электроники  
ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной  
физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»

Гинзбург Наум Самуилович

Дата подписания

24.03.2026

Контактные данные:

тел.:

Специальности, по которым официальным оппонентом  
защищена диссертация:

01.04.04 – Физическая электроника, 01.04.08 – Физика плазмы

Адрес места работы:

603950, Нижегородская область, г. Нижний Новгород,  
ул. Ульянова, д. 46,  
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной  
физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»,  
отдел высокочастотной релятивистской электроники  
Тел.: 7(831) 416-48-16; e-mail: ginzburg@ipfran.ru

Подпись сотрудника

ИПФ РАН Н.С. Гинзбурга удостоверяю:

Ученый секретарь ИПФ РАН

к.ф.-м.н. И.В. Корюкин

дата

25.03.2026