

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию 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

Диссертационное исследование А.М. Калитенко относится к проблеме разработки эффективных методов описания процессов генерации когерентных рентгеновских импульсов с длиной волны $O(1\text{\AA})$, длительностью $O(100\text{fs})$ и мощностью $O(10\text{TW})$ в лазерах на свободных электронах (ЛСЭ). Такие рентгеновские импульсы открывают уникальные возможности для детальных исследований наноструктур — прежде всего структур отдельных биологических частиц (например, вирусов и биомолекул), в том числе их динамику, а также отдельных квантовых объектов. В настоящее время работают несколько ЛСЭ источников рентгеновских импульсов, два из них с такими рекордными параметрами - XFEL (DESY, Гамбург) и LCLS-II (SLAC, Стэнфорд). Фундаментальным явлением в генерации рентгеновских импульсов на этих установках является *самоусиление спонтанного излучения* (ССИ) в ондуляторе, открытое в 1980 году новосибирскими физиками А. Кондратенко, Я. Дербеневым и Е. Салдиным. Однако отработка устойчивой технологии создания ЛСЭ с ССИ на XFEL и LCLS-II оказалась не простым делом и заняло несколько лет. При этом для разных прикладных экспериментов на XFEL и LCLS-II требуются рентгеновские импульсы с разными параметрами. Добавим, что лазеры на свободных электронах имеют большие перспективы для структурных исследований нанообъектов — несомненно, в будущем такие установки будут создаваться для исследований во многих прикладных дисциплинах. Это определяет высокую актуальность разработки эффективных методов детального описания процессов генерации в ЛСЭ когерентных рентгеновских импульсов на масштабах $O(1\text{\AA})$ - $O(100\text{fs})$ - $O(10\text{TW})$.

В отношении к вышесказанному из результатов диссертационных исследований А.М. Калитенко отметим разработку нейросетевого метода моделирования генерации излучения, представленный в Главе 5 диссертации. В разработанном методе используется нейронная сеть с двумя скрытыми полносвязными слоями и двумя слоями (task-specific hidden layers), которые предназначены для решения конкретной задачи. На вход сети подается вектор из семи параметров (ондулятора и пучка электронов), а на выходе три параметра результирующего излучения. Фактически, нейронная сеть используется как универсальный аппроксиматор функции отображения 7-мерного входного вектора в 3-мерный выходной. Аппроксимация выполняется за счет оптимизации весов нейронов в скрытых слоях нейронной сети по методу градиентного спуска. Математическим обоснованием такого подхода является теорема Д. Цыбенко (1989) о том, что нейронная сеть с одним скрытым слоем может аппроксимировать любую непрерывную функцию многих переменных с любой точностью. Фундаментальной основой для нейросетевых подходов является теорема Колмогорова—Арнольда, которая утверждает, что любая непрерывная функция нескольких переменных может быть представлена как конечная сумма и суперпозиция непрерывных функций от одного переменного. Разработанный нейросетевой подход был протестирован на примере моделирования ЛСЭ в режиме усилителя с плоским ондулятором с обучением на 1700 наборах конфигураций ЛСЭ (7-мерных входных и 3-мерных выходных параметров), полученных с помощью численных программ, представленных в Главе 2 диссертации. Сравнение результатов нейросетевой аппроксимации с экспериментальными данными FEL SPARC (раздел 5.4 диссертации) показал точность, сравнимую с численными методами их моделирования. При этом скорость нейросетевого моделирования на порядки быстрее численного. В диссертации указывается, что разработанный нейросетевой метод, в силу своей математической

универсальности, может быть применен и для других типов ондулятора, например для спирального, с чем мы полностью согласны.

Из полученных в диссертационной работе результатов мы также отмечаем получение новых аналитических выражений для различных конфигураций магнитных полей ондулятора — с плоским одночастотным и спиральным ондуляторами (Глава 3 диссертации). Получены формулы для коэффициентов связи (коэффициентов Бесселя) между параметрами электронов и излучения для плоского одночастотного ондулятора, а также для спирального ондулятора для второй гармоники. Научная значимость этих результатов состоит именно в том, что полученные аналитические выражения могут использоваться в различных теоретических исследованиях, в построениях новых феноменологических моделей и при разработке новых численных методов моделирования ЛСЭ с самоусилением спонтанного излучения.

Значимым результатом также является разработка способов подавления высших гармоник в ЛСЭ с тейперингом за счет фазовых сдвигов электронов относительно фотонов (Глава 4 диссертации).

В Главе 2 представлены методы и алгоритмы, разработанные для программ численного 3D моделирования излучения гармоник в однопроходных ЛСЭ с учетом аксиальной асимметрии пучка электронов и бетатронных колебаний, сдвига поля по отношению к частицам, сдвига фаз между секциями ондуляторов. Работа разработанных программ была проверена на примере однопроходных ЛСЭ с плоским одночастотным ондулятором, и было проведено сравнение с другими численными программами моделирования, известными в литературе.

Диссертация состоит из Введения, пяти Глав, Заключения, Списка условных обозначений и Литературы. Объем диссертации 110 страниц, в ней 59 рисунков, 5 таблиц, в Списке условных обозначений 60 позиций, в списке Литературы 110 использованных источников.

Во Введении сформулированы актуальность темы диссертации, цели и задачи диссертационного исследования, научная новизна и практическая значимость результатов выполненных работ.

В Главе 1 обсуждены основные положения теории ЛСЭ.

В Главе 2 представлены методы и алгоритмы, разработанные для программ численного 3D моделирования излучения гармоник в однопроходных ЛСЭ с учетом аксиальной асимметрии пучка электронов и бетатронных колебаний, сдвига поля по отношению к частицам и сдвига фаз между секциями ондуляторов. Работа этих программ было проверена на примере однопроходных ЛСЭ с плоским одночастотным ондулятором, и было проведено сравнение с альтернативными численными программами моделирования.

В Главе 3 представлены новые аналитические выражения и проведено исследование излучения ЛСЭ с различными типами ондуляторов с учетом бетатронных колебаний.

В Главе 4 представлены результаты анализа подавления излучения высших гармоник в ЛСЭ с тейперингом.

В Главе 5 представлен разработанный нейросетевой метод моделирования генерации излучения в широком диапазоне длин волн — от инфракрасного до рентгеновского.

В Заключение представлены основные результаты диссертационного исследования.

По тексту диссертации есть замечание. В разделе 1.1.6 «Квантовые эффекты в ЛСЭ» Главы 1 сказано, что *«Несмотря на то, что первая теория ЛСЭ основана на квантовой механике [20], анализ показывает, что классическая теория описывает работу ЛСЭ с хорошей точностью»*. Далее в разделе 1.1.6 приведены формулы в подтверждение этого утверждения. Соответственно, в Выводах к Главе 1 сказано *«Показано, что квантовые эффекты не играют существенную роль даже в современных рентгеновских*

лазерах на свободных электронах и применение классической электродинамики обосновано». Нам представляется, что вышеприведенные утверждения даны в слишком общем виде. Тут необходимо четко указать, какие именно расчеты можно выполнять в терминах классической электродинамики с хорошей точностью. Также заметим, что в некоторых местах в тексте используется сленговая терминология. Например, в начале Главы 3 сказано «Синусоидальное поле ондулятора не удовлетворяет уравнениям Максвелла вне оси ондулятора».

Заметим, однако, что указанные замечания не снижают высокую оценку диссертации А.М. Калитенко.

Текст диссертации написан на хорошем научном уровне. Результаты диссертационной работы представлены в пяти публикациях в рецензируемых научных журналах, включенных в список ВАК, и индексируемых в RSCI, WoS и Scopus. Автореферат правильно отражает содержание диссертации и полученные результаты.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов диссертационной работы обеспечивается строгостью использованных методов теории ЛСЭ, методов численного моделирования и нейросетевых методов машинного обучения, сравнением полученных результатов численного и нейросетевого моделирования с данными экспериментов и с результатами альтернативных вычислительных методов, а также научно обоснованным анализом эффективности разработанных методов и алгоритмов.

Диссертация «Исследование влияния динамики пучка электронов на генерацию гармоник в однопроходных лазерах на свободных электронах» А.М. Калитенко отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к научно-квалификационным работам. Содержание диссертации соответствует паспорту 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, старший научный сотрудник,
главный научный сотрудник Курчатовского комплекса НБИКС-пт
ФГБУ НИЦ "Курчатовский институт"
Ильин Вячеслав Анатольевич

Дата: 23.03.2026

Контактные данные: тел. 7(915)0160048, e-mail: ilyin0048@mail.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.04.02
Теоретическая физика

Адрес места работы: 123182, Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д.1,
Рабочие контакты.: 7(499)1969539; e-mail: ilyin_va@nrcki.ru

Подпись сотрудника НИЦ «Курчатовский институт» Ильина В.А. заверяю
Заместитель директора - Главный ученый секретарь НИЦ «Курчатовский институт»

О.А. Алексеева

« 24 » марта 2026 г.