



**МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ**  
федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого»  
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе

Ю. В. Фомин

"23" октября 2024 г.



23.10.2024

№ 24/10/018

на №

от

### Отзыв

ведущей организации – Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» на диссертационную работу Симакова Евгения Сергеевича на тему «Излучение пучков заряженных частиц в присутствии проводящих гофрированных структур с малым периодом», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – Радиофизика

Диссертация Е.С. Симакова представляет собой законченную научную работу, содержащую аналитические и численные исследования процессов излучения пучков заряженных частиц, движущихся в присутствии проводящих гофрированных структур, период которых мал по сравнению с длинами волн в рассматриваемом частотном диапазоне.

**Актуальность темы.** В большинстве работ, посвященных анализу излучения заряда при его движении вблизи периодических проводящих структур, рассматривается излучение в диапазоне длин волн, которые по порядку величины либо сравнимы с периодом поверхности, либо меньше его. Исследование излучения в диапазоне длин волн, существенно превышающих период, проведенное Е.С. Симаковым, является развитием фундаментальных представлений о процессах излучения пучков частиц в периодических структурах. Тема работы актуальна и для потенциальных приложений. Исследуемые структуры позволяют генерировать поверхностные волны, которые можно применить для развития методов диагностики пучков частиц, в том числе

для определения их размеров и формы. Кроме того, рассматриваемые структуры представляют интерес для создания источников гигагерцевого и терагерцевого излучения.

**Научная новизна** результатов работы заключается в следующем.

1) Проведено исследование поверхностных волн на планарной гофрированной структуре при движении пучка вдоль структуры и сквозь нее в случаях мелкого и глубокого гофрирования.

2) Проанализировано объемное излучение, генерируемое зарядом при пролете сквозь гофрированную планарную структуру в случаях мелкого и глубокого гофрирования.

3) Исследовано излучение заряда при его движении вдоль оси бесконечного цилиндрического волновода с глубокогофрированной стенкой.

4) Проведен анализ дифракции моды данного излучения на открытом конце цилиндрического глубокогофрированного волновода с фланцем.

**Научная значимость** результатов работы заключается в аналитическом и численном исследовании процессов излучения пучков частиц в описанных выше условиях. Результаты диссертации существенно расширяют представления об излучении заряженных частиц в присутствии периодических структур (как открытых, так и волноводных). В этой связи нужно подчеркнуть, что в работе исследуются электромагнитные поля в относительно длинноволновом (по сравнению с периодом структуры) диапазоне, который крайне редко рассматривался ранее в задачах об излучении частиц.

**Практическая значимость** результатов работы состоит в следующем.

1) В работе показано, что планарные системы с относительно малым периодом гофрирования позволяют генерировать поверхностные волны, форма импульса которых содержит информацию о размере пучка и распределении заряда в нем. Это позволяет разработать методы диагностики пучков, которые являются неразрушающими по отношению к самим пучкам.

2) Результаты работы показывают, что исследованные волноводные гофрированные структуры перспективны для генерации волновых кильватерных полей, которые могут использоваться в методе кильватерного ускорения заряженных частиц. Тем самым такие структуры могут рассматриваться как альтернатива по отношению к волноводам с диэлектрическими слоями, которые традиционно применяются в этом методе. Гофрированный волновод с открытым концом может использоваться также в качестве излучателя во внешнее пространство.

**Достоверность** результатов работы обусловлена применением хорошо обоснованных строгих и асимптотических аналитических методов, разработанных в электродинамике, математической физике и теории дифракции,

а также согласием полученных результатов с результатами, известными для отдельных частных случаев.

Текст работы содержит введение, три главы, заключение, список литературы и список публикаций по теме диссертации.

Во «Введении» обоснована актуальность темы работы, отмечены ее задачи, кратко описано содержание трех глав работы. Далее отмечена научная новизна и достоверность результатов работы, а также их значимость для науки и потенциальных приложений.

Первая глава посвящена исследованию излучения пучка заряженных частиц, движущегося в присутствии безграничной планарной мелкогофрированной структуры, имеющей прямоугольный профиль. При этом период гофрирования считается малым по сравнению с длинами волн в исследуемой части спектра, что позволяет применить метод эквивалентных граничных условий (ЭГУ). С его помощью в этой главе анализируется такая ситуация, когда глубина гофрирования мала по сравнению с рассматриваемыми длинами волн (мелкая гофра). Сначала рассматривается случай движения пучка частиц вдоль структуры перпендикулярно направлению гофрирования. Построено строгое решение задачи и проведен его асимптотический анализ. Показано, что на рассматриваемых (относительно низких) частотах излучение имеет характер поверхностных волн. Анализируются компоненты электромагнитного поля, проводится их численный расчет, вычисляются потери энергии заряда. Далее проводится аналогичное исследование для случая движения пучка сквозь мелкогофрированную поверхность (перпендикулярно ее плоскости). Решение такой задачи существенно сложнее. Поле излучения при этом представлено как поверхностными волнами, так и объемным излучением. Проведено исследование обеих данных составляющих поля.

Вторая глава посвящена исследованию излучения пучка заряженных частиц, движущегося в присутствии безграничной планарной глубокогофрированной структуры, имеющей прямоугольный профиль. При решении также используется описание гофры с помощью ЭГУ, вид которых существенно отличается от ЭГУ для мелкой гофры. Сначала рассматривается случай движения тонкого пучка заряженных частиц вдоль структуры, а затем более сложная ситуация, когда пучок пересекает структуру перпендикулярно ее плоскости. В первом случае излучение имеет характер поверхностных волн, а во втором содержит как поверхностные, так и объемные волны. В обеих задачах получены интегральные представления для компонент поля и проведен их асимптотический и численный анализ.

Среди результатов первой и второй глав самым важным представляется установленные соотношения, показывающие, что по форме импульса поверхностной волны при определенных условиях можно судить о распределении зарядов в пучке. Это дает основу для разработки методики диагностики пучков, которая может быть неразрушающей по отношению к самим пучкам.

Третья глава посвящена исследованию излучения пучка заряженных частиц, движущегося в цилиндрическом волноводе с глубоко гофрированной стенкой. Для описания гофрированной поверхности используются ЭГУ. Сначала рассматривается случай бесконечного волновода. Показывается, что излучение существует в области позади заряда и состоит из бесконечного числа симметричных волноводных мод. Анализируются компоненты электромагнитного поля заряда, проводится их численный расчет.

Далее рассматривается дифракция генерируемой зарядом поперечно магнитной моды на открытом конце цилиндрического глубоко гофрированного волновода с фланцем. Следует отметить, что задачи с открытым концом волновода относятся к числу наиболее сложных задач теории дифракции. Поле, отраженное от открытого конца волновода, представляется в виде суммы собственных волноводных мод. Дальнейшее аналитическое исследование основывается на методе Винера-Хопфа-Фока. Ищется решение соответствующего уравнения, которое затем используется для построения бесконечной системы линейных алгебраических уравнений на амплитуды отраженных мод. Данная система решается методом редукции. Для поля вне волновода строятся интегральные представления. Исследуется поведение поля в дальней зоне. Проводится его численный расчет, анализируются типичные диаграммы направленности излучения.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

В целом диссертация представляет собой законченное научное исследование. Положения, выносимые на защиту, полностью обоснованы.

Однако, к недостаткам работы можно отнести следующее:

1. Автор рассматривает модель пучка заряженных частиц в приближении постоянной скорости и неизменной плотности заряда. Такое ограничение не позволяет рассмотреть обратного влияние поля на пучок. Принятая модель существенно ограничивает класс задач, которые могут рассматриваться на ее основе. В частности, не могут рассматриваться процессы группировки пространственного заряда пучка и связанные с этим эффектом задачи усиления и генерации электромагнитного поля.

2. Автором недостаточно полно исследованы границы применимости предлагаемого метода анализа излучения пучков заряженных частиц в присутствии периодических импедансных структур. В частности, представляет практический интерес в каких границах изменения скорости частиц и частоты излучения можно пользоваться полученными результатами.

3. Рассматриваемая в диссертации система по своей сути близка к некоторым хорошо исследованным генераторам СВЧ на основе релятивистского электронного пучка. Там, где это возможно, практический и теоретический интерес представляет сравнение уже известных результатов теории и техники в области СВЧ-технологий с результатами, полученными автором.

4. Автор вводит многочисленные символы для обозначения рассматриваемых величин и параметров, которые, иногда повторяются для разных величин, что может осложнить правильное восприятие. Например, параметр гофры, диссипационные потери и пространственная ширина гауссового пучка частиц обозначены одним и тем же символом  $\sigma$ . Аналогичное замечание относится и к символу  $\delta$ .

### **Заключение**

Диссертационная работа Симакова Евгения Сергеевича «Излучение пучков заряженных частиц в присутствии проводящих гофрированных структур с малым периодом» является законченным исследованием, выполненным на высоком научном уровне. Результаты работы вносят существенный вклад в теорию излучения заряженных частиц, а также обладают ценностью для ряда приложений в экспериментальной физике и технике.

Все основные результаты диссертации представлены в 5 статьях в рецензируемых журналах, входящих в базы WoS, Scopus и РИНЦ. По результатам работы было сделано 7 докладов на международных и российских конференциях.

Диссертационная работа Симакова Евгения Сергеевича «Излучение пучков заряженных частиц в присутствии проводящих гофрированных структур с малым периодом» соответствует паспорту научной специальности 1.3.4 Радиофизика согласно номенклатуре научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени (Приказ Минобрнауки России от 24.02.2021 № 118), соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Симаков Евгений Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-

математических наук по специальности по специальности 1.3.4 Радиофизика. Нарушений пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не обнаружены.

Доклад по диссертационной работе заслушан на открытом научном семинаре Высшей школы прикладной физики и космических технологий Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Составленный отзыв рассмотрен и утвержден на заседании Академического Совета Высшей школы прикладной физики и космических технологий Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (протокол № 2 от 30.09.2024)

Отзыв составили:

д.ф.-м.н., доцент, профессор Высшей школы прикладной физики и космических технологий Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого  
Леокумович Л.Б.  
+7 812 552-96-78, leonid@spbstu.ru

к.ф.-м.н., с.н.с, доцент Высшей школы прикладной физики и космических технологий Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого  
Иванов С.И.  
+7 812 552-96-78, serg.i.ivanov@mail.ru

Почтовый адрес: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, СПбПУ, институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций.

Наименование организации: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

