

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Ростунцовой Алёны Александровны

на тему: **Нелинейные волновые процессы при усилении и генерации ультракоротких импульсов в системах электронный поток – электромагнитная волна**

по специальности 1.3.4. - Радиофизика

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Представляемая к защите работа посвящена теоретическому исследованию проблем, связанных с усилением и генерацией импульсов СВЧ-излучения.

Актуальность избранной темы связана с востребованностью генераторов ультракоротких импульсов субтерагерцового диапазона в практике радиолокации, спектроскопии, био- и медицинских исследований и необходимостью выявления фундаментальных принципов их функционирования.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации весьма высока и опирается на полноценный вывод разрешающих уравнений моделей из известных уравнений радиофизики, корректное применение аппарата математического анализа, функционального анализа и теории групп, а также применение эффективных численных методов решения систем дифференциальных уравнений.

Достоверность полученных результатов обеспечивается сравнением результатов решения задач в рамках упрощенного расчета, основанного на автомодельной гипотезе, и полноценного численного моделирования, а также сравнением с результатами аналитического решения в тех случаях, когда это возможно; сопоставлением с известными из литературы результатами.

Новизна исследования состоит в выявлении автомодельного принципа эволюции ультракоротких электромагнитных импульсов в процессе их формирования и усиления при различных вариантах взаимодействия с электронным потоком; в установлении определяющего влияния модуляционной неустойчивости для генерации последовательности импульсов при циклотронном взаимодействии невозмущенной электромагнитной волны со встречным пучком электронов.

Значимость для науки и практики полученных автором результатов состоит в нахождении новых фундаментальных закономерностей, упорядочивающих понимание особенностей взаимодействия электромагнитной волны с электронным потоком; расширении возможностей и сокращении времени проектирования и производства широкого класса усилителей импульсов СВЧ-излучения с высокими характеристиками усиления и генераторов когерентных последовательностей СВЧ-импульсов.

В первой главе автором исследуются модели взаимодействия электромагнитной волны с попутным электронным потоком, характерные для ламп бегущей волны. Выписаны одномерные уравнения движения электронов и возбуждения электромагнитной волны, вместе с граничными условиями, для двух приближений – малого изменения энергии электронов и малого изменения скорости. Для каждого из приближений найдена соответствующая автомодельная подстановка и решено автомодельное уравнение в предположении полубесконечности области взаимодействия волны с электронами. Полноценное численное решение системы уравнений для ограниченной области взаимодействия выявило его автомодельный сценарий для широкого класса начально-граничных условий, что подтверждает значимость и адекватность использования автомодельного анализа. Выполнен групповой анализ симметрий системы уравнений и показано, что комбинация пары базовых симметрий позволяет решить задачу усиления импульса с частотной модуляцией.

Замечания к первой главе.

1. Стр. 17, текст под формулой (1.1): “Когда длительность входного импульса мала по сравнению с длиной его смещения (проскальзывания) относительно частиц за характерное время развития неустойчивостей”. Вместо длительности импульса более корректно было бы говорить о его пространственной протяженности.
2. Стр. 29-30, абзац перед рис. 1.6: “Это значит, что пиковая амплитуда выходного импульса возрастает прямо пропорционально L . Однако длина реальных ЛБВ-усилителей ограничена, в частности, требованием устойчивости усиления по отношению к паразитному самовозбуждению при наличии отражений [62,63]. Ещё одним фактором, ограничивающим нарастание амплитуды импульса в реальных приборах, может быть шумовая моду-

ляция электронного пучка [26,27].” Представляется также, что при неограниченном увеличении длины L нарушаются предположения о малости изменения скорости и энергии электронов, использованные при выводе системы уравнений (1.13), (1.15) и модель перестает адекватно описывать процессы взаимодействия ЭМ волны с электронным пучком.

В второй главе автором выявляется и обосновывается автомодельный характер взаимодействия электромагнитной волны со встречным пучком электроном, реализуемый в лампах обратной волны. С помощью подхода, подробно изложенного в предыдущей главе, установлена оптимальная длина прибора, обеспечивающая насыщение амплитуды генерируемого импульса. Показано, что переход к пространственно-неоднородному распределению сопротивления связи позволяет теоретически приводит к существенному увеличению амплитуды выходного сигнала. Продемонстрировано, что принципы работы лазера на свободных электронах и лампы обратной волны схожи и также допускают автомодельный анализ.

Замечания ко второй главе.

1. Стр. 49, формула (2.6). Опечатка: вместо “ I ” следует писать “ L ”.
2. Стр. 49, (2.6), стр. 50, рис. 2.2. Известно, что при численном решении классических солитонных уравнений, в частности, КдВ, форма распространяющегося импульса тем быстрее приближается к форме аналитического солитонного решения, чем ближе к ней оказывается форма начального возмущения. Сечение трехмерного графика численного решения $|F|(\xi, \tau)$, показанного на рис. 2.2а, при фиксированном $\tau = 1..1.5$ есть околонулевая функция ξ почти на всем диапазоне $\xi \in [1, 20]$ с небольшим положительным “всплеском” в конце диапазона. График функции (2.6), определяющей граничное условие $F(\xi, \tau = 0)$, напротив, отличен от нуля и постоянен почти для всех ξ , с плавным спадом в конце диапазона. Автор отмечает, что выход на автомодельную асимптотику происходит независимо от формы начального возмущения. Тем не менее, не совсем понятно, с чем связан выбор вида функции (2.6). Если (2.6) обязано удовлетворять нулевому граничному условию (2.5), то почему этому условию не удовлетворяет график решения 2.2а, на котором видны значительные колебания амплитуды поля F при $\xi = 20$?
3. Стр. 61, рис. 2.12. Цитата: “Как видно, наличие участка с неоднородным продольным профилем сопротивления связи приводит к увеличению пиковой амплитуды выходного импульса практически в два раза.” Такое сравнение ЛОВ с профилированным сопротивлением связи и однородной ЛОВ той же длины не совсем корректно. Судя по осциллограмме (рис. 2.12), в однородной ЛОВ возникает эффект насыщения амплитуды лидирующего импульса из-за формирования и развития вторичного импульса, причем амплитуда вторичного импульса составляет 80-85% от амплитуды импульса в неоднородной ЛОВ, однако наличие этого мощного вторичного импульса игнорируется в дальнейшем анализе.
4. Стр. 74, абзац 3 Выводов к Главе 2. Фраза “При $L > L_c$ эти характеристики перестают меняться, т.е. процесс автомодельного распространения импульса в системе перестает зависеть от её длины (за исключением начальной переходной стадии)” звучит несколько некорректно – отсутствие зависимости от длины означает распространение импульса уже не по автомодельному сценарию.

В третьей главе автором изучаются вопросы генерации последовательности импульсов при взаимодействии невозмущенного электронного потока со встречной электромагнитной волной в условиях циклотронного резонанса. Показано, что в области непропускания, соответствующей сигналу малой амплитуды, при увеличении амплитуды сигнала возникает зона абсолютной модуляционной неустойчивости, приводящая к разбиению волны на последовательность волновых пакетов. Найдены точные аналитические решения разрешающего обыкновенного дифференциального уравнения, выражающиеся через эллиптические функции Якоби и представляющие семейства светлых и темных солитонов. Границы между областями абсолютной и конвективной неустойчивости определены двумя независимыми методами – при помощи нелинейного уравнения Шредингера и методом перевала. Проведено численное решение задачи в двух вариантах – при помощи усредненных уравнений, аналогичное предыдущим главам, и на основе прямого решения уравнений Максвелла в трехмерной постановке методом “частиц в ячейке”.

Замечания к третьей главе отсутствуют.

Несмотря на высказанные замечания, диссертация Ростунцовой Алёны Александровны является вполне завершённой научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для теории СВЧ-приборов. Диссертация хорошо структурирована, написана грамматически ясным и математически строгим языком, результаты расчетов сопровождаются качественными иллюстрациями. Автор продемонстрировал глубокие знания физических процессов электрон-электромагнитных взаимодействий и высокий уровень владения математическим аппаратом.

Диссертационная работа Ростунцовой Алёны Александровны на тему «Нелинейные волновые процессы при усилении и генерации ультракоротких импульсов в системах электронного потока – электромагнитная волна» соответствует паспорту специальности 1.3.4. – Радиофизика и отвечает требованиям пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук.

Считаю, что автор диссертационной работы Ростунцова Алёна Александровна полностью заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика.

Официальный оппонент,
Д. ф.-м. н. (05.13.18 - Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ), доцент,
профессор кафедры «Прикладная математика и системный анализ» СГТУ имени Гагарина Ю.А.,
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
Тел. +7-927-623-13-23
Адрес электронной почты ab2009sar@list.ru


(подпись) /Бочкарев Андрей Владимирович/
(расшифровка подписи)

29 сентября 2025 г.

Подпись Бочкарева А.В. заверяю:
Ученый секретарь Ученого совета
СГТУ имени Гагарина Ю.А.




/А.В. Потапова/