

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

**Основные линейные и нелинейные феномены в распределенных системах
«два взаимодействующих электронных потока» и «два
взаимодействующих электронных потока – электромагнитное поле»**

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)

аспиранта 4 курса

направления 03.06.01 «Физика и астрономия»

факультета нелинейных процессов

Волощука Сергея Сергеевича

Научный руководитель

Член-корреспондент РАН,

д.ф.-м.н., профессор

_____ Д.И. Трубецков

Саратов 2017

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Важные вопросы СВЧ электроники – это вопросы генерации и усиления СВЧ сигнала. Генерация, либо усиление, возможны в системе только в присутствии явления неустойчивости. Неустойчивость в широком смысле – это возможность существования нарастания малого отклонения от равновесия в системе. В теории динамических систем существует большое количество примеров неустойчивых систем, в том числе давно известный пример неустойчивости – двухпоточковая неустойчивость. Двухпоточковая неустойчивость может возникать в системе двух движущихся с разной скоростью потоков заряженных частиц, которые взаимодействуют друг с другом. На основе этого явления были предложены различные схемы двухлучевых приборов, в том числе электронно-волновая лампа (ЭВЛ). Основное преимущество двухлучевых приборов – отсутствие в области взаимодействия замедляющей системы, что потенциально может означать отсутствие ограничения максимальной рабочей частоты из-за трудностей изготовления замедляющей системы малых размеров. В последнее время стал расти интерес к двухлучевым приборам именно с целью увеличения рабочих частот.

Цель работы

Целью работы является поиск новых режимов работы в системе «два взаимодействующих электронных потока» и «два взаимодействующих электронных потока – электромагнитная волна». Особый интерес представляет анализ области интерференции, ранее не исследованной. Для достижения данной цели были написаны программы для ЭВМ, реализующие эти системы несколькими методами: гидродинамическим, методом частиц в ячейках и методом крупных частиц.

Научная новизна

Рассмотрена возможность работы электронно-волновой лампы в интерференционном режиме, ранее не исследованная для попутных потоков. Созданы и частично протестированы две новых компьютерных программы для исследования нелинейных и нестационарных явлений в ЭВЛ и двухлучевой ЛБВ

Методология и методы исследования

В настоящей работе проведено моделирование ЭВЛ несколькими способами: с помощью гидродинамической модели, методом крупных частиц и методом частиц в ячейках. Были рассмотрены случаи попутных и встречных потоков. Для каждой модели были реализованы и протестированы программы для ЭВМ: для двух из них были рассмотрены случаи встречных и попутных потоков.

Модель ЭВЛ, построенную методом крупных частиц, удалось модернизировать для моделирования двухлучевой ЛОВ. Из-за особенностей построения этих моделей их удалось скомбинировать в модель ЭВЛ с входной и выходной секцией в виде отрезка замедляющей системы.

Апробация работы

Частично работа была доложена на конференциях: "Нелинейные дни в Саратове для молодых – 2015" Саратов, 24 – 26 ноября 2015г., 11-я международная школа-конференция «Хаотические Автоколебания и Образование Структур» (ХАОС – 2016) Саратов, 3 – 8 октября 2016г., принят доклад на XVI Всероссийскую школу-семинар «Физика и применение микроволн» имени А.П. Сухорукова (Нелинейные волны 2017) Москва, 4–9 июня 2017.

Работа велась при поддержке грантов: РФФИ 13-02-01209А, РФФИ 16-02-00238А, РФФИ 16-32-00468 МОЛ_А.

Публикации по теме работы

В ходе работы опубликованы 4 статьи: 3 в журнале из перечня ВАК, одна статья в тезисах докладов конференции.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** сформулирована актуальность выбранной темы, приведено описание устройства электронно-волновой лампы и физический механизм ее работы.

Схема ЭВЛ приведена на рисунке 1. На входе лампы с помощью электронных пушек K_1 и K_2 создается два электронных потока с различными скоростями, один из потоков модулируется по скорости с помощью входного устройства. Потоки поступают в пространство дрейфа, в котором происходит их взаимодействие. В конце лампы расположено выходное устройство, с которого снимается усиленный сигнал, а отработанные потоки оседают на коллекторе K . Входное и выходное устройства могут быть как волноведущими структурами, например, отрезками спирали, так и резонаторами. Технологически основная сложность заключается в создании двух электронных потоков с мало отличающимися скоростями, при этом для лучшего взаимодействия, потоки должны быть близко расположены или даже перемешаны.

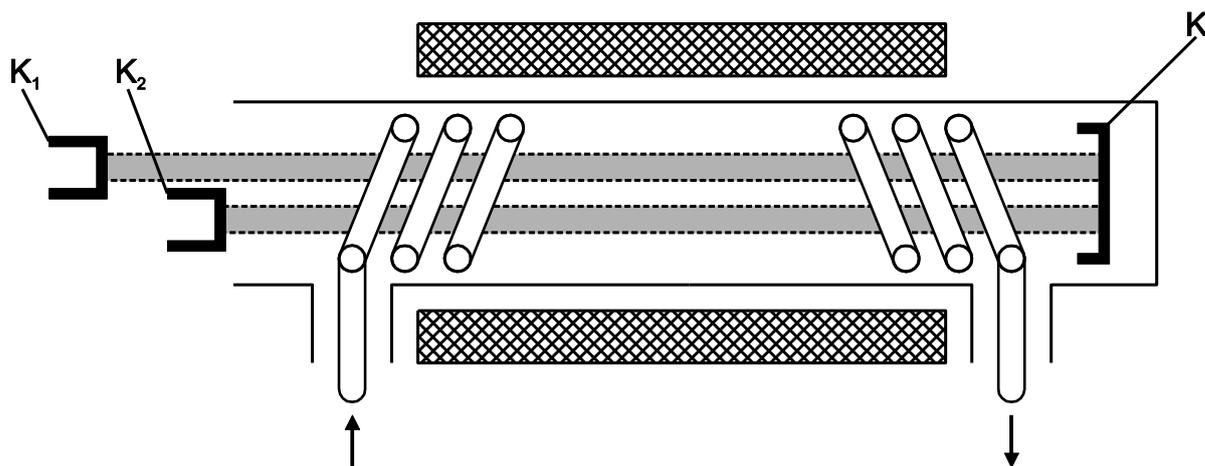


Рисунок 1. Схема электронно-волновой лампы с попутными пучками.

Как отмечалось во многих работах, физические процессы в ЭВЛ и ЛБВ очень похожи. Поясним это подробнее: пусть в пространство дрейфа вводятся два пучка с близкими средними скоростями. Будем считать их полностью перемешанными и плазменные частоты одинаковыми для обоих пучков. Один

из пучков модулирован по скорости. Двигаясь в пространстве дрейфа, модулированный пучок будет группироваться и электронные сгустки будут уплотняться с расстоянием.

С появлением электронных сгустков в модулированном пучке силы пространственного заряда будут вызывать появление сгустков во втором, немодулированном пучке. Так как потоки движутся с разной скоростью, электронные сгустки одного потока будут обгонять электронные сгустки другого потока, при этом «быстрые» сгустки будут тормозиться, а «медленные» ускоряться. По мере уплотнения сгустков поле пространственного заряда будет возрастать. Таким образом, электроны в быстром потоке отдают свою кинетическую энергию полю кулоновских сил, увеличивая плотность сгустков в медленном потоке. Можно сказать, что для одного электронного потока поле другого потока представляется как высокочастотное поле в ЛБВ.

В *первой главе* работы проведен краткий обзор литературы, касающейся вопросов двухлучевой неустойчивости. В главе рассматриваются как первые работы, посвященные двухлучевой неустойчивости, так и современные работы, в которых взаимодействие электронных потоков используется для создания приборов терагерцового диапазона частот.

Из рассмотренных работ можно сделать вывод, что первые работы, посвященные двухлучевой неустойчивости, послужили толчком для ряда исследований, однако из-за того, что двухлучевые приборы не обладали значительными преимуществами перед более простыми в изготовлении однолучевыми приборами, к концу XX века интерес к этой теме угас. Несмотря на это, движение в электронике СВЧ к все большим частотам породило новую волну исследований явления двухлучевой неустойчивости и создание новых приборов, основанных на этом явлении.

Во *второй главе* приведена гидродинамическая теория двухлучевого взаимодействия. Представлен подробный вывод уравнений гидродинамической теории, которые в последствии решались численно.

В гидродинамической модели электронный поток заменяется «электронной жидкостью»: вместо отдельных частиц рассматриваются макроскопические параметры электронного потока – скорость и заряд. С помощью такой модели невозможно учесть обгон частиц или разворот отдельных электронов, однако гидродинамическое представление вполне допустимо для усилителей с малыми амплитудами входных сигналов.

Был рассмотрен случай попутных потоков, движущихся с различными скоростями и встречных потоков, движущихся с одинаковыми скоростями навстречу друг другу. Был рассмотрен случай начальной модуляции по току и по скорости.

Для ЭВЛ можно выделить две характерных области изменения волнового числа. В первой существует одна волна с экспоненциально возрастающей амплитудой, одна с экспоненциально убывающей амплитудой и две волны с постоянной амплитудой. Во второй области возможно существование четырех волн с постоянной амплитудой. Первую область будем называть областью неустойчивости, вторую – областью интерференции.

Пример решения гидродинамических уравнений для попутных потоков приведен на рисунке 2, на котором показаны зависимости безразмерной амплитуды плотности тока немодулированного пучка при нескольких параметрах w – отношения частоты модулирующего сигнала к плазменной частоте.

Из рисунка видно, что в области неустойчивости действительно преобладает экспоненциально нарастающая волна ($w = 10$), в области интерференции форма распределения начинает меняться ($w = 15, 20$) и при больших значениях параметра ($w = 30, 40$) становятся отчетливо заметны биения.

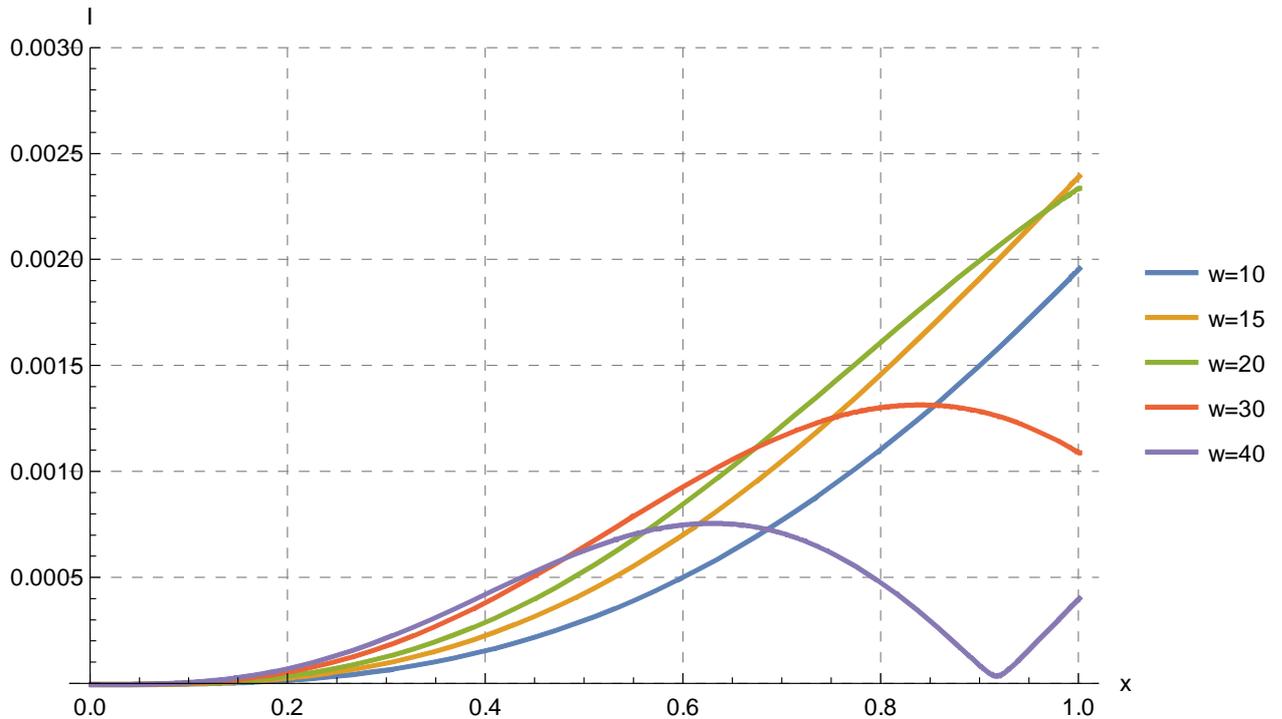


Рисунок 2. Зависимость амплитуды плотности тока немодулированного пучка для нескольких параметров w .

Из рисунка 2 видно, что можно подобрать такие параметры в интерференционном режиме ($w = 15, 20$), при которых амплитуда плотности тока превышает амплитуду плотности тока в режиме неустойчивости, что говорит о том, что при некоторых параметрах усиление в интерференционном режиме может оказаться больше, чем в режиме неустойчивости.

В этой главе были частично повторены известные результаты, было показано, что и в случае встречных потоков, и в случае попутных существует область параметров двухлучевого усилителя, в которой существует нарастающая волна. Было показано, что для случая попутных потоков на некоторой длине возможно получить большее усиление в области интерференции, чем области неустойчивости. Ранее этот режим не исследовался.

В *третьей главе* была построена нелинейная нестационарная модель ЭВЛ методом частиц в ячейках. Ранее нестационарная модель отсутствовала.

Метод частиц в ячейках давно известен и успешно применяется для решения задач в вакуумной электронике. Большим преимуществом этого

подхода является независимость метода решения от направления движения электронов: без всяких дополнительных методик возможно учитывать обгон электронов, их разворот или встречное движение пучков.

Недостатком метода можно назвать то, что для определения амплитуды гармоник тока в пучке необходимо применять преобразование Фурье, причем необходимо брать продолжительные временные реализации, из-за чего возможны большие ошибки для определения быстрых изменений. Кроме этого, из-за конечного числа частиц возможно появление эффектов, связанных с дискретностью модели, а не с реальными физическими процессами, протекающими в системе.

На основе построенной нелинейной модели была написана программа для расчетов ЭВЛ. Благодаря выбранному методу, вычисления можно проводить как для случая попутных, так и встречных электронных потоков. В качестве переменных выбраны координата и скорость крупной частицы. Таким образом, не возникает проблем с учетом разворота электронов. Значительное время при расчете занимает процедура разложения плотности тока в спектр, так как ее приходится повторять для каждого узла координатной сетки. Разложение в спектр необходимо для получения распределения амплитуд гармоник плотности тока.

В построенной модели не учитывалось влияние поля замедляющей системы, так как в рамках выбранного подхода это затруднительно: для того чтобы получить поле в замедляющей системе, возбуждаемое электронным пучком, необходимо выделить первую гармонику плотности тока, но для этого необходимо знать временную реализацию значительной продолжительности, которую возможно получить только в отсутствии учета замедляющей системы. Можно вычислять поле реже, чем изменения координат и скоростей крупных частиц, но точность такого подхода вызывает сомнения.

Было проведено сравнение построенной модели с линейной моделью, которое показало хорошее соответствие между ними для малых амплитуд входного сигнала. При больших амплитудах входного сигнала или большом

пространстве взаимодействия соответствие между моделями пропадает, это происходит при обгоне одних крупных частиц другими.

В *четвертой главе* была построена нелинейная нестационарная теория ЭВЛ и двухлучевой ЛБВ методом крупных частиц. Этот метод применяется как для построения нелинейной стационарной теории лампы бегущей волны, нелинейной нестационарной теории ЛОВ, так и для стационарной модели электронно-волновой лампы.

В отличие от метода частиц в ячейках, в качестве независимых переменных выбираются координата электрона x и время влета электрона в пространство взаимодействия t_0 – переменные Лагранжа. После некоторых преобразований уравнения движения происходит переход от переменной t_0 к безразмерной фазе частицы. Такой переход удобен при рассмотрении приборов с замедляющей системой, в которых можно говорить о фазе электрона относительно электромагнитного поля в замедляющей системе. Из-за особенностей модели были рассмотрены только попутные пучки.

На рисунке 3 приведены результаты вычислений для области неустойчивости, а на рисунке 4 для области интерференции. Прямое сравнение с линейной моделью ЭВЛ, описанной в главе 2 или с нелинейной моделью, описанной в главе 3, затруднительно из-за использования разных независимых переменных, и как следствие, способов введения безразмерных величин, поэтому трудно назвать параметры, соответствующие границе между областью неустойчивости и областью интерференции. Однако, из нормировки легко видеть, что увеличению параметра w линейной модели соответствует увеличение длины пространства взаимодействия L в текущих переменных. Поэтому область параметров L , при которых происходит постоянное увеличение тока, как и в линейной модели, будем называть областью неустойчивости, а область в которой начинаются биения – областью интерференции.

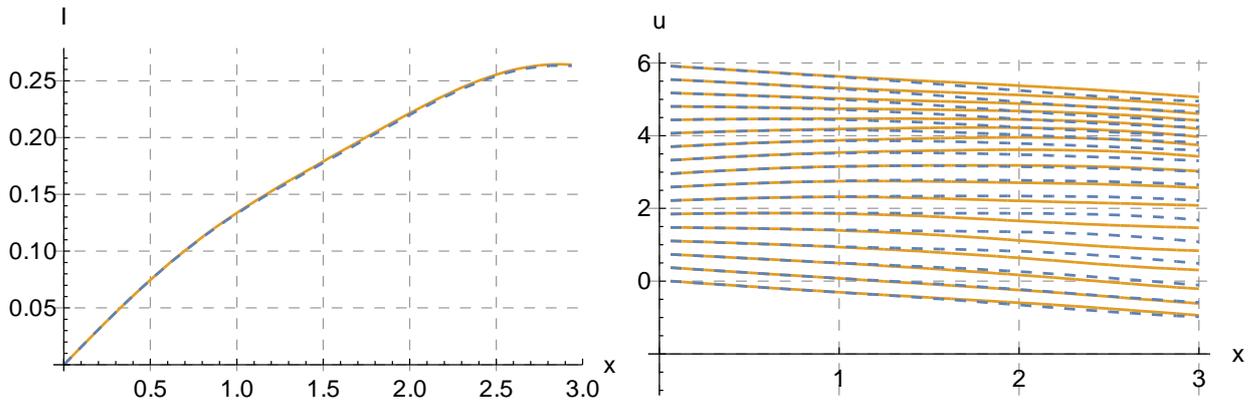


Рисунок 3. Область неустойчивости.

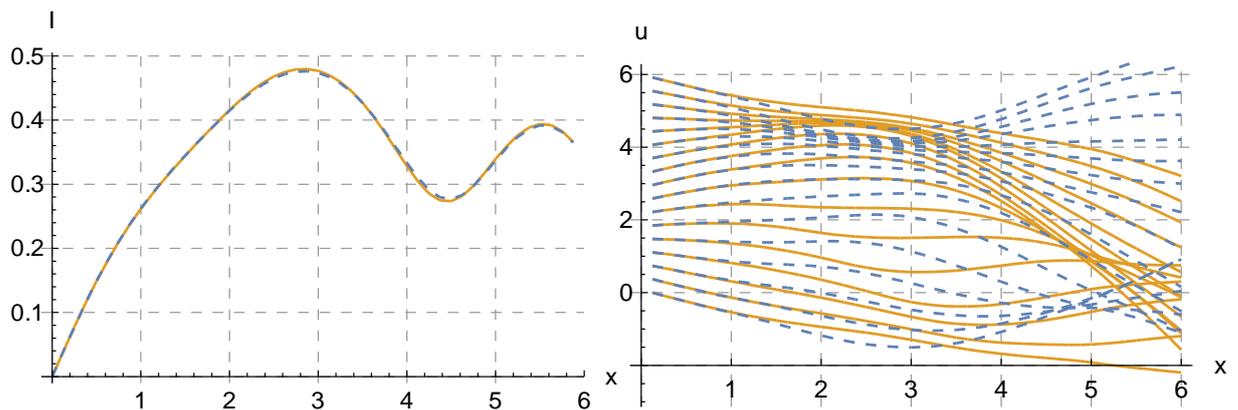


Рисунок 4. Область интерференции.

На рисунках 3 и 4 показаны зависимости распределения тока и фазы электронов в пространстве взаимодействия. Сплошная линия относится к более быстрому пучку, пунктирная к более медленному. Из рисунков видно, что больший ток достигается в точке наибольшего скопления электронов. С точки зрения изменения фаз электронов, область интерференции отличается от области неустойчивости тем, что в области интерференции сформировавшийся «электронный сгусток» начинает разлетаться, а траектории электронов пересекаться.

В этой главе изложены результаты построенной нелинейной нестационарной теории электронно-волновой лампы, в том числе с учетом замедляющей системы. С помощью линеаризации полученных нелинейных уравнений и расчетов для различных параметров рассинхронизма b , косвенно была произведена предварительная проверка полученных результатов.

Для рассмотренных параметров временные характеристики не демонстрируют какой-либо интересной динамики и приходят в стационарное состояние практически сразу после «прилета» крупных частиц в соответствующую точку вычислительной сетки. На рисунке 5 приведено распределение поля в замедляющей системе двухлучевой ЛБВ для области неустойчивости и области интерференции.

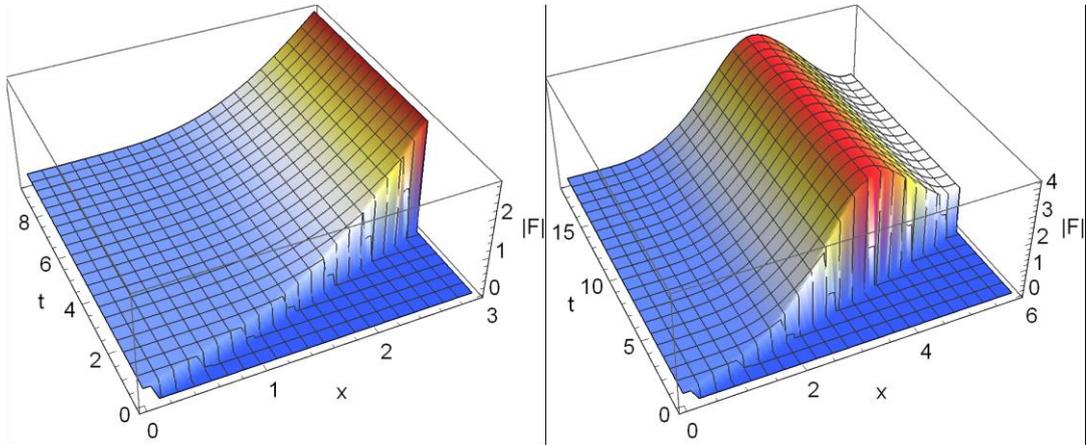


Рисунок 5. Зависимость распределения поля электромагнитной волны в замедляющей системе от координаты и времени.

На рисунке хорошо виден треугольник в плоскости (x, t) с нулевым полем, в котором еще нет крупных частиц и оставшаяся часть области (x, t) со стационарным распределением поля $|F|$.

Была показана возможность с помощью комбинирования участков ЭВЛБВ и ЭВЛ получить модель электронно-волновой лампы с выходными устройствами в виде отрезков спирали. Это достигалось «выключением» уравнения возбуждения на среднем участке пространства дрейфа, таким образом, на концах прибора двухлучевые ЛБВ моделировала входное и выходное устройство, в центре ЭВЛ моделировала область дрейфа.

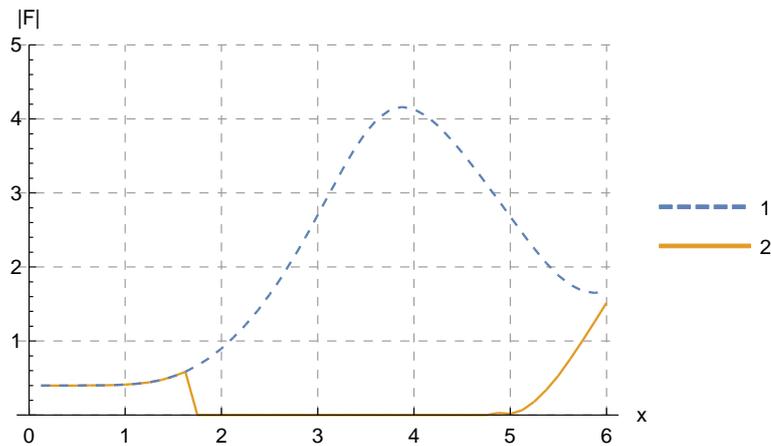


Рисунок 6. Распределение поля в замедляющей системе для ЭВЛ (2) с входным и выходным устройством и двухлучевой ЛБВ (1).

На рисунке 6 приведены зависимости распределения поля в замедляющей системе двухлучевой ЛБВ в сравнении с ЭВЛ такой же длины с входным и выходным устройством в виде коротких секций двухлучевой ЛБВ. Видно, что в двухлучевой ЛБВ усиление гораздо больше, чем в ЭВЛ.

Построенная нелинейная нестационарная модель двухлучевой ЛБВ без учета замедляющей системы демонстрирует близкое поведение в сравнении с известной стационарной нелинейной теорией ЭВЛ, что говорит о корректности построенной модели. При анализе построенной модели двухлучевой ЛБВ нестационарные эффекты модели проявлялись слабо, видимо это связано с тем что ЛБВ является усилителем.

В **Заключении** кратко сформулированы основные результаты работы: было построено несколько моделей ЭВЛ и написаны по ним программы для расчетов на ЭВМ: в рамках линейной теории, методом частиц в ячейках и методом крупных частиц. Был рассмотрен случай встречных и попутных пучков.

Были рассмотрены режимы усиления в области неустойчивости и в области интерференции. Было показано, что в области интерференции при некоторых параметрах возможно добиться большего усиления, чем в области неустойчивости.

Работу нельзя считать законченной, так как отсутствуют расчеты для конкретных устройств. Результаты расчетов для нестационарной ЭВЛБВ

малоинформативны, так как не было получено заметных переходных процессов. Переходные процессы должны наблюдаться в нестационарной модели ЭВЛОВ, которая не была исследована.

Список опубликованных работ по теме работы

1. Васильев А.А, Волощук С.С. О влиянии отражений и затухания в ЛОВ на величину первого резонансного пика амплитуды выходного сигнала на начальном этапе переходного процесса // Прикладная нелинейная динамика, 2010, т.18, №3, с. 178.
2. Волощук С.С. Нелинейная модель взаимодействия двух электронных потоков и ее тестирование // Прикладная нелинейная динамика, 2015. № 3, с. 38.
3. Волощук С.С. К нелинейной нестационарной теории двухлучевой лампы бегущей волны и электронно-волновой лампы: основные уравнения и некоторые результаты расчетов // Прикладная нелинейная динамика, 2016. Т. 24, № 5, с. 62–71.