

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики открытых систем

**Анализ нелинейного эффекта срыва Компфнера в приближении двух
мод**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 4041 группы
направления (специальности) 09.03.02 «Информационные системы и
технологии
института физики
Путкарадзе Михаила Давидовича

Научный руководитель

_____ А.В. Титов

подпись, дата

Заведующий кафедрой
физики открытых систем,

д.ф.-м.н., профессор

_____ А.А. Короновский

подпись, дата

Саратов 2024 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.....	4
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	8

ВВЕДЕНИЕ

В современной радиоэлектронике и телекоммуникационных системах высокочастотные устройства занимают ключевое место, обеспечивая передачу и обработку сигналов с высокой точностью и скоростью. Одним из важных компонентов таких систем являются лампы бегущей волны (ЛБВ), которые широко используются в качестве усилителей в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ). ЛБВ обеспечивают высокую линейность, широкий диапазон частот и значительную мощность усиления, что делает их незаменимыми в различных приложениях, включая радары, спутниковую связь и научные исследования.

Работа ламп бегущей волны (ЛБВ) в режиме усиления сверхвысокочастотного (СВЧ) сигнала обычно происходит при положительных значениях параметра несинхронности. В таких условиях скорость электронов немного превышает фазовую скорость электромагнитной волны, что способствует формированию сгустков электронов в зонах замедления фаз поля. Это взаимодействие приводит к передаче энергии от потока электронов к бегущей электромагнитной волне, усиливая её.

Однако при определенных условиях, когда ток пучка и ускоряющее напряжение изменяются таким образом, что скорость электронов становится немного меньше фазовой скорости электромагнитной волны, возникают иные эффекты. В этом случае при отрицательных значениях параметра несинхронности электроны попадают в области ускоряющих фаз поля, что приводит к расходу энергии электромагнитной волны на их ускорение. В результате ЛБВ переходит из режима усиления в режим подавления СВЧ сигнала. Такие условия называются условиями срыва Компфнера (Kompfner dip condition).

Рудольф Компфнер и Джозеф Хаттон провели эксперименты и разработали теоретические объяснения явления полного подавления сигнала

в ЛБВ, которое происходит при определенных значениях тока и потенциала пучка.

Современные исследования активно изучают использование эффекта срыва Компфнера. Например, в одном из недавних исследований обсуждается пассивная синхронизация мод и генерация ультракоротких импульсов с использованием ЛБВ-подавителя в режиме срыва Компфнера. В статье подробно описан лабораторный макет гибридного генератора многосолитонных комплексов, который включает в себя ЛБВ-подавитель, действующий как насыщающийся поглотитель в режиме срыва Компфнера.

Целью данной выпускной квалификационной работы является всестороннее изучение нелинейного эффекта срыва Компфнера и численное решение соответствующего уравнения с использованием проприетарной системы компьютерной алгебры Wolfram Mathematica.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе данной работы подробно рассмотрены основные принципы работы ламп бегущей волны (ЛБВ) и эффект срыва Компфнера.

Вначале главы изложены теоретические основы функционирования ЛБВ. ЛБВ представляют собой устройства, в которых электронный пучок взаимодействует с электромагнитной волной, бегущей по замедляющей системе. Этот процесс приводит к усилению сигнала за счет передачи энергии от электронов к волне. Были рассмотрены ключевые параметры, такие как скорость электронов, фазовая скорость волны, и параметр несинхронности, которые играют решающую роль в работе ЛБВ.

Далее в главе особое внимание уделено эффекту срыва Компфнера. Описаны условия, при которых происходит этот эффект, а именно, когда скорость электронов становится немного меньше фазовой скорости электромагнитной волны. В результате этого взаимодействия энергия волны расходуется на ускорение электронов, что приводит к подавлению СВЧ сигнала. Разобраны экспериментальные и теоретические аспекты,

касающиеся исследования этого эффекта, включая работы Рудольфа Компфнера и Джозефа Хаттона.

Актуальность данной работы обусловлена значительной ролью ламп бегущей волны (ЛБВ) в современной радиоэлектронике и телекоммуникационных системах. С развитием технологий связи, радарных систем и других высокочастотных приложений, необходимость в высокоэффективных усилителях СВЧ сигналов становится все более очевидной. ЛБВ, обладающие способностью обеспечивать высокую линейность, широкий диапазон частот и значительную мощность усиления, являются незаменимыми компонентами этих систем.

Исследование нелинейного эффекта срыва Компфнера имеет особую актуальность, так как этот эффект существенно влияет на работу ЛБВ, в том числе на их стабильность и эффективность в различных режимах. Понимание и управление этим эффектом позволяет оптимизировать работу ЛБВ, минимизировать потери и улучшить качество передачи сигнала.

Уравнения, представленные в данной главе, описывающие взаимодействие электронного потока с бегущей электромагнитной волной, учитывают следующие нелинейные эффекты:

1. Изменение средней скорости электронов при взаимодействии с полем бегущей волны.
2. Обгон одних электронов другими, что приводит к группировке электронного потока, формированию сгустков, их деформации и разрушению.

Основой этой нелинейной теории взаимодействия является волновой метод, разработанный В.А. Солнцевым. Предполагается, что электронный поток, предварительно промодулированный входным сигналом, входит в пространство взаимодействия.

Суть волнового метода Солнцева заключается в следующем: время вводится в Лагранжевой системе координат. В переменных Лагранжа время является функцией двух переменных $t(x, t_0)$ – это время, когда электроны

потока, попавшие в пространство взаимодействия в момент t_0 , окажутся в точке с координатой x .

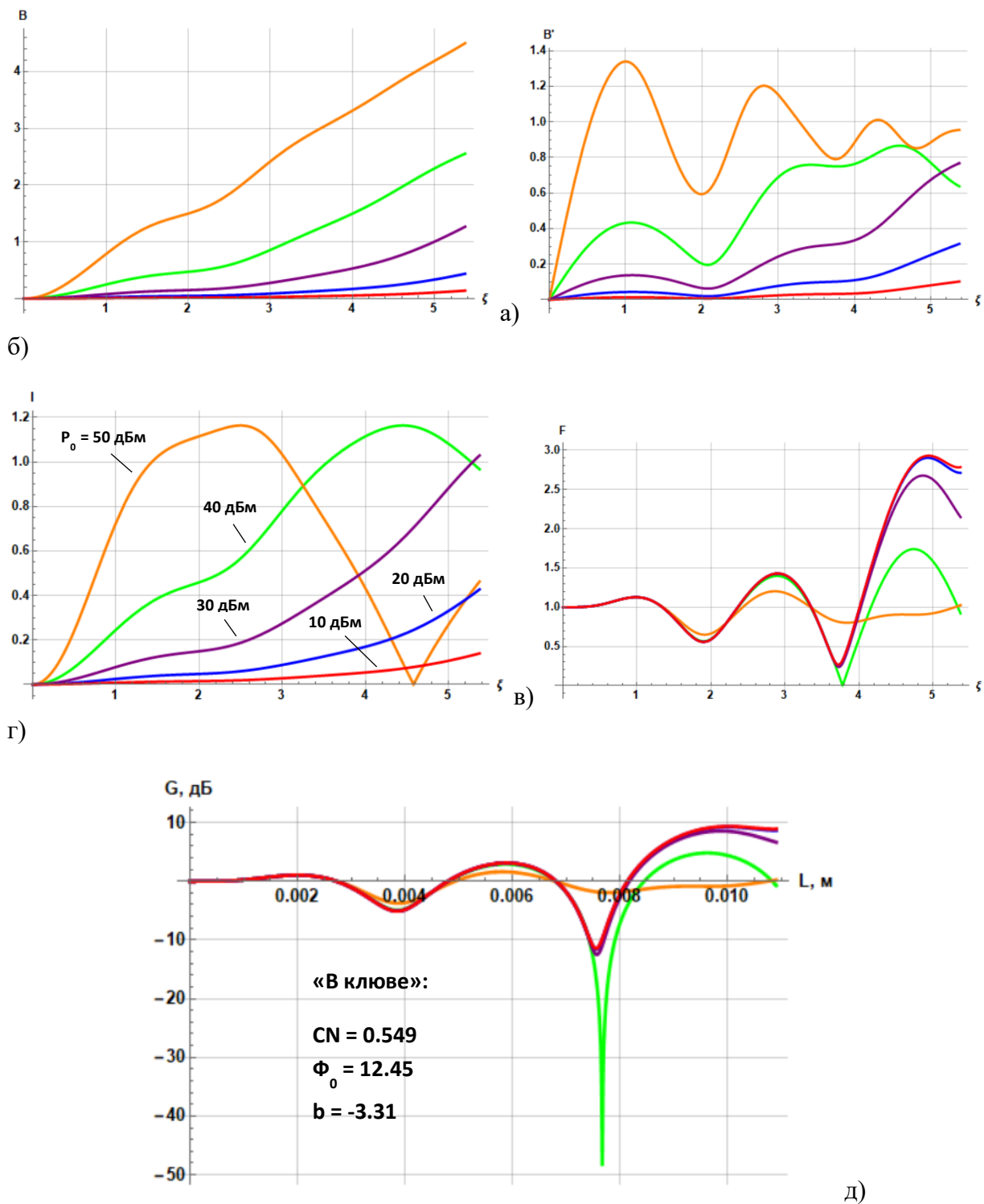


Рис.1. а) модуляция электронов по току; б) модуляция электронов по скорости; в) и г) распределение тока пучка I и поля F в пространстве взаимодействия L . Параметры системы: $F = 220$ ГГц, $U_0 = 13.5$ кВ, $I_0 = 114$ мА, $R_{св} = 7$ Ом

В ходе проведенного исследования во второй главе были получены графики, иллюстрирующие различные аспекты взаимодействия электронного потока с бегущей электромагнитной волной. Эти графики наглядно демонстрируют влияние ключевых параметров на работу ламп бегущей волны (ЛБВ) и проявление нелинейного эффекта срыва Компфнера.

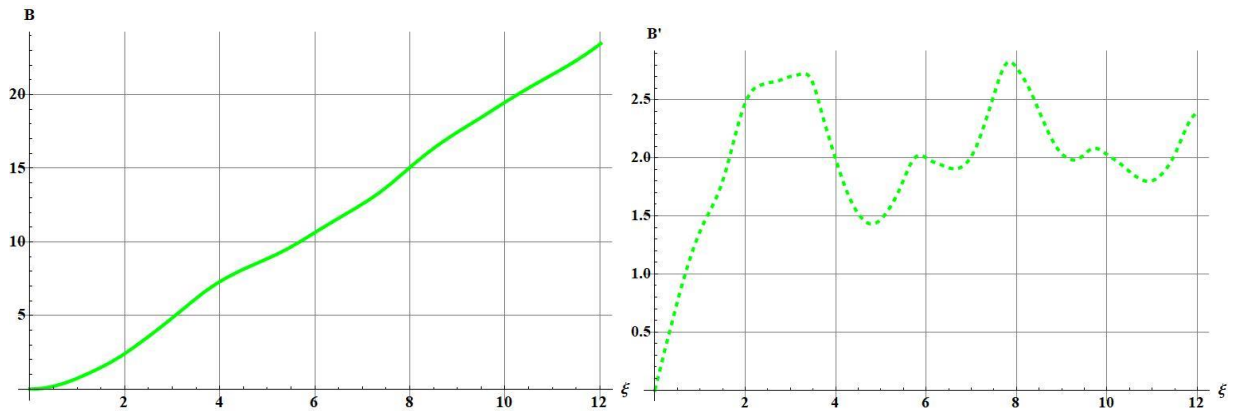


Рис.2. Слева модуляция электронов по току; справа модуляция электронов по скорости; Параметры системы: $F = 3000$ МГц, $U_0 = 700$ В, $I_0 = 60$ μ А, $R_{св} = 7$ Ом.

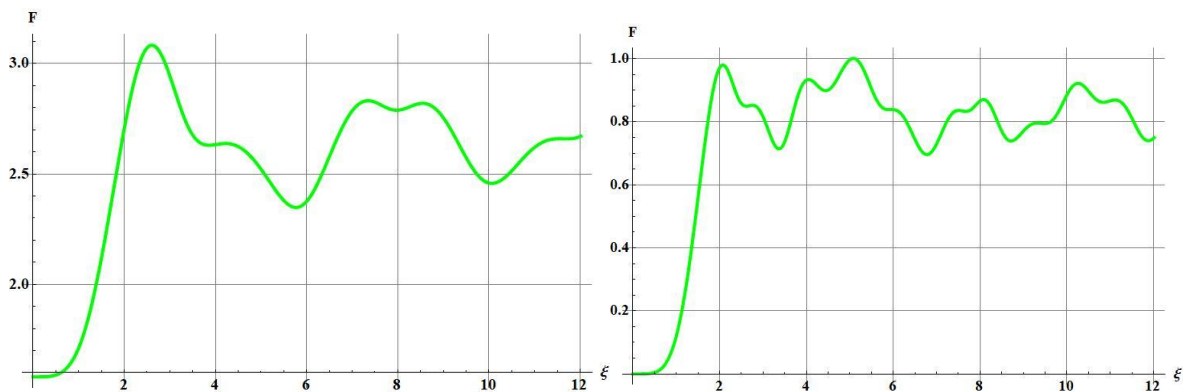


Рис.3. Слева: Распределение амплитуды первой гармоники поля; справа: распределение амплитуды второй гармоники поля; Параметры системы: $F = 3000$ МГц, $U_0 = 700$ В, $I_0 = 60$ μ А, $R_{св} = 7$ Ом.

В этой главе была изучена нелинейная теория взаимодействия электронного потока с электромагнитным полем в контексте нелинейного эффекта подавления Компфнера.

Научная новизна данной работы заключается в комплексном исследовании и анализе нелинейного эффекта срыва Компфнера в лампах

бегущей волны (ЛБВ) с использованием современных методов численного моделирования. Впервые проведено всестороннее исследование данного эффекта с учетом нелинейных взаимодействий электронного потока и бегущей электромагнитной волны, что позволило получить новые данные о механизмах работы ЛБВ в различных режимах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной дипломной работе исследованы режимы подавления Компфнера с использованием приближенной нелинейной теории взаимодействия электронного потока с бегущей электромагнитной волной. В результате проведенных исследований были построены графики зависимостей амплитуды переменной составляющей сгруппированного тока пучка от безразмерной координаты, а также распределение амплитуды продольной компоненты электрического поля бегущей волны вдоль пространства взаимодействия для различных значений входной мощности.

Анализ режимов работы лампы бегущей волны (ЛБВ) выполнен на основе полуаналитической нелинейной теории. Были построены зависимости коэффициента усиления от длины пространства взаимодействия как для режима усиления, так и для режима подавления. Нелинейная модель подтвердила свою корректность в контексте типовой задачи усиления в системе «электронный поток – бегущая электромагнитная волна».

Одним из ключевых выводов исследования является обнаружение оптимального значения мощности входного сигнала в режиме нелинейного подавления, при котором достигается максимальное подавление сигнала. Этот вывод имеет важное значение для разработки и оптимизации устройств, использующих эффект Компфнера, и может значительно улучшить их рабочие характеристики.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гришин С.В., Дмитриев Б.С., Разуваев Ф.П., Скороходов В.Н., Титов В.Н., Трубецков Д.И.// Нелинейное подавление сигналов в лампе бегущей волны. Журнал технической физики, т. 91, вып. 11 (2021).