

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

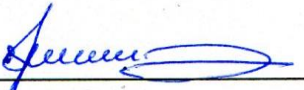
Кафедра электроники, колебаний и волн

Пассивная синхронизация мод и генерация импульсов в кольцевом генераторе с ЛБВ-подавителем, работающем в режиме нелинейного срыва Компфнера

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 2 курса 2231 группы
направления 03.04.03 «Радиофизика»
Института Физики
Бизяева Кирилла Алексеевича

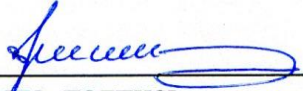
Научный руководитель
Зав. кафедрой ЭКиВ,
к.ф.-м.н., доцент



дата, подпись
04.06.2026г.

С.В. Гришин

Заведующий кафедрой
электроники, колебаний и волн.
к.ф.-м.н., доцент



дата, подпись
04.06.2026г.

С.В. Гришин

Саратов 2026 год

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ	4
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	20
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	21

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы обусловлена бурным развитием радиоэлектронной промышленности и необходимостью оптимизации способов передачи информации. Использование систем, способных генерировать короткие и ультракороткие импульсы (КИ и УКИ), позволит усовершенствовать многоканальные системы передачи информации и улучшить их энергоэффективность.

Цель работы: численное моделирование режимов генерации КИ (радиоимпульсов наносекундной длительности) в кольцевом автогенераторе, состоящем из двух промышленно выпускаемых ламп бегущей волны (далее – ЛБВ), одна из которых работает в режиме линейного усиления, а другая – в режиме нелинейного срыва Компфнера (нелинейный подавитель).

Задачи. В ходе этой работы:

- проведен обзор статей по теме работы;
- проведен расчет расчеты амплитудно-частотных и мощностных характеристик ЛБВ-усилителя и ЛБВ-подавителя вне автоколебательной системы;
- построена модель кольцевой автоколебательной системы, состоящей из двух ЛБВ, и проведен расчет режимов генерации;
- построены спектры мощности генерируемого СВЧ-сигнала и установлен режим пассивной синхронизации мод.

Методы и подходы. Для моделирования использовалась нестационарная нелинейная модель Манькина-Школьниковой, описывающая работу ЛБВ при прохождении через нее СВЧ-сигнала (несущей) в широкой полосе частот, а также, для определения движения заряженных частиц, метод частиц в ячейке.

Работа состоит из следующих частей:

I. Обзор статей.

II. Метод расчета ЛБВ в рамках нестационарной нелинейной теории.

– Метод Манькина-Школьникова для расчета СВЧ-полей в рамках нестационарной нелинейной теории ЛБВ.

– Расчет параметров и коэффициентов для реализации метода Манькина-Школьникова и моделирования ЛБВ в рамках нестационарной нелинейной теории.

III. Моделирование ЛБВ в рамках нестационарной нелинейной теории.

– Моделирование прозрачной ЛБВ-подавителя и сравнение полученных выходных характеристик с реальными. Проверка работы программы

– Моделирование ЛБВ-усилителя С-диапазона частот с локальным поглотителем.

– Подавление сигналов в прозрачной ЛБВ и ЛБВ с локальным поглотителем.

– Моделирование ЛБВ-подавителя С-диапазона частот с локальным поглотителем.

IV. Моделирование автоколебательной системы из двух ЛБВ с обратной связью.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТ

В первом разделе приведен обзор статей по соответствующей тематике. В статьях рассмотрены кольцевые автоколебательные системы, способные генерировать КИ и УКИ.

Первая из рассмотренных кольцевых автоколебательных систем [1] состоит из двух пролетных клистронов, работающих в режиме линейного усиления СВЧ-сигнала, твердотельного предусилителя, ЛБВ, работающей в режиме нелинейного срыва Компфнера и выполняющей роль насыщающегося поглотителя, и СВЛП, работающей в режиме нелинейного параметрического взаимодействия спиновых волн. Схематическое изображение данной автоколебательной системы представлено на рисунке 1.

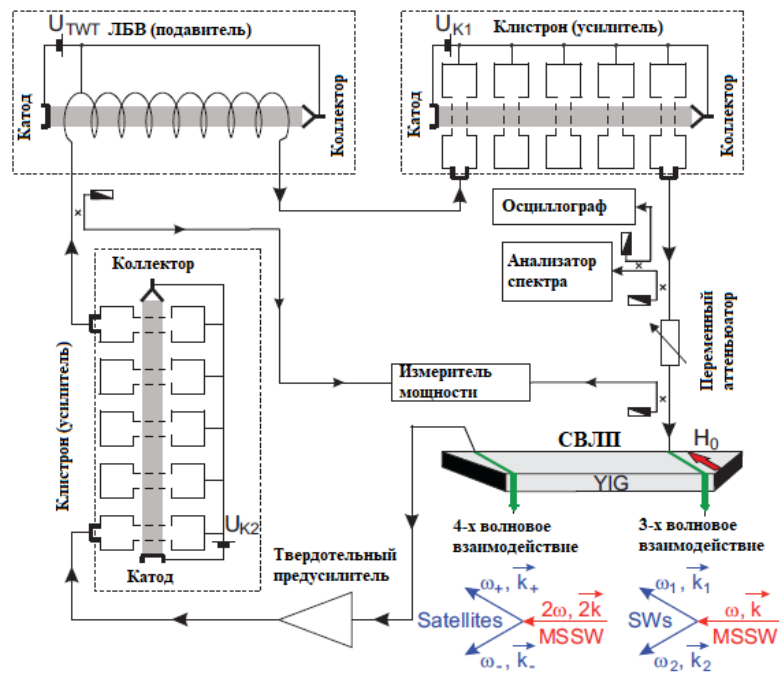


Рисунок 1 – Схема кольцевой автоколебательной системы с двумя («быстрым» и «медленным») пассивными нелинейными затворами, в которой генерируются многосолитонные комплексы [1].

В данной кольцевой автоколебательной системе была получена генерация многосолитонных комплексов, состоящих из коротких «светлых» солитонов огибающей длительностью порядка десятков наносекунд, формирующихся за счет пассивной синхронизации кольцевых мод, а также нелинейного трех- и четырехволнового параметрического взаимодействия спиновых волн.

Генерация импульсов обусловлена наличием двух нелинейных элементов в цепи обратной связи кольцевого генератора: «быстрого» насыщающегося поглотителя (время срабатывания меньше времени обхода СВЧ-сигнала по кольцу) в виде ЛБВ-подавителя, осуществляющего пассивную синхронизацию мод, и «медленного» нелинейного пассивного затвора (время срабатывания гораздо больше времени обхода СВЧ-сигнала по кольцу) в виде спин-волновой линии передачи, осуществляющего стохастическую модуляцию СВЧ-сигнала.

Полученные многосолитонные комплексы представлены на рисунке 2.

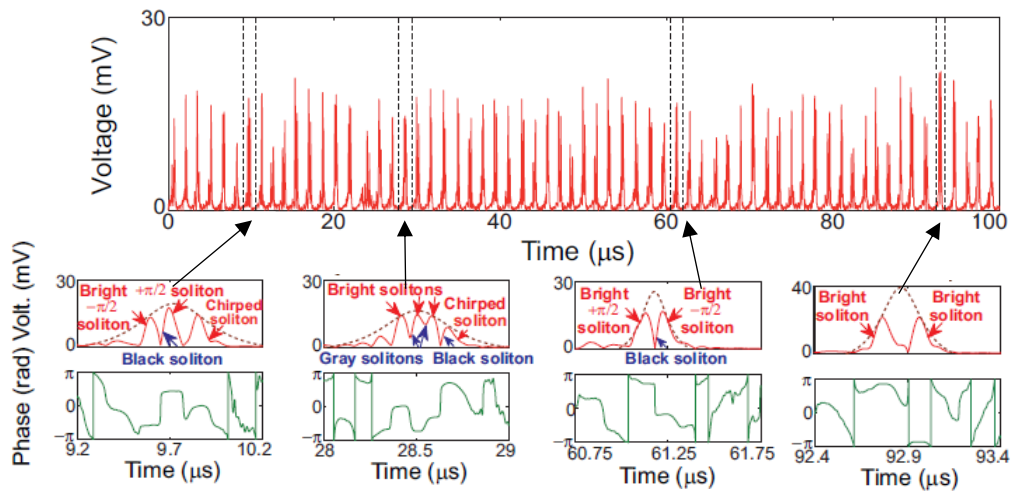


Рисунок 2 – Экспериментально полученная последовательность многосолитонных комплексов [1]

Вторая проанализированная автоколебательная система, аналитически описанная в [2], содержит только один нелинейный элемент в виде «быстрого» насыщающегося поглотителя. В [2] рассматривается модель кольцевого автогенератора, в цепи обратной связи которого находятся два основных элемента: gyro-TWT, работающая в режиме линейного усилителя СВЧ-сигнала, и gyro-TWT, выполняющая роль насыщающегося поглотителя, работающая в режиме циклотронного резонанса. Схема такого кольцевого генератора представлена на рисунке 3.

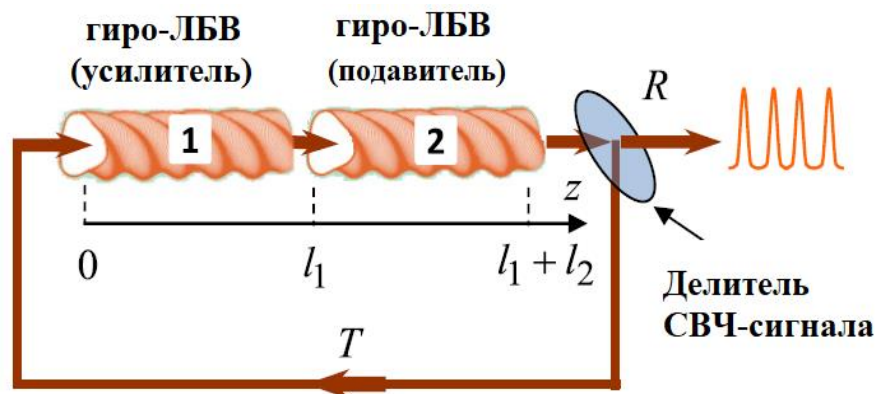


Рисунок 3 – Схематическое изображение кольцевой автоколебательной системы с одним «быстрым» нелинейным пассивным затвором в виде gyro-TWT-подавителя и gyro-TWT-усилителем, в которой генерируются периодические последовательности УКИ огибающей [2].

В результате численного моделирования такой системы были получены периодические последовательности УКИ огибающей, длительность которых составила порядка $\tau_{\text{имп}} = 0,2$ нс. При частоте несущей $f = 30$ ГГц, на которой работают обе gyro-ЛБВ, период следования равен $T = 1,6$ нс.

Третья кольцевая автоколебательная система, описанная в работе [3], состоит из ЛОВ, работающей как СВЧ-усилитель, и ЛБВ, работающей в режиме подавления СВЧ-сигнала. Схематическое изображение данного кольцевого автогенератора приведено на рисунке 4.

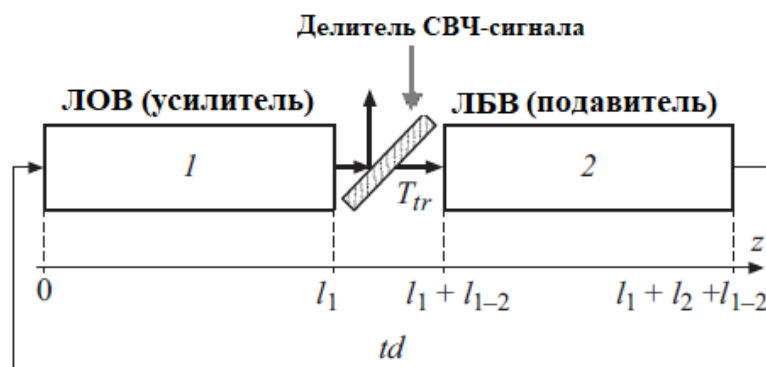


Рисунок 4 – Схематическое изображение кольцевой автоколебательной системы с одним «быстрым» нелинейным пассивным затвором в виде ЛБВ-подавителя и ЛОВ-усилителем, в которой генерируются периодические последовательности УКИ [3].

Результаты расчета системы показывают образование периодических последовательностей УКИ, длительностью порядка $\tau_{\text{имп}} = 0,45$ нс, а период следования равен $T = 3,8$ нс.

Четвертая кольцевая автоколебательная система, описанная в работе [4] состоит из двух последовательно соединенных ЛБВ, одна из которых работает в режиме линейного усиления СВЧ-сигнала, а вторая выполняет роль насыщающегося поглотителя, работая в режиме нелинейного срыва Компфнера. Схема такого кольцевого генератора представлена на рисунке 5.

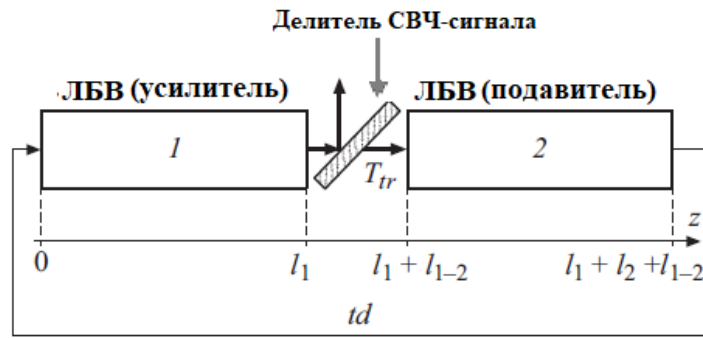


Рисунок 5 – Схематическое изображение кольцевой автоколебательной системы с одним «быстрым» нелинейным пассивным затвором в виде ЛБВ-подавителя, в которой генерируются периодические последовательности диссипативных солитонов огибающей ультракороткой длительности [4].

При расчете такой системы использовались уравнения нестационарной нелинейной теории ЛБВ в допущении медленно меняющихся амплитуд. Результаты моделирования показали наличие на выходе генератора периодических последовательностей импульсов огибающей длительностью порядка 0,4 нс.

Во втором разделе приведены основные расчетные формулы и уравнения методов Манькина-Школьникова [5] для расчета СВЧ-полей в рамках нестационарной нелинейно теории ЛБВ и частиц в ячейке, а также основной алгоритм расчета.

Расчет кольцевых систем в [1] – [4] проводился в рамках нестационарной нелинейной теории с допущением, что амплитуды сигналов меняются медленно. Данный подход не учитывает различные искажения сигнала и импульсов, шумы, а также не позволяет рассматривать широкополосные ЛБВ. но имеет допущения, такие как отсутствие пространственного заряда и влияние дисперсии на входной сигнал. Поэтому для расчета в данной работе было принято решение воспользоваться методом Манькина-Школьникова, позволяющим создать модель системы с распределенным взаимодействием, учитывающую изложенные выше особенности, и получить более точные результаты.

В третьем разделе представлены результаты расчета трех ЛБВ с помощью программы, основанной на алгоритме, приведенном во втором разделе.

Первым было проведено сравнение, подтверждающее корректность работы программы, результатов расчета программы с данными, полученными при измерении характеристик прозрачной ЛБВ-подавителя, работающем в режиме нелинейного срыва Компфнера [6]. Электрические и геометрические параметры ЛБВ-подавителя, используемого в эксперименте, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Электрические и геометрические параметры ЛБВ, исследуемой в [6]

Наименование параметра	Буквенное обозначение параметра	Значение параметра	
		не менее	не более
Рабочий диапазон частот, ГГц	f	0,60	1,13
Напряжение замедляющей системы (ускоряющее), кВ	$U_{зс}$	0,107	0,117
Ток катода, мкА	$I_{кат}$	1	
Длина пространства взаимодействия, мм	L	186,00	
Шаг спирали, мм	h	0,27	
Диаметр спирали, мм	d	3,60	

В приведенной работе наибольшее подавление сигнала в ЛБВ, работающей в режиме полного подавления сигнала при $I_{кат} = 10$ мкА, $U_{зс} = 0,107$ кВ, наблюдалось в окрестности частоты $f \approx 0,8$ ГГц. АЧХ ЛБВ, работающей в режиме нелинейного срыва Компфнера представлено на рисунке 6.

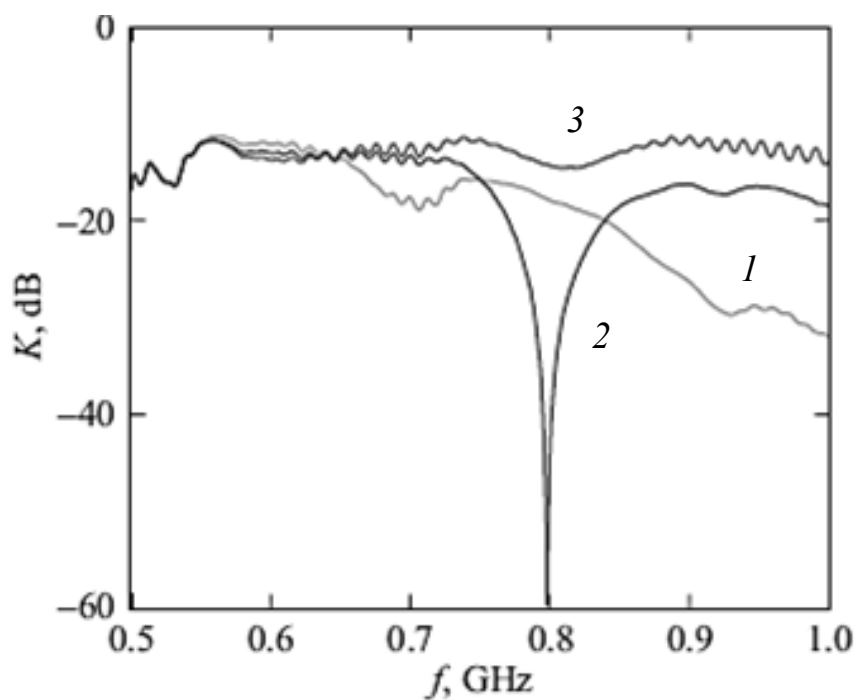


Рисунок 6 – Экспериментальное АЧХ ЛБВ-подавителя, работающего в режиме нелинейного срыва Компфнера ($I_{кат} = 10$ мкА, $U_{зс} = 0,107$ кВ) при разных уровнях входной мощности $P_{вх}$: 1) 0 дБм, 2) -6,4 дБм и 3) -30дБм

Зависимость, полученная по результатам расчета программы, представлена на рисунке 7.

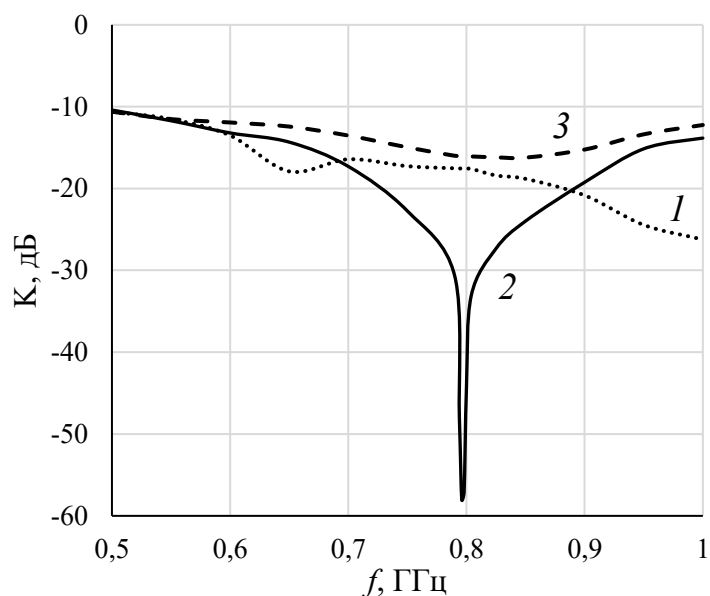


Рисунок 7 – Расчетное АЧХ ЛБВ-подавителя, работающего в режиме нелинейного срыва Компфнера ($I_{кат} = 10$ мкА, $U_{зс} = 0,107$ кВ) при разных уровнях входной мощности $P_{вх}$: 1) 0 дБм, 2) -6,4 дБм и 3) -30дБм

Далее была рассмотрена ЛБВ С-диапазона частот. Данная лампа имеет разрыв и поглотители в пространстве взаимодействия общей длины $L_{\text{разр.}} = 32$ мм. Максимальное затухание на каждом из поглотителей составляет $K_L = -40$ дБ. Электрические и геометрические параметры ЛБВ приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Электрические и геометрические параметры ЛБВ-усилителя С-диапазона частот

Наименование параметра	Буквенное обозначение параметра	Значение параметра	
		не менее	не более
Рабочий диапазон частот, ГГц	f	3,900	4,200
Напряжение замедляющей системы (ускоряющее), кВ	$U_{\text{зс}}$	3,0	4,0
Ток катода, мА	$I_{\text{кат}}$	-	100,0
Входная мощность, мВт	$P_{\text{вх}}$	0,3	1,0
Выходная мощность, Вт	$P_{\text{вых}}$	-	100,0
Длина пространства взаимодействия, мм	L	231,5	
Длина входной секции, мм	L_1	100,2	
Длина выходной секции, мм	L_2	95,3	
Усредненный шаг спирали, мм	h	0,65	
Диаметр спирали, мм	d	3,5	
Диаметр оболочки, мм	$d_{\text{об}}$	5,28	

Поскольку входной СВЧ сигнал гасится локальным поглотителем и не проходит в выходную секцию ЛБВ метод расчета требует модификации, учитывающей, что с начала выходной секции (после прохождения разрыва) СВЧ-поле наводится только сгруппированным током.

Для анализа рассматриваемой в качестве усилителя ЛБВ был выбран номинальный режим работы с параметрами на средней частоте рабочего диапазона: напряжение замедляющей системы (ускоряющее) $U_{зс} = 3,8$ кВ и ток катода $I_{кат} = 80$ мА. Входная мощность в режиме насыщения при выбранных параметрах составляет $P_{вх} = 0,3$ мВт.

На средней частоте рабочего диапазона полученная выходная мощность составила 90,6 Вт при уровне мощности входного сигнала 0,3 мВт, что соответствует коэффициенту усиления в 54,8 дБ. Реальный коэффициент усиления для данной ЛБВ составляет порядка 54-55 дБ.

Для ЛБВ-усилителя были также рассчитаны амплитудная и амплитудно-частотная характеристики, представленные на рисунках 8 и 9 соответственно.

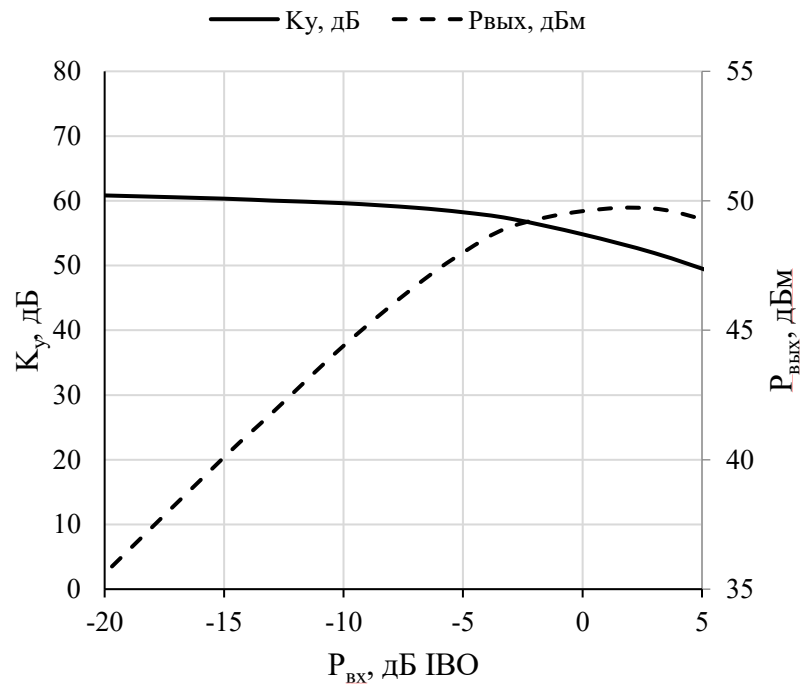


Рисунок 8 – Амплитудная характеристика ЛБВ-усилителя
С-диапазона частот

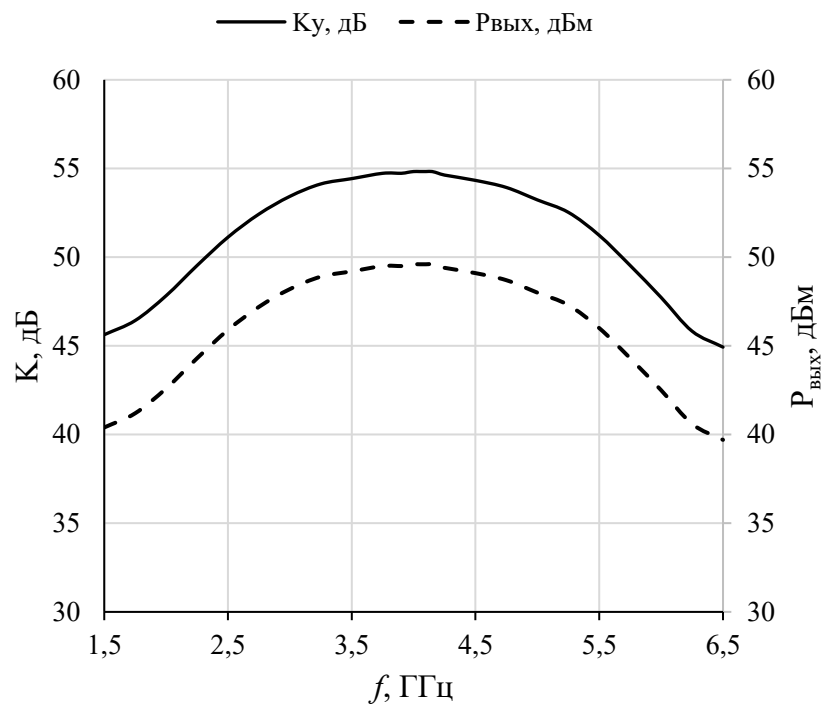


Рисунок 9 – АЧХ ЛБВ-усилителя С-диапазона частот

Следующей была рассмотрена ЛБВ-подавитель, работающая в режиме нелинейного срыва Компфнера.

В качестве ЛБВ-подавителя была выбрана идентичная усилителю ЛБВ С-диапазона частот. Для получения режима нелинейного срыва Компфнера были выбраны параметры с отстройкой от номинальных: напряжение замедляющей системы (ускоряющее) $U_{zc} = 4,5$ кВ и ток катода $I_k = 1$ мА. Входная мощность при расчете соответствует входной мощности в режиме насыщения ЛБВ-усилителя ($P_{ex} = 0,3$ мВт).

Амплитудная и амплитудно-частотная характеристики приведены на рисунках 10 и 11 соответственно.

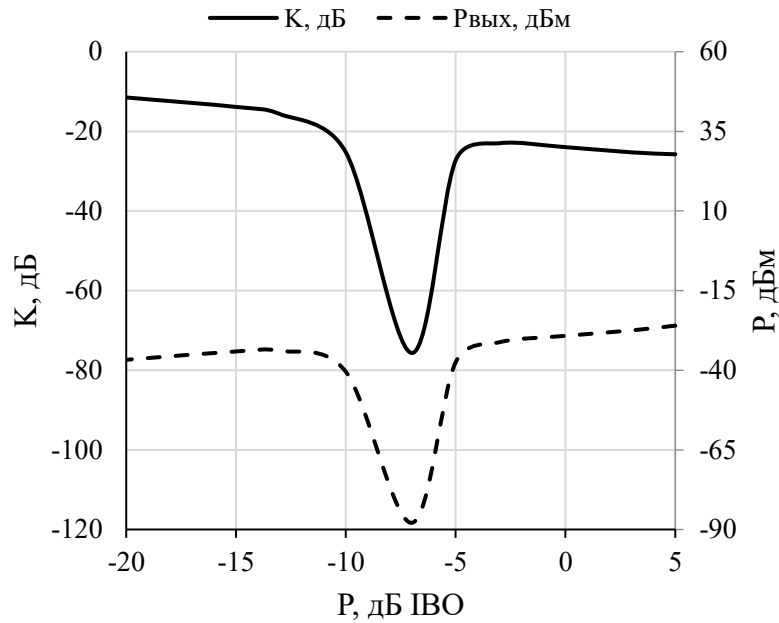


Рисунок 10 – Амплитудная характеристика ЛБВ-подавителя
С-диапазона частот

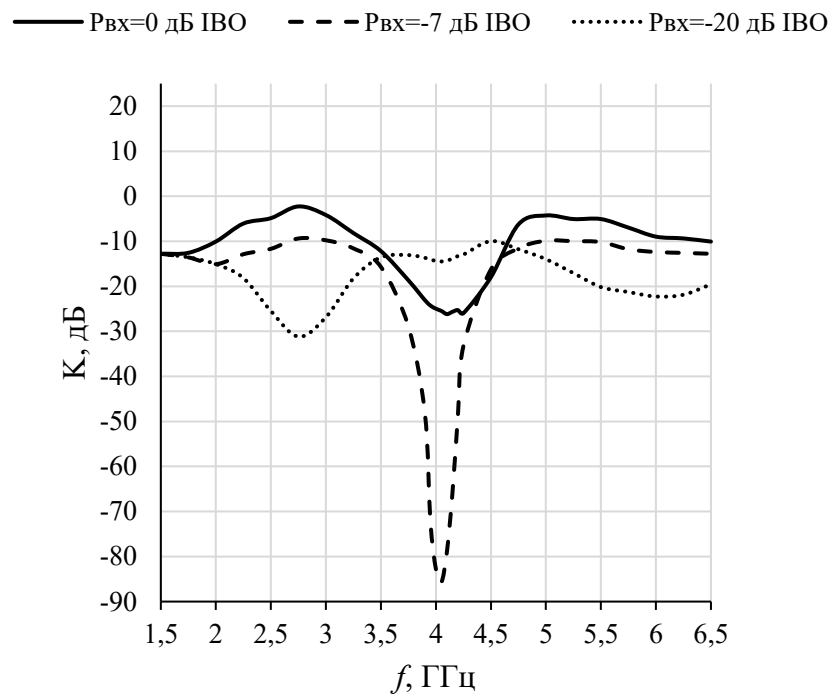


Рисунок 11 – АЧХ ЛБВ-подавителя С-диапазона частот

В четвертом разделе приведен расчет модели кольцевой генератора, состоящего из двух ЛБВ, одна из которых работает в режиме линейного усиления, а другая – в режиме нелинейного срыва Комфнера.

В модели кольцевого генератора выход/вход ЛБВ-подавителя последовательно соединены со входом/выходом ЛБВ-усилителя без учета потерь и задержки СВЧ-трактов. В качестве подавителя и усилителя были выбраны идентичные ЛБВ, одна из которых выполняет роль усилителя и работает в номинальном режиме, а вторая – ЛБВ-подавитель, работающая в режиме, рассчитанном выше. Схемы моделей генераторов, исследуемых в работе представлены на рисунке 11.

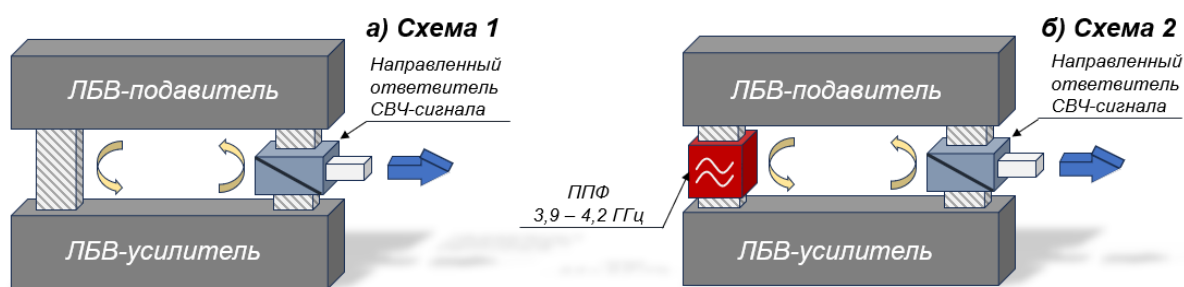


Рисунок 11 – Схемы кольцевых генераторов, смоделированных в работе:

а) Схема 1 – в отсутствие полосно-пропускающего фильтра

б) Схема 2 – с использованием полосно-пропускающего фильтра, настроенного на полосу частот срыва Компфнера ЛБВ-подавителя

Таблица 3 – Электрические и геометрические параметры ЛБВ-усилителя и ЛБВ-подавителя, используемых в модели

Наименование параметра	Буквенное обозначение параметра	Значение параметра (ЛБВ-усилитель)	Значение параметра (ЛБВ-подавитель)
Опорная частота, ГГц	f	4,050	4,050
Напряжение замедляющей системы (ускоряющее), кВ	$U_{зс}$	3,800	4,500
Ток катода, мА	$I_{кат}$	80,0	1,0
Длина пространства взаимодействия, мм	L	231,5	
Длина входной секции, мм	L_1	100,2	
Длина выходной секции, мм	L_2	95,3	
Усредненный шаг спирали, мм	h	0,65	

Продолжение таблицы 3

Наименование параметра	Буквенное обозначение параметра	Значение параметра (ЛБВ-усилитель)	Значение параметра (ЛБВ-подавитель)
Диаметр спирали, мм	d	3,5	
Диаметр оболочки, мм	$d_{об}$	5,28	

Для автоколебательной системы, состоящей из двух ЛБВ (рисунок 11 (а), Схема 1), была получена расчетная последовательность импульсов. Временная реализация сигнала на выходе из ЛБВ усилителя, полученная по результатам расчета, приведена на рисунке 12.

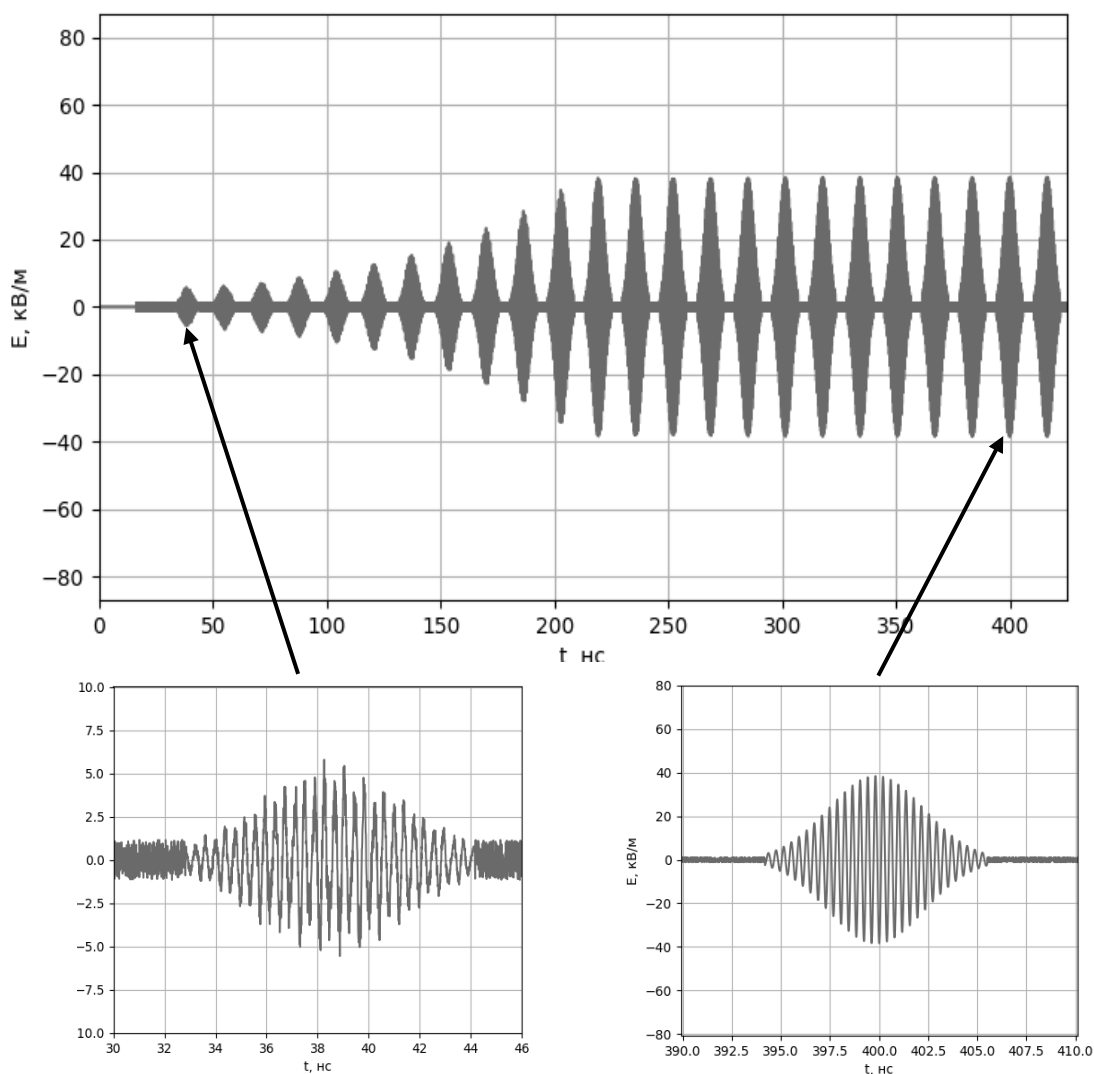


Рисунок 12 – Временная реализация сигнала на выходе из ЛБВ-усилителя в автоколебательной системе с нелинейным ЛБВ-подавителем и без полосно-пропускающего фильтра

Длительность импульсов огибающей составляет порядка $\tau_{\text{имп}} = 7,7 - 7,8$ нс. Данное время сопоставимо с групповым временем задержки (ГВЗ) для данного типа ламп, составляющим порядка $\tau_{\text{зпз (ЛБВ)}} = 8,0 - 8,5$ нс. Расхождение в значениях является следствием допущения постоянства шага. Период следования импульсов огибающей в размерных величинах $T_{\text{имп}} = 15,5$ нс. Пиковая мощность установившихся импульсов $P_{\text{имп}} = 35$ Вт.

Спектр сигнала, нормированный на максимальное значение амплитуды – $A_{\text{max}}(f)$, представленного на рисунке 12, приведен на рисунке 13.

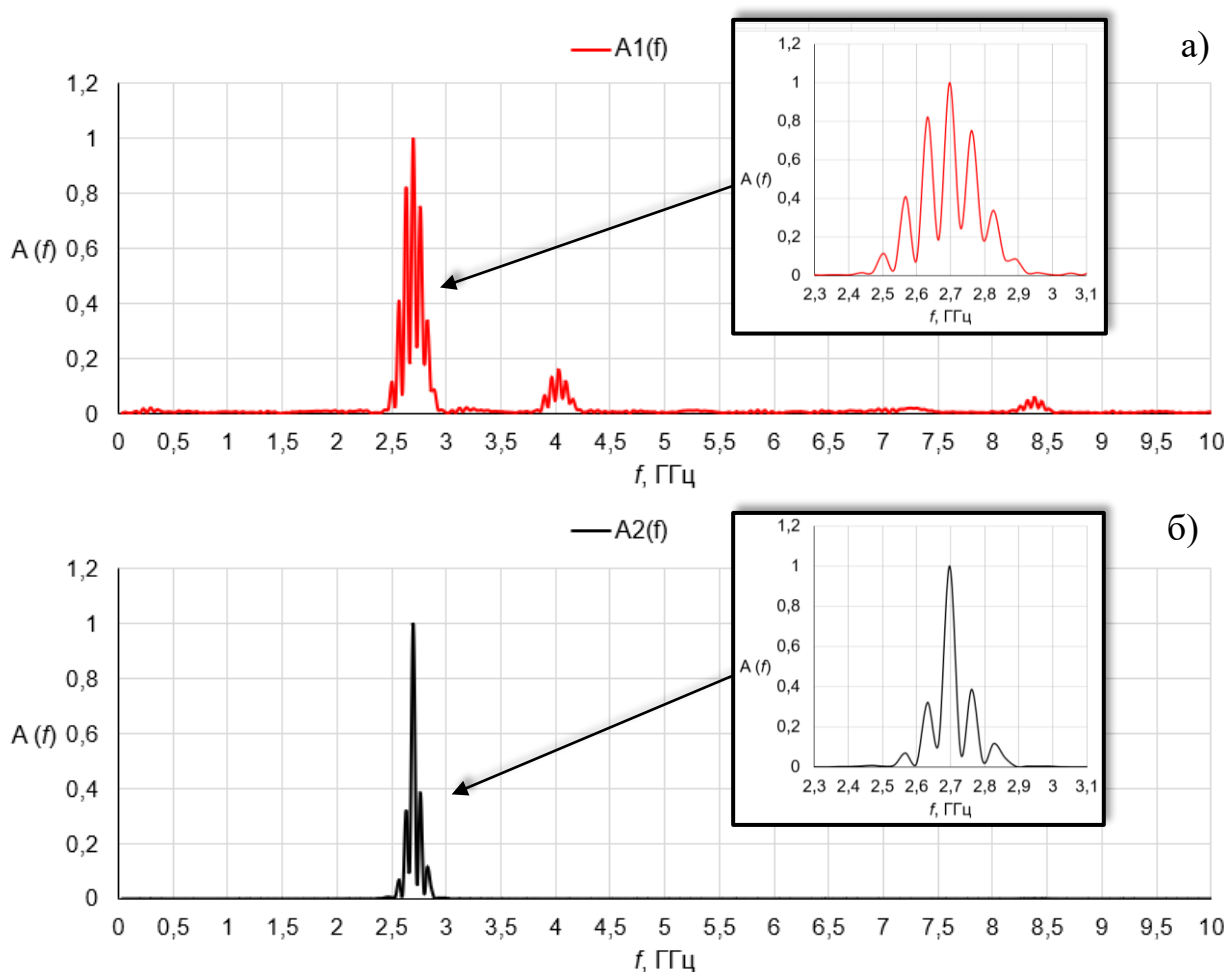


Рисунок 13 – Спектр (нормированный на максимальное значение амплитуды – $A_{\text{max}}(f)$) несущей импульсов: а) в начале (красная); б) в конце (черная) расчетного времени

Из рисунка 13 видно, что генерация происходит на границе рабочей полосы. Частота основной моды установившихся колебаний – 2,69 ГГц.

В нестационарном режиме (рисунок 13 (а)) самосинхронизируются порядка 5 мод, а в стационарном режиме (рисунок 13 (б)) – порядка 3 мод.

Для автоколебательной системы, состоящей из двух ЛБВ с включенным в кольцо ППФ с полосой в диапазоне «клюва» АЧХ ЛБВ-подавителя (рисунок 11 (б), Схема 2), была получена расчетная последовательность импульсов. Временная реализация представлена на рисунке 14.

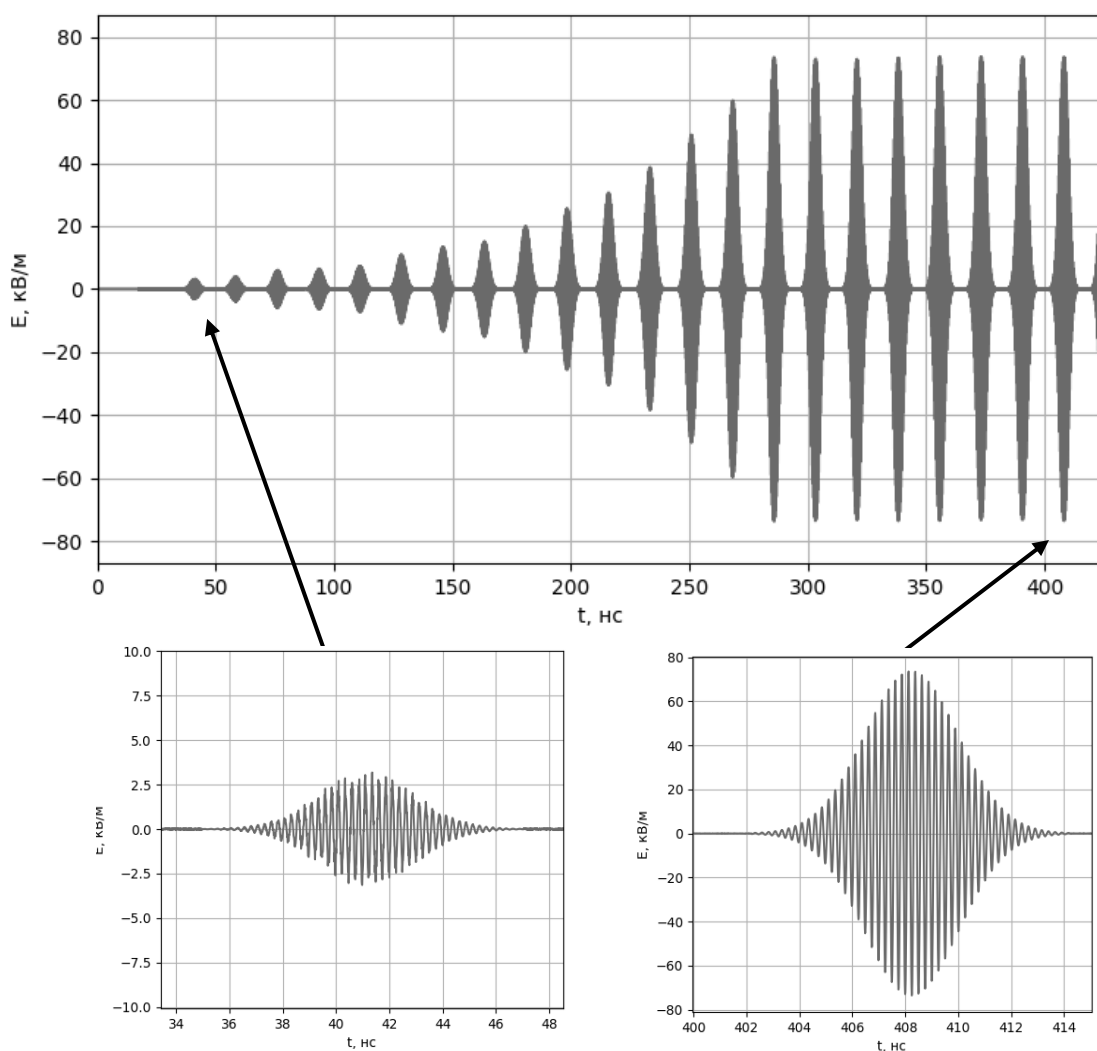


Рисунок 14 - Временная реализация сигнала на выходе из ЛБВ-усилителя в автоколебательной системе с полосно-пропускающим фильтром, настроенным на полосу частот нелинейного срыва Компфнера

Длительность импульсов огибающей составляет порядка $\tau_{\text{имп}} = 8,2 - 8,3$ нс. Она увеличена за счет сужения полосы генерации СВЧ-сигнала. Период следования радиоимпульсов - $T_{\text{имп}} = 16.5$ нс. Он увеличен за

счет добавления в кольцо времени задержки фильтра ($\tau_{зпз}(\phi)$). Пиковая мощность установившихся радиоимпульсов $P_{имп} \approx 140$ Вт. Он увеличен за счет генерации сигнала в рабочей полосе ЛБВ-усилителя.

Спектр сигнала, нормированный на максимальное значение амплитуды – $A_{max}(f)$, представленного на рисунке 14, приведен на рисунке 15.

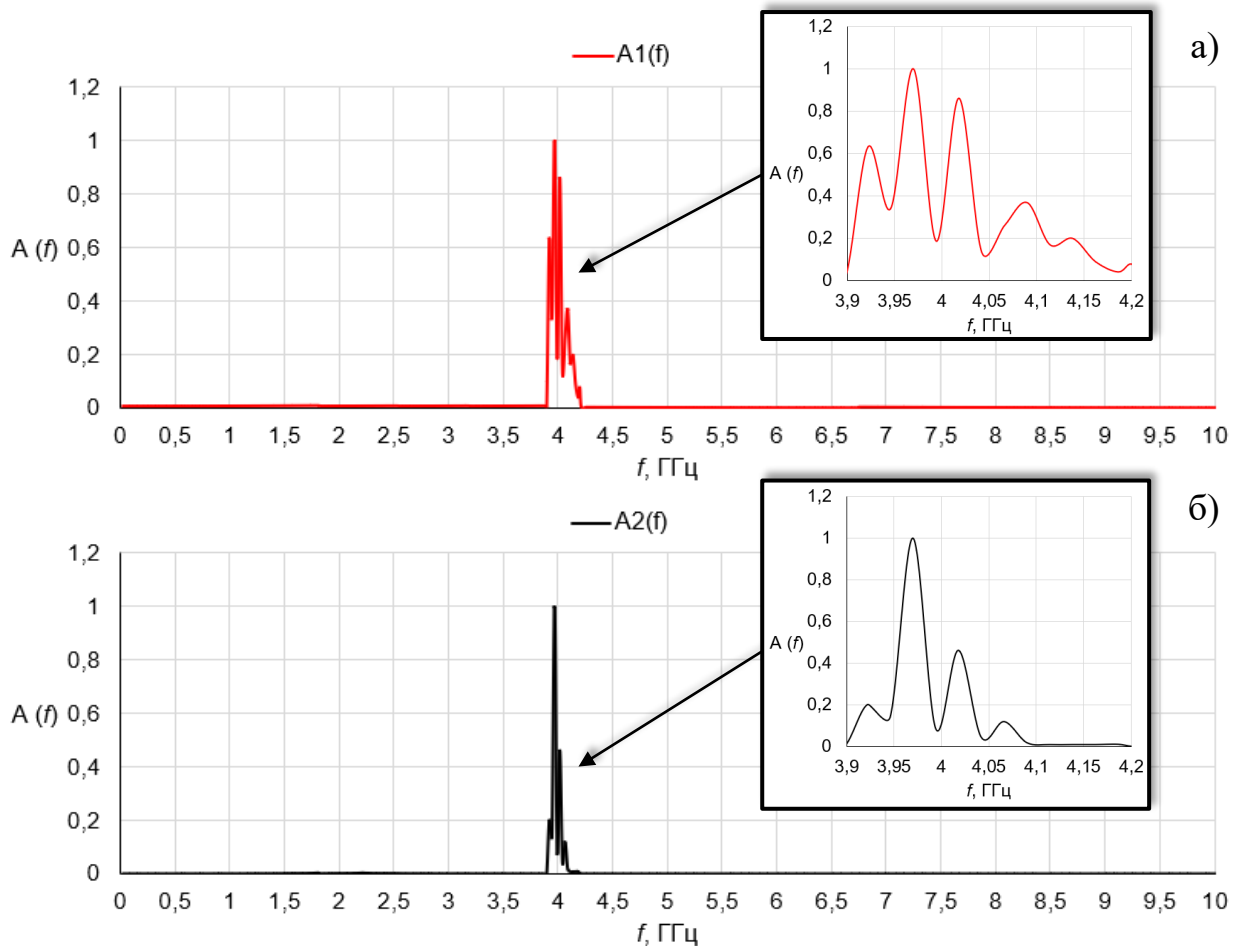


Рисунок 15 – Спектр (нормированный на максимальное значение амплитуды – $A_{max}(f)$) несущей импульсов в системе с полосно-пропускающим фильтром, настроенным на полосу частот нелинейного срыва Компфнера:

а) в начале (красная); б) в конце (черная) расчетного времени

Из рисунка видно, что генерация происходит на частоте 3,97 ГГц, т.е. на границе полосы разрешенной ППФ. В нестационарном режиме (рисунок 15 (а) самосинхронизируются порядка 4 мод, а в стационарном режиме (рисунок 15 (б) – порядка 2 мод.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения магистерской работы были решены все поставленные задачи и получены следующие основные результаты:

1. Проведен обзор статей, в которых описываются кольцевые автоколебательные системы, способные генерировать КИ и УКИ. Теоретические и экспериментальные результаты, полученные в статьях, подтверждают возможность генерации импульсов в кольцевых автоколебательных системах микроволнового диапазона за счет пассивной синхронизации мод и определяют параметры, влияющие на характер и вид импульсов.

2. Проведены расчеты амплитудно-частотных и амплитудных характеристик ЛБВ-усилителя и ЛБВ-подавителя вне автоколебательной системы, которые хорошо согласуются с их экспериментальными характеристиками, полученными ранее.

3. Проведен расчет режимов генерации кольцевой автоколебательной системы, состоящей из двух ЛБВ, одна из которых работает в режиме линейного усиления, а другая – в режиме нелинейного срыва Компфнера (нелинейный подавитель). Результаты расчета показали наличие в такой автоколебательной системе режима генерации периодической последовательности коротких радиоимпульсов наносекундной длительности (7.7 – 7.8 нс в системе без фильтра и 8.2 – 8.3 нс в системе с полосно-пропускающим фильтром 3.9 – 4.2 ГГц). Длительность радиоимпульсов определяется шириной спектра, генерируемого многомодового СВЧ-сигнала, а их период следования равен общему времени задержки сигнала в кольце.

4. Построены спектры мощности генерируемого СВЧ-сигнала в отсутствие и при наличии в системе полосового фильтра. Из полученных зависимостей установлено, что в стационарном режиме в процессе пассивной синхронизации мод участвуют от трех (в отсутствие фильтра) до двух (при наличии фильтра) собственных мод кольцевого резонатора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 S. V. Grishin. Self-generation of chaotic dissipative multisoliton complexes supported by competing nonlinear spin-wave interactions / S. V. Grishin, B. S. Dmitriev, O. I. Moskalenko, V. N. Skorokhodov, Y. P. Sharaevskii // PHYSICAL REVIEW E 98, 022209 (2018)
- 2 N. S. Ginzburg. Generation of trains of ultrashort microwave pulses by two coupled helical gyro-TWTs operating in regimes of amplification and nonlinear absorption / N. S. Ginzburg, G. G. Denisov, M. N. Vilkov, A. S. Sergeev, I. V. Zotova, S. V. Samsonov, S. V. Mishakin // PHYSICS OF PLASMAS 24, 023103 (2017)
- 3 Н.С. Гинзбург. Генерация периодической последовательности мощных ультракоротких импульсов в цепочке связанных релятивистских ламп обратной и бегущей волн, работающих в режимах усиления и нелинейного компфнеровского подавления / Н.С. Гинзбург, Э.Б. Абубакиров, М.Н. Вилков, И.В. Зотова, А.С. Сергеев // Журнал технической физики, 2018, том 88, вып. 8
- 4 Н.С. Гинзбург. Генерация периодической последовательности мощных ультракоротких импульсов в цепочке связанных ламп бегущей волны, работающих в режимах усиления и нелинейного компфнеровского подавления / Н.С. Гинзбург, Э.Б. Абубакиров, М.Н. Вилков, И.В. Зотова, А.С. Сергеев // Письма в ЖТФ, 2017, том 43, вып. 18
- 5 Н.А. Манькин. К нестационарной теории ЛБВ / Н.А. Манькин, В.Г. Школьников // Радиотехника и электроника, 1981, №9
- 6 С.В. Гришин. Нелинейное подавление сигналов в лампе бегущей волны. / С.В. Гришин, Б.С. Дмитриев, Ф.П. Разуваев, В.Н. Скороходов, В.Н. Титов, Д.И. Трубецков // Журнал технической физики, 2021, том 91, вып. 11, с. 1774-1784.э