

Игумнов Владислав Сергеевич

**Вывод СВЧ энергии из резонатора
управляемой трансформацией вида колебаний**

01.04.20 — физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в лаборатории 46 Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель:

Артёменко Сергей Николаевич,
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты:

Винтизенко Игорь Игоревич,
доктор физико-математических наук,
ФГБОУ ВПО НИ ТПУ,
заведующий лабораторией № 53

Черноусов Юрий Дмитриевич,
кандидат технических наук,
Институт химической кинетики и горения СО
РАН, научный сотрудник

Ведущая организация:

Институт сильноточной электроники СО РАН

Защита состоится « 17 » декабря 2013 года в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.05 Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 2/А, ТПУ

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, ул. Белинского, 53.

Автореферат разослан « » ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

Кожевников А.В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Источники ВЧ питания ускорителей заряженных частиц в значительной мере определяют не только технические характеристики ускорителей, но и их стоимость. Поэтому стремление уменьшить затраты на создание или модернизацию ускорителей стимулирует работы, направленные на снижение стоимости источников питания. Одним из результатов такой работы является предложенный в 70-е годы прошлого века пассивный способ повышения импульсной СВЧ мощности – резонансная компрессия СВЧ импульсов, основанная на накоплении энергии импульса в резонаторе и быстром ее выводе в нагрузку [1а-3а]. Интерес к способу обусловлен относительной простотой и невысокой стоимостью реализующих его резонансных СВЧ компрессоров. Компрессоры легко интегрируются в систему питания ускорителя и позволяют повышать импульсную мощность системы и энергию ускоренных частиц без существенных материальных и финансовых затрат.

Для питания ускорителей требуются мощные и энергоемкие СВЧ импульсы. В резонансных СВЧ компрессорах значительный запас энергии можно получать, используя большие накопительные объемы с размерами много больше длины рабочей волны. Одной из проблем компрессоров с такими резонаторами является быстрый вывод накопленной энергии. Сложность проблемы заключается в противоречивости предъявляемых к резонатору требований. Как правило, для достижения эффективной компрессии резонатор должен иметь высокую добротность в режиме накопления и низкую в режиме вывода. Совместное выполнение этих требований в крупных накопительных объемах представляет собой непростую техническую задачу. В силу этого ряд компрессоров с выводом энергии из сверхразмерных резонаторов ограничен и пока ни один из них в полной мере предъявляемым требованиям не удовлетворяет [4а-8а]. Поэтому разработка способов быстрого вывода энергии из крупных резонаторов является актуальной.

Многообразие ускорителей и требований к параметрам пучка ускоренных частиц диктует необходимость в импульсах ВЧ питания с таким же многообразием их основных параметров – мощности, длительности, частоты следования. Возможности регулирования этих параметров в известных компрессорах ограничены, что ведет к необходимости разработки для каждого типа ускорителя соответствующего типа компрессора. Управляемый вывод энергии может расширить эти возможности и позволить СВЧ компрессорам с таким выводом охватывать более широкий ряд ускорителей. Поэтому разработка СВЧ компрессоров с управляемым выводом также практически важна.

Актуальность диссертационной работы обусловлена и растущим интересом к резонансным СВЧ компрессорам как источникам мощных СВЧ им-

пульсов, которые могут найти применение для решения задач и в ряде других областей науки и техники.

Предмет исследований

В диссертационной работе исследуется способ формирования СВЧ импульсов с регулируемыми параметрами, основанный на выводе энергии из сверхразмерного резонатора управляемой трансформацией вида колебаний. При таком способе энергия в резонаторе накапливается на высокочастотном виде колебаний. На быстро включаемом элементе межвидовой связи этот вид трансформируется в вид, сильно связанный с выходом. В результате накопленная энергия в форме СВЧ импульса поступает в нагрузку.

В первом компрессоре такого типа элементом связи служил плазменный канал газового разряда в объеме резонатора [9а]. При этом низкая электрическая прочность элемента ограничивала мощность импульсов. В качестве более прочного элемента в [10а] предложено использовать окно связи резонатора с короткозамкнутым волноводным шлейфом в виде T -образного H -тройника. В таком компрессоре одно прямое плечо шлейфа-тройника подключается к резонатору и имеет длину, при которой связь видов колебаний отсутствует. Второе плечо ограничивается подвижным короткозамыкателем, а в боковом, также короткозамкнутом плече, располагается СВЧ коммутатор. Коммутатор осуществляет переключение тройника из режима «закрыто» в режим «открыто» и меняет электрическую длину шлейфа. Это приводит к изменению картины поля на окне и изменению связи между видами колебаний и с нагрузкой. Подвижный короткозамыкатель обеспечивает управление длиной шлейфа и регулирование связи видов колебаний и параметров импульсов.

Работоспособность резонансных СВЧ компрессоров с трансформацией волн, но на распределенных стационарных элементах связи, продемонстрирована и на серии компрессоров, предложенных в [11а, 12а].

В данной работе исследуется защищенный патентом модернизированный вариант резонансного СВЧ компрессора с трансформацией вида колебаний на окне связи [2] (Рис.1). Для повышения мощности импульсов и расширения возможностей управления процессом вывода на выходе компрессора установлен второй тройник, позволяющий регулировать связь резонатора с нагрузкой, и выход компрессора сопрягается с резонатором через плавный согласующий переход. При закрытом тройнике передача энергии идет от добротного к добротному виду, и тройник открывается после завершения процесса передачи энергии от вида к виду. Согласованный переход обеспечивает вывод за минимальное время, равное времени двойного пробега волны вдоль резонатора, и формирование импульсов СВЧ с прямоугольной огибающей. В компрессоре с передачей энергии к виду низкочастотному тройник в вы-

ходном волноводе открыт постоянно и возможно формирование импульсов с регулируемыми параметрами.

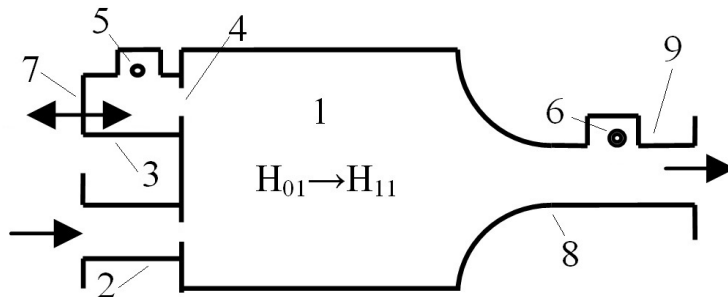


Рис. 1. Схема резонансного СВЧ компрессора. 1 – накопительный резонатор, 2 – устройство ввода энергии, 3 – шлейф-тройник, 4 – окно-элемент межвидовой связи, 5, 6 – СВЧ коммутаторы, 7 – подвижный короткозамыкатель шлейфа, 8 – выходной волновод, 9 – выходной тройник.

Цель работы

Целью диссертационной работы являлось установление закономерностей процесса формирования СВЧ импульсов при выводе энергии из сверхразмерного резонатора управляемой трансформацией вида колебаний и создание действующих макетов резонансного СВЧ компрессора с регулируемыми параметрами формируемых импульсов

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Проанализированы процессы накопления и вывода СВЧ энергии в резонансной системе с исследуемым способом вывода.
2. Рассчитаны и разработаны макеты СВЧ компрессоров, реализующих способ.
3. Разработанные макеты исследованы на низком и высоком уровне мощности.
4. Сформулированы базовые принципы проектирования СВЧ компрессоров с выводом энергии управляемой трансформацией вида колебаний на окне связи резонатора с короткозамкнутым волноводным шлейфом .

Научная новизна работы

В диссертационной работе получены следующие новые результаты:

1. Определены основные закономерности процесса межвидовой передачи энергии в резонаторе при трансформации вида колебаний на окне связи резонатора с короткозамкнутым волноводным шлейфом.
2. Построена модель для описания переходных процессов при накоплении и выводе энергии в системе компрессии с трансформацией вида колебаний на окне связи резонатора с короткозамкнутым волноводным шлейфом.
3. Впервые осуществлена последовательная компрессия СВЧ импульсов в двух связанных видах колебаний резонатора, позволяющая повышать рабочую мощность компрессора и получать импульсы СВЧ с формой огибающей, близкой к прямоугольной.

4. Впервые показана возможность дробного вывода СВЧ энергии из резонатора и формирования серии импульсов СВЧ суб- и (или) наносекундной длительности с частотой следования свыше 1МГц в пределах входного импульса компрессора.

5. Продemonстрировано суммирующее действие синхронно и синфазно работающих элементов межвидовой связи, позволяющее уменьшить время вывода энергии и увеличить мощность импульсов СВЧ компрессора.

Положения, выносимые на защиту

1. Процессы накопления и вывода энергии в СВЧ компрессоре с трансформацией вида колебаний на окне связи резонатора с волноводным шлейфом определяются интерференцией волн, формируемых межвидовой связью на окне, и волн, излучаемых окном из шлейфа.

2. Вывод СВЧ энергии из резонатора управляемой трансформацией вида колебаний на окне связи резонатора с волноводным шлейфом позволяет формировать СВЧ импульсы с регулируемыми параметрами: мощностью, длительностью, формой огибающей и частотой следования.

3. Эффективность СВЧ компрессоров с выводом энергии трансформацией вида колебаний на окне связи резонатора с волноводным шлейфом сопоставима с эффективностью известных активных СВЧ компрессоров, что позволяет их использовать в системах питания линейных резонансных ускорителей.

Научная и практическая значимость

Научная значимость результатов работы заключается в получении новых данных о процессах накопления и вывода энергии в системе компрессии СВЧ импульсов с трансформацией вида колебаний на окне связи резонатора с короткозамкнутым волноводным шлейфом. В частности, в установлении закономерностей процессов и факторов, их определяющих, демонстрации возможности управления процессом вывода. Научная значимость также заключается в прогнозировании и демонстрации сопоставимости эффективности систем компрессии с трансформацией вида колебаний на быстро включаемом элементе связи с эффективностью известных активных систем компрессии.

Практическая значимость работы обусловлена возможностью создания на основе полученных данных источников мощных СВЧ импульсов суб- и (или) наносекундной длительности с регулируемыми параметрами. Реализованная последовательная компрессия СВЧ импульсов в связанных видах колебаний может служить основой для разработки мощных СВЧ компрессоров, формирующих импульсы с прямоугольной огибающей в системах ВЧ питания ускорителей. Практическая значимость обусловлена и тем, что кроме ускорительной техники разработанные источники СВЧ импульсов с регулируемыми

параметрами могут найти применение и в ряде других областей науки и техники. Например, при проведении лабораторных и полигонных исследований, в радиолокации, связи и т.д.

Публикации и апробация результатов

Материалы диссертации, в основном, получены при выполнении Гранта РФФИ №08 – 08 – 155а и Государственного задания «Наука» Минобрнауки РФ № 0.3.2012 и опубликованы в работах [1-16], в числе которых 6 статей в рецензируемых журналах из списка ВАК и три патента на изобретения. Результаты работы докладывались автором на международной конференции студентов и молодых ученых Перспективы фундаментальных исследований в 2009 году (г.Томск) и пяти международных конференциях: 16-м международном симпозиуме по сильноточной электронике, 13-й и 14-й Международных конференциях молодых специалистов по микро/нанотехнологиям и электронным приборам (EDM, 2012, 2013, Россия, Алтай, Эрлагол), 7 международном форуме по стратегическим технологиям (IFOST, 2012, Россия, г. Томск), 3-м международном конгрессе по радиационной физике и химии конденсированных сред, сильноточной электронике и модификации материалов пучками частиц и плазменными потоками (2012, Россия, г. Томск).

Материалы диссертации также докладывались на научных семинарах лаборатории №46 ФТИ НИ ТПУ в 2009 - 2013 гг.

Личный вклад автора

Представленные в диссертации результаты теоретических исследований и расчетов, а также экспериментальные данные получены автором либо при его непосредственном участии. Большая часть работы, касающаяся выбора метода теоретического анализа исследуемой системы, а также разработки и анализа модели системы определена автором.

Расчет и разработка конструкций исследованных СВЧ компрессоров, а также расчет энергетических характеристик компрессоров выполнен при непосредственном участии автора. Большинство исследований разработанных систем компрессии на низком уровне мощности выполнено автором.

Экспериментальные исследования на высоком уровне мощности проведены совместно с соавторами. Материалы к конференциям [1,5,9,10,11,16] и ряд публикаций [3,6,8,14] готовились, оформлялись и докладывались автором.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы и списка публикаций автора по теме диссертации. Общий объем диссертации составляет 130 страниц, включая 55 рисунков, 4 таблицы и список цитируемой литературы и публикаций автора из 87 наименований.

Содержание диссертации

Во **введении** диссертации дается краткий обзор известных систем компрессии, обосновывается актуальность, и формулируются цель, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы. Кратко излагается содержание, и формулируются научные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлены результаты теоретического анализа работы резонансного СВЧ компрессора с выводом энергии управляемой трансформацией вида колебаний на окне связи резонатора с короткозамкнутым волноводным шлейфом.

В **разделе 1.1** формулируются основные требования к резонансным СВЧ компрессорам, используемым в источниках питания линейных резонансных ускорителей. Характеризуются известные системы компрессии. Приводится перечень возможностей исследуемой системы.

В **разделе 1.2** кратко описывается явление трансформации волн и примеры его использования в СВЧ устройствах. Обосновывается выбор методов анализа явления. Делается заключение о достаточности для решения задачи работы двух методов – приближенного электродинамического метода, в котором взаимодействующие виды представлены связанными колебательными контурами, и метода матрицы рассеяния с представлением взаимодействующих видов связанными резонаторами.

В **разделе 1.3** методом матрицы рассеяния анализируются две граничные схемы вывода энергии трансформацией вида колебаний на быстро включаемом элементе связи. Первая схема основана на передаче энергии от основного добротного вида к добротному вспомогательному виду и последующем выводе со второго вида в нагрузку. Схема идентична последовательной компрессии в связанных резонаторах. Быстрая передача энергии от вида к виду обеспечивает повышение электрической прочности системы на вспомогательном виде. Связь этого вида с нагрузкой регулируется СВЧ переключателем, находящимся вне области, заполненной полем основного вида. При накоплении и передаче переключатель закрыт. По завершении передачи он открывается. Схема используется для получения мощных СВЧ импульсов прямоугольной формы. В силу высокой добротности видов схема может быть реализована при относительно слабой межвидовой связи. В другой граничной схеме передача идет к виду предельно низкодобротному с открытым переключателем и полной связью с нагрузкой. В таком исполнении компрессор с управляемой связью колебаний может формировать импульсы с регулируемой мощностью, длительностью и формой огибающей. Отмечаются особенности передачи энергии в граничных схемах, выполняются оценки энергетических характеристик СВЧ компрессоров с такими схемами вывода.

Раздел 1.4 касается анализа накопительной системы компрессора, а именно, анализа амплитудно-частотных характеристик резонатора, связанного с тройником-шлейфом. Формулируется предположение о механизме регулирования связи резонатора с нагрузкой. Предполагается, что в основе регулирования лежит интерференция волн, формируемых межвидовой связью на окне связи резонатора со шлейфом, и волн, излучаемых окном из шлейфа. Опираясь на это предположение и используя амплитудно-частотные характеристики системы, показано, что для окна с любым коэффициентом передачи имеется длина шлейфа (входного плеча тройника), при которой межвидовая связь и, следовательно, связь с нагрузкой компенсируется. Показано также, что, меняя длину выходного плеча и открывая тройник с помощью быстродействующего СВЧ коммутатора, можно управлять связью, определяемой параметрами окна, резонатора и шлейфа.

В **разделе 1.5** на основе приближенной электродинамической теории взаимодействия видов колебаний выполнен расчет коэффициента межвидовой связи γ_{12} на окне связи резонатора со шлейфом. По результатам раздела 1.3 и результатам расчета коэффициента получены численные оценки условия отсутствия связи между видами и с нагрузкой. Расчет и оценки выполнены по известным формулам для γ_{12} и коэффициента передачи h между связанными резонаторами [1a,14a]:

$$\gamma_{1,2} = -\frac{1}{V} \int_{\delta V} (\vec{H}_1 \vec{H}_2 - \vec{E}_1 \vec{E}_2) dV, \quad h = \gamma_{1,2} \omega \sqrt{T_1 T_2} \approx \gamma_{1,2} \omega T \quad (1)$$

где V и δV - соответственно, объем резонатора и объем «деформированной» его части, на которой происходит взаимодействие, $\vec{H}_1, \vec{H}_2, \vec{E}_1, \vec{E}_2$ - векторы магнитных и электрических компонент поля взаимодействующих видов колебаний, ω - циклическая рабочая частота, $T_1 \approx T_2 \approx T$ — время двойного пробега рабочих волн вдоль резонатора. Здесь же оценено количество окон — элементов связи, необходимое для полного преобразования основного вида в вид вспомогательный. Показано, что для полного преобразования вида при однократном взаимодействии его волны с элементами и достижения усиления и мощности импульсов, сопоставимых с усилением и мощностью волны в резонаторе, необходимо, чтобы площадь окон была сопоставима с площадью сечения резонатора. Расчетные зависимости усиления компрессора G от радиуса окна связи r для умеренно многомодового и сверхразмерного цилиндрического резонатора с разным количеством окон n приведены на рис.2. Расчеты выполнены для использованных в экспериментах резонаторов с основным рабочим видом колебаний $H_{01(m)}$ и вспомогательным $H_{11(p)}$.

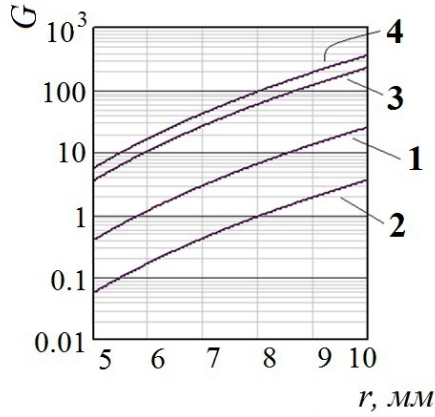


Рис.2. Расчетные зависимости усиления мощности компрессора G от радиуса окна связи r резонатора со шлейфом при различных величинах радиуса резонатора R . Трансформация на одном окне связи $n = 1$: 1) $R = 2.2$ см; 2) $R = 4.5$ см. Трансформация на n окнах связи: 3) $R = 2.2$ см, $n = 3$; 4) $R = 4.5$ см, $n = 10$.

В разделе 1.6 изложены результаты анализа работы модели исследуемого СВЧ компрессора. Модель построена на основе следующих трех постулатов: 1. Накопительная система компрессора представляет собой соединение трех волноводных линий – резонатора, шлейфа и линии связи с нагрузкой. 2. Регулирование связи с нагрузкой обеспечивается интерференцией волн, формируемых на окне и излучаемых окном из шлейфа. 3. Распределение волн в системе идентично распределению волн в волноводном тройнике с короткозамкнутым плечом. Поэтому система представлена в виде H -тройника с резонатором в одном прямом плече тройника, со вторым прямым плечом, связанным с нагрузкой, и шлейфом в боковом плече. Методом матрицы рассеяния выполнен анализ работы модели в стационарном режиме, а через приближенные дифференциальные уравнения (2), полученные разложением в ряд рекуррентных соотношений между амплитудами волн в системе, - и в динамическом режиме.

$$\frac{db_2(t)}{dt} + \frac{b_2(t)}{\tau_1} \approx \kappa a_1 - \sigma b_4(t), \quad \frac{db_4(t)}{dt} + \frac{b_4(t)}{\tau_2} \approx \delta b_2(t) \quad (2)$$

$$\text{где } \sigma = \frac{\sqrt{2}jhe^{-\frac{\beta}{2}-\gamma-j\phi}}{T_1e^{-\frac{\alpha}{2}}(1+\sqrt{1-h^2}e^{-\beta})}, \quad \kappa = \frac{2jk}{T_1\sqrt{1-k^2}e^{-\alpha}(1+\sqrt{1-h^2}e^{-\beta})}, \quad \delta = \frac{jhe^{-\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\sqrt{2}T_2\sqrt{1-h^2}e^{-\gamma-j\phi}}$$

— численные параметры и

$$\tau_1 = \frac{T_1\sqrt{1-k^2}e^{-\alpha}(1+\sqrt{1-h^2}e^{-\beta})}{2\left(1-\sqrt{1-k^2}e^{-\alpha}\frac{(1+\sqrt{1-h^2}e^{-\beta})}{2}\right)}, \quad \tau_2 = \frac{T_2\sqrt{1-h^2}e^{-\gamma-j\phi}}{(1-\sqrt{1-h^2}e^{-\gamma-j\phi})}$$

— постоянные времени резонатора на связанных видах колебаний. Установлена особенность процесса накопления в системе, заключающаяся в проявлении некомпенсированной межвидовой связи на переходных процессах на фронте и спаде входного импульса в условиях компенсации связи в стационарном состоянии. Особенность проявляется в форме затухающих биений амплитуды выходной волны, идентичных биениям в системе

связанных резонаторов [13а], и может приводить к дополнительным потерям при накоплении (рис.3). Показано, что подбором параметров системы доля теряемой энергии может быть понижена до уровня, не влияющего на энергетические характеристики системы. В компрессоре с взаимодействующими добротными видами этот процесс может использоваться для повышения эффективности накопления. Показано также, что при передаче энергии к низкодобротному виду система позволяет регулировать мощность, длительность, частоту следования и форму огибающей выходных импульсов (Рис.4). Это достигается изменением электрической длины шлейфа, обеспечивающим режимы непрерывного или возможности дробного вывода энергии. Получены аналитические выражения для огибающих импульсов и оценены энергетические характеристики системы.

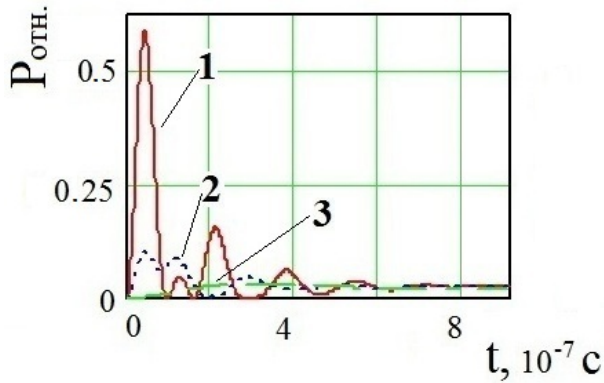


Рис.3. Огибающие СВЧ сигнала на вспомогательном виде колебаний при накоплении в системе с передачей энергии от добротного вида к добротному виду: $h = 0.05$, 1) $\phi = 0$; 2) $\phi = 0.005$; 3) $\phi = 0.05$.

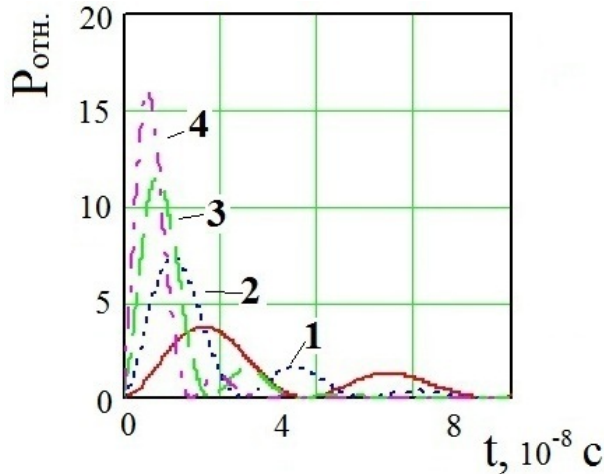


Рис.4. Огибающие выходного СВЧ импульса при выводе энергии в системе с передачей от добротного вида к виду предельно низкодобротному: $h = 0.05$ 1) $\phi = 0.0$; 2) $\phi = 0.2$; 3) $\phi = 0.3$; 4) $\phi = 0.4$.

где $P_{отн.} = P_{вых.}/P_{б.в.р}$ — отношение мощности волны вспомогательного вида к мощности бегущей волны основного вида в резонаторе. На рис.5 приведены огибающие выходных импульсов, рассчитанные через рекуррентные соотношения при различной электрической длине шлейфа. Как видно из картин рис.5, изменение длины шлейфа ведет к быстрому изменению основных параметров формируемых СВЧ импульсов. Увеличение межвидовой связи ведет к эволюции огибающей к прямоугольной форме.

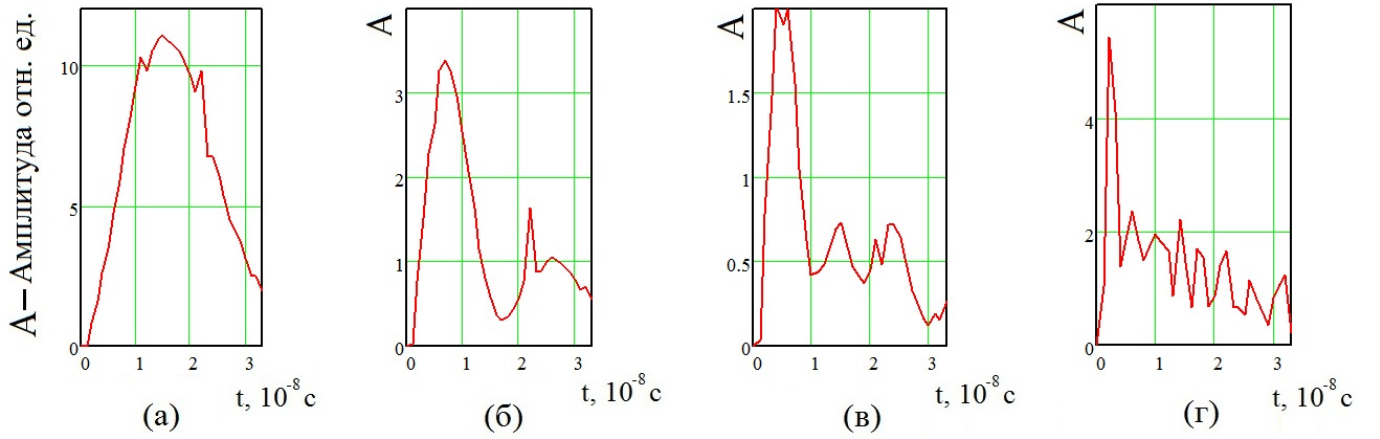


Рис.5. Огибающие выходных импульсов СВЧ при различной электрической длине шлейфа и выводе с передачей энергии от добротного вида к низкодобротному: $h = 0.4$ (а) $\phi = 0$; (б) $\phi = 0.6$; (в) $\phi = 1$; (г) $\phi = 1.57$.

Вторая глава включает в себя результаты расчета и проектирования макетов СВЧ компрессоров 3-см диапазона длин волн, а также данные их исследования на низком уровне мощности. Целью работы, результаты которой изложены в главе, являлось создание макетов и их подготовка к экспериментам на высоком уровне мощности. Основными задачами в этой части работы были выбор конструкции компрессоров, расчет характеристик и выявление особенностей поведения взаимодействующих видов колебаний.

В соответствии с этим в **разделе 2.1.** обоснован выбор геометрии резонаторов, выполнен расчет их размеров и электрофизических характеристик, а также ожидаемых значений коэффициента усиления и КПД компрессоров.

Расчет СВЧ компрессора с умеренно многомодовым резонатором представлен в **подразделе 2.1.1.** Компрессор с таким резонатором использован для исследования передачи энергии, как к добротному, так и предельно низкодобротному виду колебаний. Умеренно многомодовым резонатор выбран преднамеренно с целью более четкого выявления особенностей взаимодействия видов в условиях относительно низкой плотности спектра колебаний ($\delta N / \delta f \approx 10^3 \Gamma_y^{-1}$). Использован цилиндрический резонатор диаметром $\approx 1.5\lambda$ с пятью распространяющимися типами волн, где λ - длина волны в свободном пространстве. В качестве основного вида выбран высокодобротный аксиально-симметричный вид $H_{01(m)}$, роль вида вспомогательного отведена виду $H_{11(n)}$, сильно связанному с выходным волноводом.

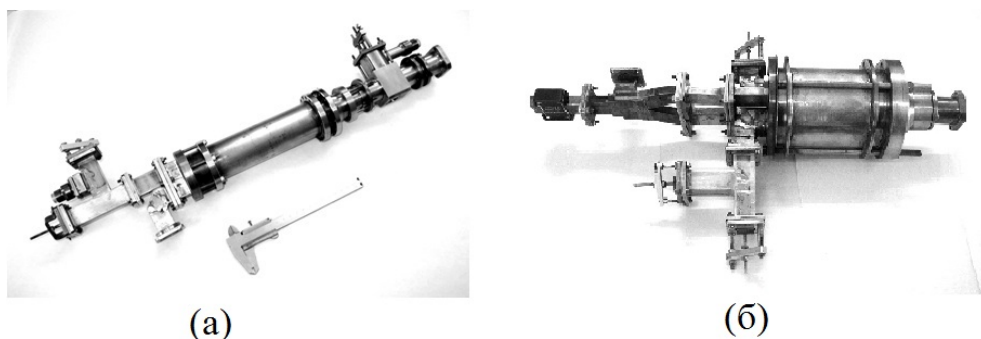


Рис.6. Внешний вид резонансного СВЧ компрессора 3-см диапазона длин волн с умеренно многомодовым резонатором (а) и с выводом энергии из сверхразмерного резонатора (б).

Окно связи выполнялось на входной торцевой стенке резонатора, на середине радиуса цилиндра. В этом месте расположен максимум магнитной составляющей поля основного вида и сопоставима величина магнитной составляющей вспомогательного вида. Это обеспечивало возможность реализации сильной связи между рабочими видами. Шлейфом служил H -тройник из прямоугольного волновода сечением $23 \times 10 \text{ мм}^2$. Выходом компрессора являлась вторая торцевая стенка резонатора, выполненная в форме плавного перехода чебышевского типа, запредельного для волны основного вида, согласованного для волны вспомогательного вида в полосе частот $\sim 1/T$, где T – время двойного пробега волны этого вида вдоль резонатора, и связанного с нагрузкой через одномодовый круглый волновод. Размеры резонатора выбиралась из условия совпадения частот рабочих видов в отсутствие паразитных видов в полосе частот $\sim 50 \text{ МГц}$. Высокая добротность вспомогательного вида обеспечивалась размещением в выходном волноводе H -тройника, закрытого при накоплении и передаче и открытого по завершении передачи. При передаче к низкодобротному виду этот тройник переводился в режим «открыто», что достигалось выбором длины его бокового плеча четвертьволновой. Приведены результаты расчета характеристик компрессора, выполненные с учетом влияния шлейфа на электрофизические характеристики резонатора.

В подразделе 2.1.2 представлены результаты расчета и проектирования СВЧ компрессора со сверхразмерным резонатором диаметром $\sim 3\lambda$ с более чем двадцатью распространяющимися по резонатору типами волн. Рабочими видами колебаний остались виды $H_{01(m)}$ и $H_{11(n)}$. В отличие от системы с умеренно многомодовым резонатором в этой системе возбуждение основного вида было предусмотрено как через одно, так и через два окна, расположенных симметрично на одном диаметре, ортогональном диаметру с двумя элементами межвидовой связи. Симметричное расположение элементов выбрано для компенсации сильной связи между видами в режиме накопления при любой одинаковой длине шлейфов. Внешний вид компрессора представлен на рис.6б.

Разделы 2.2 и 2.3 посвящены результатам экспериментального исследования СВЧ компрессоров на низком уровне мощности.

В **разделе 2.2** изложены данные исследований поведения рабочих видов при импульсном возбуждении и возбуждении в режиме частотной модуляции. Изучалась динамика процессов возбуждения при изменении параметров элемента межвидовой связи – размеров окна и электрической длины шлейфа, а также отличия частот взаимодействующих видов. Установлено, что для любых размеров окна, вплоть до размеров в полное сечение волновода шлейфа, имеется электрическая длина шлейфа, при которой преобразование видов и, следовательно, передача энергии в нагрузку по завершении процесса накопления отсутствует. Этот результат согласуется с данными теоретического анализа. Установлено также, что на переходных процессах при импульсном возбуждении имеет место трансформация с биениями амплитуды колебаний взаимодействующих видов. Однако вариацией длины шлейфа биения могут быть уменьшены до уровня, практически не влияющего на энергетические характеристики компрессора. Этот результат также находится в соответствии с данными теоретического анализа. Картины переходных процессов при возбуждении колебаний в режиме частотной и импульсной модуляции приведены на рис.7. Сигналы сняты для отраженной от резонатора волны и волны в выходном волноводе.

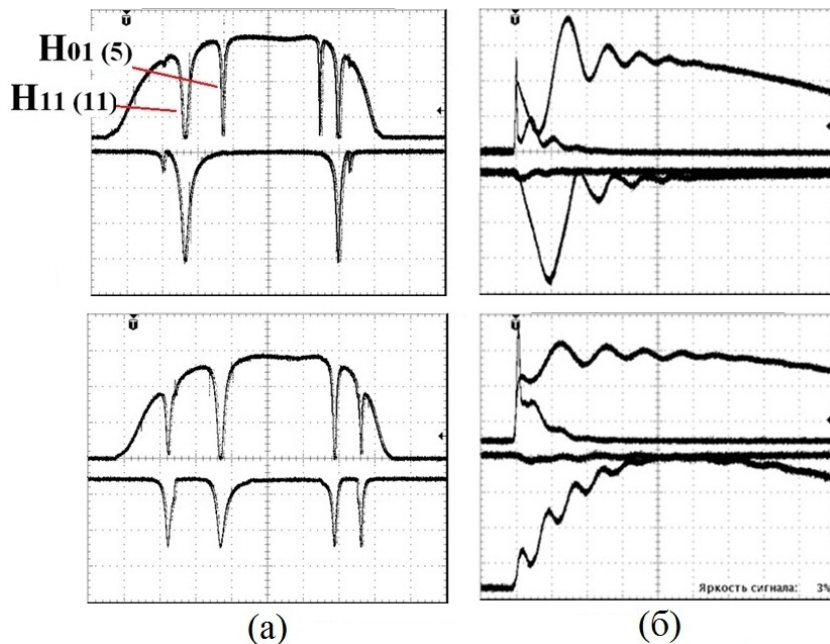


Рис.7. Картины переходных процессов в режиме частотной (а) и амплитудной (б) модуляции. Верхние осциллограммы – при компенсированной межвидовой связи, нижние – при некомпенсированной связи. В верхней половине осциллограммы приведен отраженный сигнал (1), в нижней половине — с выхода (2).

Осциллограммы демонстрируют возможность полного запираания основного рабочего вида колебаний при накоплении и сильную гибридизацию видов при выводе. Кроме того, они демонстрируют и возможность повышения эффективности накопления использованием режима биений, подобно тому, как это осуществляется в системе связанных резонаторов [13а].

Раздел 2.3 представляет данные экспериментального определения зависимостей коэффициента межвидовой связи от параметров элемента — размеров окна связи и электрической длины шлейфа. Коэффициент измерялся по известной функциональной связи с величиной отклика частот взаимодействующих видов колебаний в точке совпадения их парциальных частот. Полученные зависимости удовлетворительно согласуются с расчетными данными. Согласие может служить мерой достоверности оценок усиления компрессора и условия компенсации межвидовой связи. Расчетные и экспериментальные зависимости коэффициента межвидовой связи от параметров шлейфа приведены на рис.8.

В заключение главы формулируются ее основные результаты и выводы.

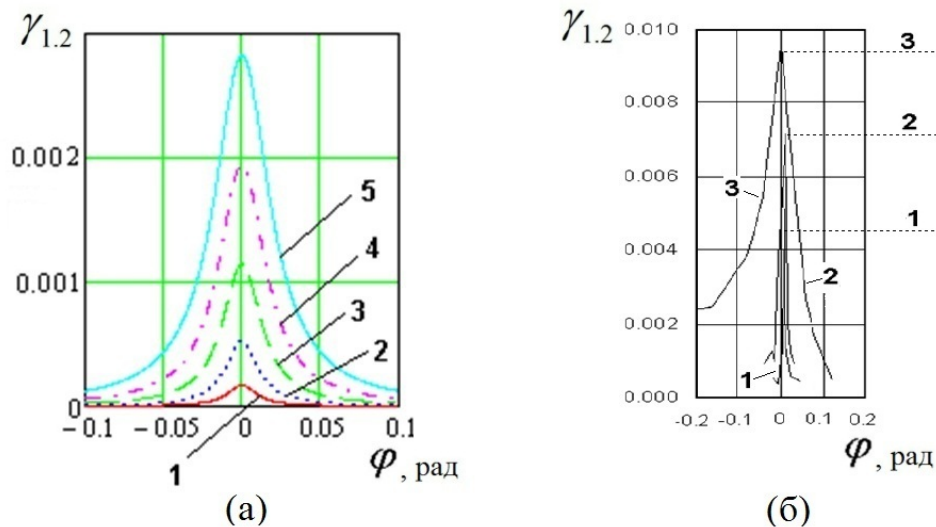


Рис.8. Расчетные зависимости коэффициента межвидовой связи γ_{12} (а): 1) $r = 6$ мм; 2) $r = 7$ мм; 3) $r = 8$ мм; 4) $r = 9$ мм; 5) $r = 10$ мм. Экспериментальные зависимости коэффициента γ_{12} (б): 1) $r = 8$ мм; 2) $r = 9$ мм; 3) $r = 10$ мм.

В **третьей главе** изложены результаты экспериментов с разработанными макетами СВЧ компрессоров на высоком уровне мощности. Во введении к главе формулируются цель и задачи экспериментов. Основная цель — проверка выводов теоретического анализа и оценок ожидаемых энергетических характеристик. Задачи — обеспечение работоспособности макетов, определение основных характеристик и выявление проблем.

В **разделе 3.1** представлены данные экспериментов с макетом СВЧ компрессора с умеренно многомодовым резонатором. На таком компрессоре исследован вывод как с передачей энергии к добротному, так и предельно низкодобротному виду колебаний. При передаче к добротному виду компрессор работал как аналог системы последовательной компрессии в связанных резонаторах [8]. Подтверждено, что такой вариант компрессора обеспечивает формирование мощных СВЧ импульсов с формой огибающей, близкой к прямоугольной. Процесс компрессии осуществлялся в два этапа. На первом этапе

энергия накапливалась на основном виде колебаний и после включения межвидовой связи быстро передавалась вспомогательному виду. После передачи открывался тройник в выходном волноводе, и энергия на волне вспомогательного вида за время двойного пробега волны вдоль резонатора выводилась в нагрузку. Получены импульсы СВЧ усилением 15 дБ , мощностью 1.5 МВт , длительностью $\sim 3\text{ нс}$. Эффективность передачи от вида к виду достигала ~ 0.7 , КПД составил ~ 0.1 . Осциллограмма процесса передачи без вывода энергии представлена на рис.9а, с выводом - на рис.9б.

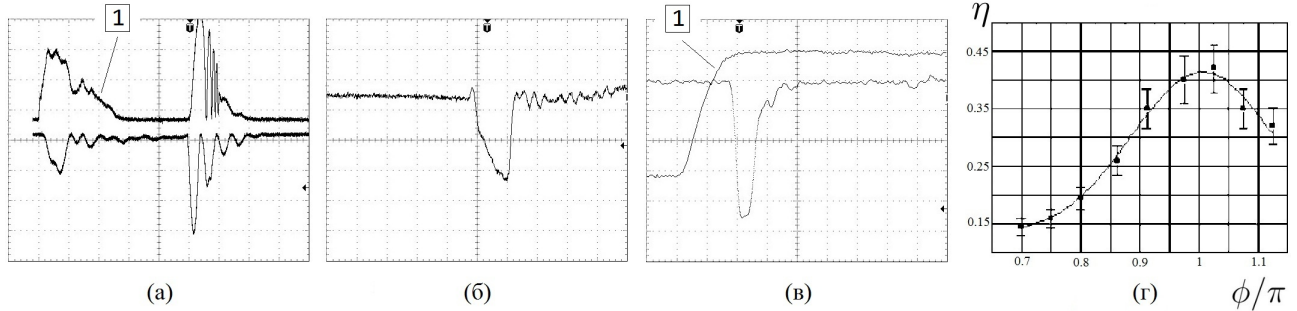


Рис.9. Осциллограммы переходного процесса при передаче энергии от добротного вида к виду добротному без вывода (а), с выводом (б) и огибающая выходного импульса (в). (г) – зависимость эффективности передачи η от электрической длины шлейфа ϕ . 1 — отраженный сигнал.

Осциллограмма выходного СВЧ импульса приведена на рис.9в. Рис.9г демонстрирует зависимость эффективности передачи от электрической длины шлейфа при диаметре окна связи 10мм. Полученные данные показывают, что использование в компрессоре такого типа более длинного накопительного резонатора или замедляющей линии может позволить формировать мощные и относительно длинные, более 10 нс на метр длины резонатора, импульсы СВЧ с практически прямоугольной огибающей.

На этом же компрессоре исследован процесс передачи энергии к виду предельно низкодобротному. Результаты приведены в разделе 3.2. В такой системе тройник в выходном волноводе, как в режиме накопления, так и в режиме вывода, находился в состоянии «открыто». Система позволила изучить динамику изменения межвидовой передачи энергии при изменении параметров элемента связи - размеров окна связи и электрической длины шлейфа. Получено хорошее качественное согласие с расчетными данными. На компрессоре продемонстрирована возможность формирования импульсов СВЧ с регулируемой мощностью, длительностью, огибающей и частотой следования. Подтверждено, что определяющую роль в управлении параметрами импульсов играет электрическая длина шлейфа. Динамика изменения мощности, длительности и огибающей импульсов отражена осциллограммами

рис.10а-в. Рис.10в демонстрирует осциллограмму огибающей импульса, практически идентичную огибающей импульса при выводе энергии через тройник (рис.10г). Отличие в усилении импульсов, формируемых этими способами, не превышало 1 дБ и достигало, соответственно, ~ 9 и $\sim 10\text{ дБ}$ при длительности ~ 9 и $\sim 11\text{ нс}$, мощности ~ 0.4 и 0.5 МВт , соответственно. Величина КПД составляла ~ 0.08 и ~ 0.11 .

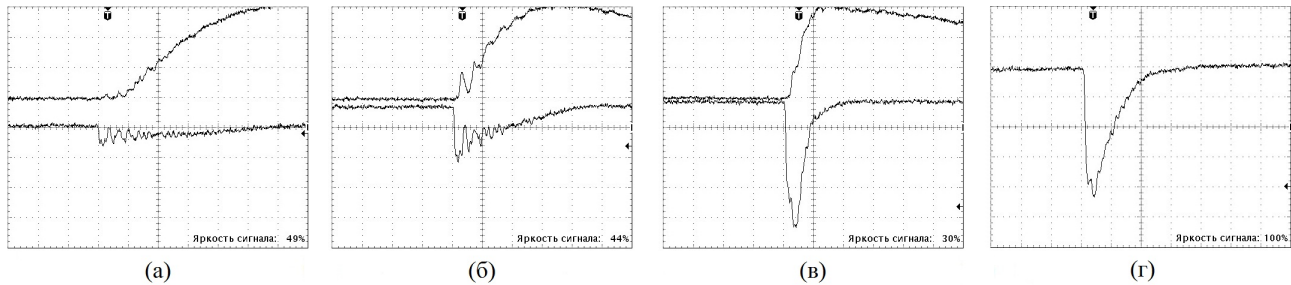


Рис.10. Огибающие выходных СВЧ импульсов при передаче энергии к предельно низкодобротному виду для различной межвидовой связи; (г) при выводе энергии через тройник. В верхней части осциллограмм отображен отраженный сигнал.

В этой серии экспериментов подтверждена также возможность дробного вывода энергии с формированием импульсов суб- или наносекундной длительности. Такой вывод реализуется при выборе общей электрической длины прямых плеч тройника, равной длине входного плеча и обеспечивающей отсутствие межвидовой связи. Длительность импульсов задается временем двойного пробега волны вдоль шлейфа, по истечении которого межвидовая связь отключается. В экспериментах длительность составила $\sim 0.85\text{ нс}$ при усилении $\sim 3\text{ дБ}$ и мощности $\sim 0.1\text{ МВт}$ (рис.11).

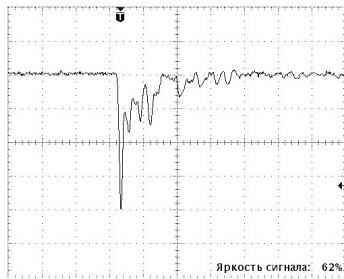


Рис.11. Огибающая субнаносекундного СВЧ импульса.

Раздел 3.3 посвящен результатам исследования вывода энергии при ее передаче к виду предельно низкодобротному в сверхразмерном резонаторе с диаметром $\sim 3\lambda$. Сверхразмерность резонатора позволила организовать на его торцевой стенке две пачки элементов межвидовой связи (по два тройника в каждой), расположенные симметрично на одном диаметре на серединах радиусов. Симметричное возбуждение основного вида и симметричное расположение элементов связи позволяло компенсировать связь видов при любой одинаковой длине входных плеч тройников. Это важно для оптимизации системы по электрической прочности и добротности. На системе проверена возможность формирования как импульсов СВЧ наносекундной длительности

при полном выводе энергии, так и серии субнаносекундных СВЧ импульсов в пределах входного импульса при дробном выводе. Эксперименты подтвердили возможность формирования при таком выводе серии СВЧ импульсов субнаносекундной длительности с частотой следования свыше 1 МГц в пределах входного импульса компрессора. На этой же системе проверено суммирующее действие синхронно и синфазно срабатывающих элементов связи. Установлено, что наличие в компрессоре суммирующего устройства, в роли которого выступает резонатор, дает возможность наращивания мощности импульсов таким способом. Синхронное включение двух элементов позволило увеличить мощность импульсов на $\sim 2 \text{ дБ}$. Примеры осциллограмм огибающих СВЧ импульсов, формируемых компрессором со сверхразмерным накопительным резонатором, представлены на рис.12.

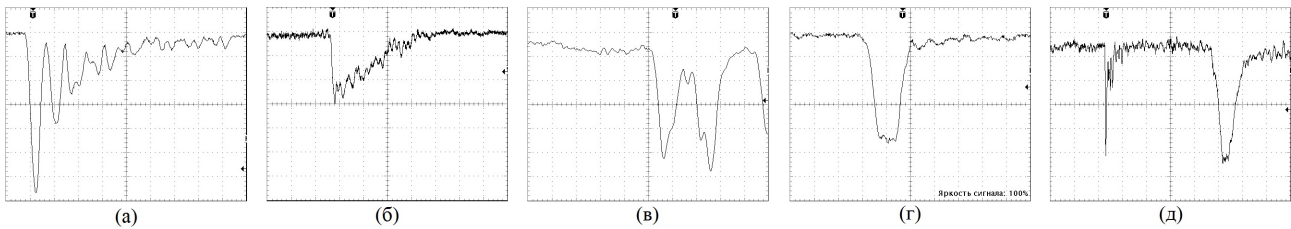


Рис.12. Выходные СВЧ импульсы, формируемые при полном (а) - (б), дробном (в), (г) и смешанном выводе энергии (д) из сверхразмерного резонатора.

Основные результаты диссертационной работы:

1. Предложен защищенный патентом резонансный СВЧ компрессор с выводом энергии управляемой трансформацией вида колебаний накопительного резонатора и регулируемыми параметрами выходных импульсов.

2. Выполнен анализ переходных процессов для двух граничных случаев передачи энергии в резонаторе — от добротного вида к виду добротному и от добротного к предельно низкодобротному. Оценены эффективность передачи, коэффициент усиления и КПД компрессора для этих случаев. Показана возможность формирования мощных СВЧ импульсов с прямоугольной огибающей при передаче энергии к добротному виду и импульсов с регулируемыми параметрами при передаче к виду предельно низкодобротному.

3. Проанализирована работа СВЧ компрессора исследуемой конфигурации – с выводом энергии трансформацией вида колебаний на окне связи резонатора с короткозамкнутым волноводным шлейфом. Определено условие компенсации связи резонатора с нагрузкой и оценено усиление компрессора. Показано, что эффективность формирования СВЧ импульсов в таком компрессоре может быть сопоставимой с эффективностью формирования в известных активных СВЧ компрессорах.

4. Разработана и проанализирована модель резонансного СВЧ компрессора с выводом энергии трансформацией вида колебаний на окне связи резона-

тора с короткозамкнутым волноводным шлейфом. Установлены особенности процессов накопления и вывода в таком компрессоре. Показана возможность формирования в компрессоре наносекундных СВЧ импульсов с регулируемой мощностью, длительностью и огибающей при непрерывном выводе энергии, а также серии субнаносекундных СВЧ импульсов в пределах импульса возбуждения при дробном выводе.

5. Основываясь на результатах анализа, рассчитаны, спроектированы и изготовлены действующие макеты резонансных СВЧ компрессоров 3-см диапазона длин волн с исследуемым способом вывода энергии. На макетах на низком уровне мощности исследованы переходные процессы при импульсном возбуждении резонатора со шлейфом и возбуждении в режиме частотной модуляции, а также зависимости межвидовой связи от параметров элемента связи. Установлены закономерности поведения взаимодействующих видов колебаний и основные факторы, определяющие эффективность взаимодействия. Получено удовлетворительное численное соответствие экспериментальных данных и результатов теоретического анализа, подтверждающее адекватность описания процессов на основе принятой модели.

6. Выполнены исследования действующих макетов разработанных СВЧ компрессоров на высоком уровне мощности. Подтверждена возможность формирования СВЧ импульсов с регулируемыми параметрами при выводе энергии трансформацией вида колебаний на управляемом элементе межвидовой связи. В частности, подтверждена возможность формирования наносекундных СВЧ импульсов с прямоугольной формой огибающей, а также наносекундных импульсов СВЧ с регулируемыми параметрами при непрерывном выводе энергии. Показана возможность повышения мощности формируемых импульсов суммирующим действием синхронно и синфазно срабатывающих элементов связи. Показана также сопоставимость эффективности вывода исследуемым способом и вывода через Н-тройник. Подтверждена возможность формирования субнаносекундных СВЧ импульсов с высокой частотой следования в пределах входного импульса при дробном выводе энергии.

7. По результатам исследований сформулированы базовые принципы проектирования резонансных СВЧ компрессоров с выводом энергии трансформацией вида колебаний на окне связи резонатора с короткозамкнутым волноводным шлейфом. Принципы сводятся к следующему:

а) Для формирования наиболее мощных импульсов с прямоугольной огибающей необходимо обеспечить передачу энергии от добротного вида к виду добротному с последующим выводом энергии в нагрузку;

б) Формирование мощных импульсов с регулируемыми параметрами возможно при передаче энергии к виду предельно низкодобротному. Для повышения мощности может использоваться аддитивное действие пакета синхронно срабатывающих элементов связи;

в) Формирование серии суб- и наносекундных импульсов СВЧ с высокой частотой следования в пределах входного импульса компрессора возможно при дробном выводе энергии с пакетом элементов связи.

Основным результатом работы является создание действующих макетов резонансного СВЧ компрессора с регулируемыми параметрами выходных импульсов. В комплексе с разработанными в [15а,16а] сверхразмерными интерференционными СВЧ переключателями такие системы могут позволить создавать мощные СВЧ компрессоры с регулируемыми параметрами импульсов в источниках питания линейных резонансных ускорителей.

Список публикаций по теме диссертации:

1. Игумнов В.С. Межмодовая передача энергии в накопительном объеме резонансного СВЧ компрессора с трансформацией мод // Перспективы развития фундаментальных наук : труды VI Международной конференции студентов и молодых ученых, Томск, 26-29 мая 2009 г. в 2 т. / Томский политехнический университет (ТПУ) ; под ред. Г. А. Вороновой. — 2009. — Т. 1 . — С. 109-111

2. Августинovich В.А., Артеменко С.Н., Новиков С.А., Игумнов В.С. Резонансный СВЧ компрессор. Патент на полезную модель. №89285 Бюл.№33 от 27.11.2009

3. Артеменко С.Н., Августинovich В.А., Дьяченко В.Ф., Игумнов В.С., Новиков С.А. Резонансная компрессия СВЧ импульсов в паре связанных мод сверхразмерного резонатора // Изв. ВУЗов Физика. 2009. № 11/2. С.301-306

4. Артеменко С.Н., Игумнов В.С. Резонансный СВЧ компрессор. Патент на полезную модель. №94062 Бюл.№13 от 10.05.2010

5. Igumnov V., Avgustinovich V., Artemenko S., Novikov S. and Yushkov Yu. Series Compression of Microwave Pulses by Using Two Coupled Modes of Overmoded Cavity // Proceedings of 16th Intern. Sympos. On High Current Electronics, Tomsk, Russia, 19-24 September, 2010, P.474-477

6. Августинovich В.А., Артеменко С.Н., Игумнов В.С., Новиков С.А., Юшков Ю.Г. Компрессия СВЧ импульсов двумя связанными модами сверхразмерного резонатора // Электромагнитные волны и электронные системы. 2011. Т.16, №7, С.43-45.

7. Августинovich В.А., Артёменко С.Н., Игумнов В.С., Новиков С.А., Юшков Ю.Г. Формирование нано- и субнаносекундных СВЧ импульсов при выводе энергии из резонатора трансформацией моды колебаний // Изв. ВУЗов. Физика. 2011. Т.54. № 11/2. С.224-229.

8. Августинovich В.А., Артеменко С.Н., Игумнов В.С. Исследование механизма регулирования межмодовой связи в СВЧ компрессоре с трансформацией колебаний // Изв. ВУЗов. Физика 2012. Т.16, №7, С.43-45.

9. Igumnov V., Avgustinovich V., Artemenko S., Novikov S. and Yushkov Yu. Simulation of Compression in the Cavity of the Microwave Pulses with the Output Energy of the Oscillations Transformation // Abstract book of 3rd International Congress on Radiation Physics and Chemistry of Condensed Matter, High Current Electronics and Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows, Tomsk, Russia, 17-21 September, 2012, p.202-203
10. Igumnov V., Avgustinovich V., Artemenko S., Novikov S. and Yushkov Yu. Modeling of Output Power in a Resonant Microwave Compressor with The Transformation of The Oscillations // Proceedings of 7th international forum on strategic technology, Tomsk, Russia, 17-21 September, 2012, Vol. 2, p. 405-409
11. Igumnov V. S., Avgustinovich V. A., Artemenko S. N. Modeling Process of Interaction Electromagnetic Waves in a Resonant Microwave Compressor // 2012 IEEE 13th International Conference and Seminar of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2012), Altai, Erlagol, Russia, 2 – 6 July 2012, pp.80-84
12. Артеменко С.Н., Игумнов В.С. Способ и устройство формирования субнаносекундных СВЧ импульсов. Патент на изобретение. №94062 Бюл.№13 от 10.05.2013
13. Августинович В.А., Артеменко С.Н., Игумнов В.С., Юшков Ю.Г. Формирование импульсов с регулируемыми параметрами в резонансном СВЧ компрессоре с трансформацией моды колебаний // Письма в ЖТФ. 2013.Т.39, №17,С.43-45.
14. Артеменко С.Н., Игумнов В.С. Усиление мощности резонансного СВЧ компрессора с выводом энергии трансформацией моды колебаний // Известия ТПУ. 2013.Т.16, №7,С.43-45.
15. Igumnov V., Avgustinovich V., Artemenko S., Novikov S. and Yushkov Yu. Formation of Pulses with Controlled Parameters in a Resonance Microwave Compressor Employing Oscillation Mode Transformation // Technical Physics Letters, 2013, Vol.39, №9,P.755-757
16. Igumnov V. S. Gain power radio signal in a resonant microwave compressor with the transformation of vibration modes // 2013 IEEE 14th International Conference and Seminar of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2013), Altai, Erlagol, Russia, 1 – 5 July 2013, pp. 63-67

Цитируемая литература:

- 1а. Диденко А.Н., Юшков Ю.Г. Мощные СВЧ-импульсы наносекундной длительности. М.: Энергоатомиздат, 1984 г., 112 с.
- 2а. Богданович Б.Ю. Системы высокочастотного питания линейных ускорителей электронов с накоплением энергии СВЧ поля. М.: МИФИ, 2002. 96 с.
- 3а. Диденко А.Н., Малыхин А.В. и др. Разработка установки для форми-

рования методом компрессии наносекундных СВЧ-импульсов мощностью до 1ГВт. ISBN 5-7262-0523-5. Научная сессия МИФИ-2004. Том 8, С. 32-33.

4а. Farcas Z.D., Hogg H.A., Loew G.A., Wilson P.B. SLED: A Method of Doubling SLAC's Energy // Proc. 9-th Conf. on High Energy Accelerator, SLAC, Stanford, CA, USA, May 2-7, 1974. P.576-582.

5а. Wilson P.B., Farkas Z.D., Ruth R.D., SLED-II: A new method of RF pulse compression // Proc. of Linear Accl. Conf., Albuquerque, NM, SLAC-PUB-5330 (1990).

6а. Lavine T. L. RF pulse compression in the NLC. Test Accelerator at SLAC // Stanford Linear Accelerator Center, Stanford University, California 94309; SLAC-PUB-95-6742.

7а. Balakin V. E., Syrachev I. V. A New Approach in RF Power Multiplication // VLEPP-Note-06/1990, 1990.

8а. Иванников В.И., Черноусов Ю.Д., Шеболаев И.В. Быстрый вывод СВЧ энергии из резонатора // ЖТФ. Т.65. В.5. 1995. С.194-197.

9а. Артеменко С.Н., Каминский В.Л., Юшков Ю. Г. Вывод энергии из резонансного СВЧ накопителя. ЖТФ. Т.7. В.24. 1981. С.1529-1533.

10а. Артеменко С.Н., Каминский В.Л., Юшков Ю.Г. Накопление и вывод энергии на Н01 волне из цилиндрического резонатора. ЖТФ. Т.56. В.7. 1986. С.1424-1425.

11а. Вихарев А.Л., Горбачев А.М., Иванов О.А. и др. Активный компрессор СВЧ-импульсов на осесимметричной моде круглого волновода. // Письма в ЖТФ, 1998, Т.24, №20, С.6-11.

12а. Вихарев А.Л., Горбачев А.М., Иванов О.А., Исаев В.А., Колданов В.А., Кузиков С.В., Хиршфилд Дж.Л., Голд С.Х. Двухканальный 100-мегаваттный СВЧ компрессор трехсантиметрового диапазона длин волн // Изв. вузов. Радиофизика, 2008, т. 51, № 8, с. 660–674.

13а. Иванников В.И., Черноусов Ю.Д., Шеболаев И.В. Переходные процессы в паре связанных резонаторов // Письма в ЖТФ. 2013.Т.65, №5, С.162-167.

14а. Штейншлейгер В.Б. Явления взаимодействия волн в электромагнитных резонаторах. М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1955 г., 114 с.

15а. Августинович В.А, Артёменко С.Н., Жуков А.А. Вывод СВЧ-энергии из резонатора через сверхразмерный интерференционный переключатель // Письма в ЖТФ 2013, Т.39, вып. 10, С.89-94.

16а. Артёменко, Августинович. Артеев. Синхронный вывод СВЧ-энергии из резонаторов через пакет интерференционных переключателей // Письма в ЖТФ 2013г. Т. 39, вып. 23, С.26-33.