



На правах рукописи

Припутнев Павел Владимирович

**Формирование мощных наносекундных высокочастотных импульсов в
частично заполненных ферритом коаксиальных линиях с различными
дисперсионными свойствами**

Специальность 1.3.5 – физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН).

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, директор ФГУБН Института сильноточной электроники (ИСЭ) СО РАН Романченко Илья Викторович

Официальные оппоненты: Самсонов Сергей Викторович – доктор физико-математических наук, профессор РАН, заведующий лабораторией, Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород.

Малютин Николай Дмитриевич – доктор технических наук, профессор, Профессор кафедры конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры (КУДР) радиоконструкторского факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН)

Защита состоится 10 сентября 2024 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.115.02 (Д 003.031.01) при ИСЭ СО РАН по адресу: 634055, г. Томск, проспект Академический 2/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭ СО РАН и на сайте <https://hcei.tsc.ru/ru/obrazovanie/dissertations.html>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук

Озур Г.Е.



Общая характеристика работы

Актуальность тематики исследования

Разработка источников мощных импульсов высокочастотного излучения ведётся уже около пятидесяти лет. На сегодняшний день можно выделить более десяти подходов к генерации мощного СВЧ-излучения. Основным является использование энергии интенсивных электронных потоков для получения наносекундных импульсов СВЧ-излучения. Начиная с 1990-х годов, появились излучательные системы без электронных пучков, такие как сверхширокополосные системы, твердотельные системы, нелинейные передающие линии.

Эти источники не требуют вакуума, катодов с высокой эмиссионной способностью, имеющих ограниченный ресурс, для их работы не требуется защита от сопутствующего рентгеновского излучения и магнитные поля для транспортировки электронных пучков. Среди них отдельную группу составляют нелинейные передающие линии (НПЛ) с ферритовым заполнением, насыщенным во внешнем магнитном поле. В дециметровом диапазоне длин волн они по своим характеристикам сравнимы с пучковыми приборами СВЧ-электроники. Мощность генерируемых в них импульсов может достигать субгигаваттного уровня, а частота следования импульсов может достигать 1 кГц.

Хотя разработка генераторов на основе нелинейных передающих линий с насыщенным ферритом ведется уже около двадцати лет и базируется на теории ударных электромагнитных волн Горьковской радиофизической научной школы, законченная обобщённая теория возбуждения высокочастотных колебаний в таких линиях пока не была построена. Изначально, линии с ферритовым заполнением использовались для обострения фронтов высоковольтных импульсов до субнаносекундных значений. Впоследствии, после добавления в конфигурацию линий дисперсионных свойств, не связанных с необратимыми процессами, была продемонстрирована эффективная генерация наносекундных высокочастотных импульсов. Сегодня нет полной ясности в вопросе максимальной эффективности преобразования энергии высоковольтных импульсов в высокочастотные колебания при использовании НПЛ с ферритом, а именно в физических механизмах, отвечающих за максимальный КПД устройств. В силу отсутствия законченных аналитических моделей, решение данной задачи видится только в численном и реальном эксперименте.

С точки зрения практической реализации генераторов на основе НПЛ с насыщенным ферритом, перспективным видится использование постоянных магнитов для насыщения ферритового заполнения линии, поскольку для этой цели необходимые магнитные поля отличаются от релятивистских вакуумных приборов в меньшую сторону. Известные на сегодняшний день схемы с постоянными магнитами не показали высокой эффективности.

Реализация новых схем генераторов на основе линий с насыщенным ферритом и постоянными магнитами требует применения новых конфигураций линий, дисперсионные свойства которых не связаны с прецессией вектора намагниченности феррита.

Цель и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы являлось исследование механизмов, определяющих эффективность и частоту генерации высокочастотных импульсов в передающих линиях с насыщенным ферритом в схемах с однородным ферритовым заполнением, где используются соленоиды для его насыщения, и в схемах с периодическими структурами из постоянных магнитов.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1. Определение в численном моделировании и эксперименте основных физических факторов и механизмов, определяющих эффективность генерации высокочастотных импульсов и частоту возбуждаемых колебаний в нелинейных передающих линиях с однородным ферритовым заполнением.

2. Разработка конфигурации коаксиальной передающей линии с периодическим расположением ферритов и постоянных магнитов для эффективной генерации высокочастотных импульсов электромагнитного излучения.

3. Установление механизмов, определяющих частоту возбуждаемых колебаний и возможность перестройки частоты в нелинейной передающей линии с гофрированным внутренним проводником, ферритом и постоянными магнитами.

Научная новизна

1. В численном эксперименте определены характеристики нелинейной передающей линии с однородным ферритовым заполнением, при которых достигается максимальная эффективность преобразования энергии высоковольтного импульса в высокочастотные колебания (импеданс линии, коэффициент поперечного заполнения, диэлектрическая проницаемость феррита и др.)

2. Построена физическая модель возбуждения высокочастотных колебаний в линии с однородным ферритовым заполнением, позволяющая объяснить характер зависимости частоты возбуждаемых колебаний от поперечных размеров линии и диэлектрической проницаемости ферритового заполнения.

3. Для коаксиальной линии с гофрированным внутренним проводником и периодическим расположением колец из постоянных магнитов и ферритов показано, что при распространении в ней высоковольтного импульса с субнаносекундным фронтом происходит возбуждение высокочастотных колебаний и нарастание их мощности с увеличением длины линии передачи.

4. Показано, что при увеличении амплитуды падающего импульса (и азимутальной компоненты магнитного поля в линии передачи) наблюдается рост частоты возбуждаемых колебаний в гофрированной конфигурации линии с ферритом.

5. Показано, что коаксиальная линия с гофрированным внутренним проводником и периодически расположенными кольцами из постоянных магнитов и ферритов по дисперсионным свойствам подобна линии с сосредоточенными параметрами, в которой присутствует емкостная связь между соседними ячейками.

Теоретическая и практическая значимость

Исследование основных факторов, влияющих на эффективность генерации высокочастотных импульсов в линиях с однородным ферритовым заполнением, позволяет улучшить энергетические параметры источников высокочастотного излучения на их основе.

Результаты исследования процесса возбуждения высокочастотных колебаний в коаксиальной линии с гофрированным внутренним проводником и периодическим расположением колец из постоянных магнитов и ферритов позволили создать ряд генераторов высокочастотных импульсов, охватывающих диапазоны частот от 0.7 до 1.7 ГГц, от 2.3 до 2.7 ГГц и от 3 до 3.6 ГГц с использованием шести конфигураций гофрированных линий передачи. Пиковая мощность генераторов достигает 800 МВт.

Использование постоянных магнитов для насыщения ферритового заполнения приводит к значительному улучшению массогабаритных характеристик генераторов и источников на основе нелинейных передающих линий. При этом увеличивается полная энергоэффективность устройств из-за отсутствия систем питания соленоидов.

Методы исследования, достоверность и обоснованность результатов

Выполненные в рамках диссертационной работы исследования включают численное моделирование и эксперименты. Численное моделирование проводилось FDTD-методом. Результаты, полученные в реальных экспериментах, представляют собой измерения наносекундных высоковольтных импульсов и их обработку. Методика проведения экспериментов описана в приложении 2.

Результаты работы подтверждаются использованием современных апробированных методов проведения экспериментов и обработки полученных данных. Полученные в моделировании и экспериментах данные хорошо сопоставляются друг с другом и обладают воспроизводимостью. Результаты экспериментов и моделирования, полученные в работе, согласуются с результатами исследований по данной тематике, представленными в литературе.

Положения, выносимые на защиту

1. Оптимальной конфигурацией коаксиальной линии передачи, содержащей феррит, насыщенный внешним магнитным полем, для генерации высокочастотных электромагнитных

колебаний с точки зрения энергоэффективности, является конфигурация с двухслойным заполнением промежутка линии слоем феррита, граничащим с внутренним проводником линии, и слоем диэлектрика с диэлектрической проницаемостью много меньшей, чем у феррита. При этом импеданс линии должен лежать в пределах 25–35 Ом, а возбуждающий импульс иметь отрицательную полярность на внутреннем проводнике.

2. Возбуждение высокочастотных колебаний в линии с двухслойным заполнением: слой феррита, граничащий с внутренним проводником и слой диэлектрика с диэлектрической проницаемостью, много меньшей, чем у феррита, происходит за счет дисперсионного разбега гармоник волны E_{00} от субнаносекундного фронта импульса напряжения, крутизна которого поддерживается за счет импульсного перемагничивания феррита. Дисперсия волны E_{00} определяет зависимость частоты возбуждаемых колебаний от поперечных размеров линии и феррита.

3. При подаче высоковольтных импульсов с амплитудой от 30 кВ до 360 кВ на вход коаксиальной линии с гофрированным внутренним проводником и периодически расположенными кольцами из постоянных магнитов и насыщенного феррита происходит генерация высокочастотных импульсов длительностью до 12 нс в диапазоне частот 0.6–3.7 ГГц. Максимальная пиковая мощность 800 МВт получена в линиях с импедансом 20 Ом и 28 Ом при амплитуде возбуждающего импульса 360 кВ и 300 кВ соответственно.

4. Частота колебаний, возбуждаемых в коаксиальной линии с гофрированным внутренним проводником и периодически расположенными кольцами из постоянных магнитов и насыщенного феррита, возрастает при уменьшении поперечных размеров линии и при увеличении азимутального магнитного поля, определяемого напряжением в возбуждающем импульсе. Дисперсионные свойства передающей линии, определяющие частоту колебаний, могут быть описаны в модели дискретной линии передачи с емкостной связью между соседними ячейками.

Апробация результатов

Результаты диссертационной работы были представлены на конференциях: 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects 2020, Tomsk, Russian Federation; International Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering (APITECH-III-2021), Krasnoyarsk, Russian Federation; 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects 2022, Tomsk, Russian Federation; 2023 IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Altai Republic, Russia; 10ая международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики, 2023, Томск, Российская Федерация; The 51st IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS) and the 4th Asia-Pacific Conference on Plasma and Terahertz Science (APCOPTS), 2024, Пекин, Китай.

Личный вклад автора

Вклад автора заключается в обсуждении и постановке целей и задач работы. Основная часть результатов, представленных в диссертационной работе, получена лично автором. Реализация FDTD-метода моделирования линий передач с ферритовым заполнением в коде KARAT была осуществлена д.ф.-м.н. В.П. Таракановым. Вклад в подготовку экспериментальных исследований, представленных в работе, оказали сотрудники лаборатории нелинейных электродинамических систем Института сильноточной электроники СО РАН С.Н. Мальцев, Р.К. Собянин и В.О. Кутенков. Автором выдвинуты защищаемые научные положения, составлены выводы к работе.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, двух приложений и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 175 страниц, включая 103 рисунка. Список литературы включает 106 наименований.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, показана теоретическая и практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

Первая глава посвящена обзору литературы по тематике исследования. Рассмотрены основные научно-технические результаты развития технологий нелинейных передающих линий с ферритом в хронологическом порядке: теория ударных электромагнитных волн, линии для обострения фронтов импульсов напряжения, генераторы на основе линий с ферритом и пространственной дисперсией, одноканальные и многоканальные СВЧ источники на основе коаксиальных линий с насыщенным ферритом.

Вторая глава включает в себя апробацию и применение моделирования линий с насыщенным ферритом FDTD методом с использованием кода KARAT. В коде, насыщенный феррит описывается как феноменологическая среда, возбуждающая в линии вихревой ток, связанный с прецессией вектора намагниченности феррита:

$$\mathbf{J}_c = \text{rot } \mathbf{M}, \quad (1)$$

где \mathbf{M} – вектор намагниченности среды, определяемый из уравнения Ландау-Лифшица. Вихревой ток входит в уравнения Максвелла в виде слагаемого следующим образом:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{J}_c. \quad (2)$$

Моделирование проводилось для трех версий кода: осесимметричная, трехмерные декартовая и цилиндрическая. Трехмерное моделирование показало, что возбуждение несимметричных колебаний не наблюдается.

Показано, что частота возбуждаемых колебаний в коаксиальных линиях с насыщенным ферритом имеет сильную зависимость от поперечных размеров линии и ферритовых колец при фиксированных значениях аксиального поля подмагничивания и усредненного по радиусу кольца азимутального магнитного поля.

Таблица 1. Зависимость частоты возбуждаемых в НПЛ колебаний от поперечных размеров линии и ферритовых колец.

№	Диаметр проводников коаксиальной линии, мм	Диаметры ферритовых колец, мм	Центральная частота колебаний
Геометрия 0	112×56	91×56	0.9 ГГц
Геометрия 1	80×40	65×40	1.1 ГГц
Геометрия 2	56×28	45×28	1.5 ГГц
Геометрия 3	40×20	32×20	1.9 ГГц
Геометрия 4	28×14	23×14	2.6 ГГц
Геометрия 5	20×10	16×10	3.3 ГГц
Геометрия 6	14×7	11×7	3.8 ГГц

Уменьшение поперечных размеров линии с ферритом в 1.4 раза приводит к росту частоты возбуждаемых колебаний в среднем в 1.3 раза, что говорит о том, что основной механизм, ответственный за возбуждение колебаний в линии насыщенным ферритом связан не только с прецессией вектора намагниченности феррита.

Частота колебаний имеет сильную зависимость от диэлектрической проницаемости феррита в случае, когда феррит граничит с внутренним проводником коаксиальной линии. При увеличении диэлектрической проницаемости до 20, частота колебаний уменьшается в 2–3 раза в зависимости от поперечных размеров линии, после чего уменьшение частоты замедляется. С ростом диэлектрической проницаемости до тех же значений амплитуда колебаний увеличивается.

Результаты моделирования показали, что максимальная амплитуда первого колебания высокочастотного импульса достигается при коэффициенте поперечного заполнения НПЛ ферритом 0.4–0.6. При этом в случае, когда максимальна эффективность, частота колебаний минимальна. Увеличение или уменьшение коэффициента поперечного заполнения приводит к росту частоты колебаний и резкому падению их мощности. Максимальная эффективность

преобразования энергии видеопульса в высокочастотные колебания наблюдается, когда ферритовые кольца располагаются внутри коаксиала с импедансом от 25 до 35 Ом.

В линии с насыщенным ферритом отличны от нуля все шесть компонент электромагнитного поля. Это говорит о том, что процесс возбуждения высокочастотных колебаний в линии передачи с насыщенным ферритом связан не только с ТЕМ-волной. Амплитуда колебаний азимутальной и аксиальной компонент вектора напряженности электрического поля сравнима с амплитудой радиальных колебаний. Структура поля волны на выходе НПЛ в коаксиале без феррита с масляным заполнением представляет собой структуру ТЕМ волны. Это связано с тем, что частоты отсечки следующих за ТЕМ мод выше, чем частота возбуждаемых в линии колебаний.

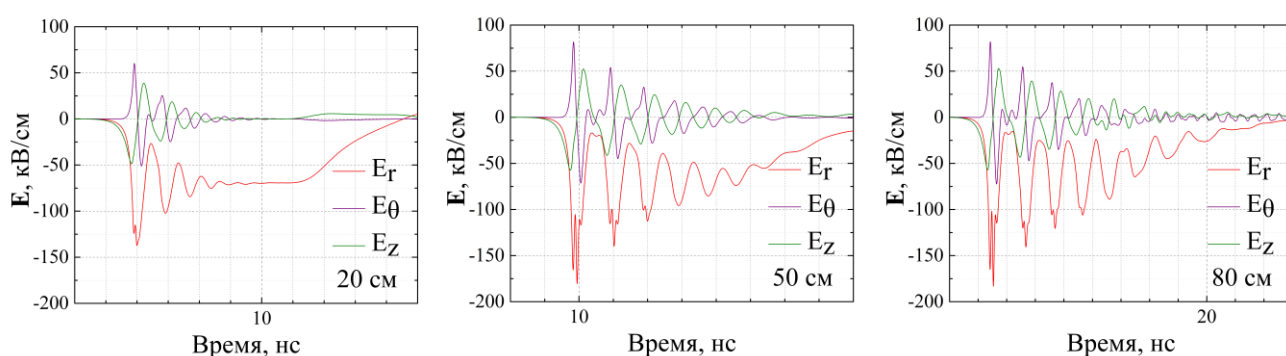


Рисунок 1. Временная зависимость компонент напряженности электрического поля на различных длинах НПЛ (геометрия 1).

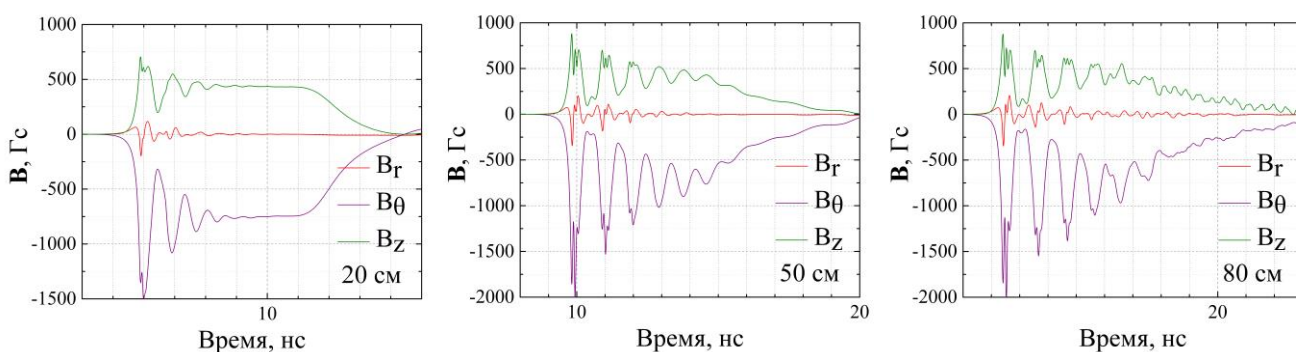


Рисунок 2. Временная зависимость компонент вектора магнитной индукции на различных длинах НПЛ (геометрия 1).

По мере распространения импульса напряжения в НПЛ происходит насыщение мощности колебаний на длине порядка 1 метра. При дальнейшем распространении волны амплитуда колебаний начинает уменьшаться, частота колебаний также непрерывно уменьшается, что проявляется в увеличении интервалов между локальными максимумами импульса напряжения. Уменьшение частоты и амплитуды колебаний в импульсе на выходе линии с ростом ее длины

указывает на дисперсионное расплывание импульса. Начиная с некоторой длины линии, форма импульса начинает стремиться к квазистационарной.

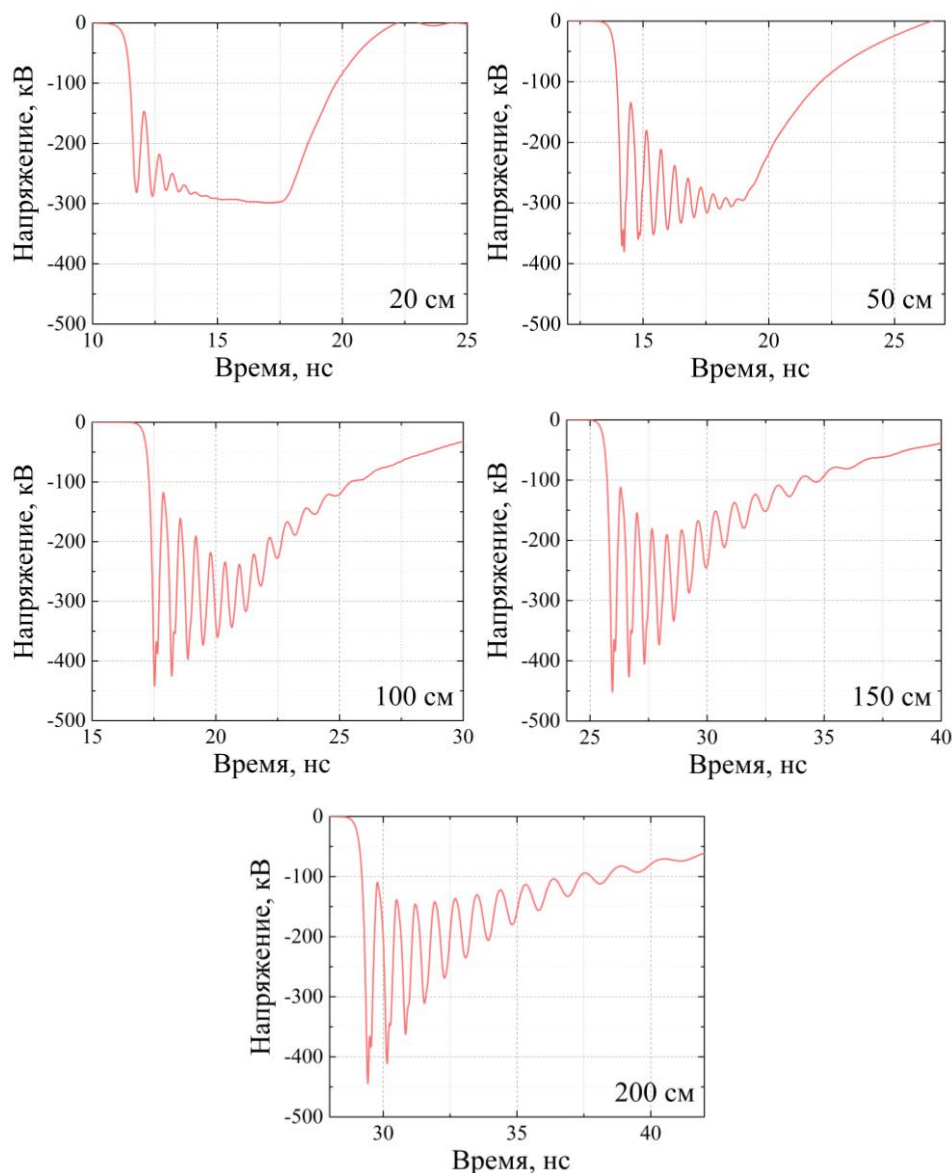


Рисунок 3. Динамика волнового импульса с изменением длины НПЛ в (геометрия 2).

Третья глава посвящена численному моделированию и экспериментальному исследованию влияния конфигурации коаксиальной линии с ферритом на эффективность возбуждаемых колебаний.

Результаты численного моделирования показывают, что на мощность и частоту высокочастотных импульсов, генерируемых в НПЛ с насыщенным ферритом, оказывает сильное влияние положение ферритовых колец. В случае, когда феррит расположен между проводниками симметрично относительно среднего радиуса линии, амплитуда первого колебания в среднем в 1.5 раза меньше, чем в случае, когда феррит граничит с одним из

проводников коаксиальной линии. При этом, при симметричном расположении феррита частота колебаний в 1.5 раза выше, чем в двух других предельных случаях.

В численном моделировании и эксперименте показано, что даже малый зазор между внутренним проводником линии передачи и ферритом приводит к значительному падению мощности возбуждаемых в НПЛ колебаний. Согласно результатам моделирования для различных геометрий линий с отличающимися поперечными размерами, наличие зазора 1–1.5 мм между ферритовым кольцом и внутренним проводником приводит к уменьшению амплитуды первого колебания на 10–80%. Зазор между ферритом и внутренним проводником в моделировании приводит к росту частоты колебаний на 20–30%.

В эксперименте для НПЛ (геометрия 2) при диаметре внутреннего проводника 25 см, амплитуда первого колебания в импульсе на выходе НПЛ в 2–2.5 раза меньше, чем при диаметре внутреннего проводника 28 см, что соответствует зазору между ферритом и внутренним проводником в 1.5 мм. При одной и той же величине поля подмагничивания центральная частота колебаний в линии с проводником диаметром 25 мм выше в среднем на 0.2 ГГц, чем в НПЛ с проводником 28 мм во всем диапазоне рабочих напряжений.

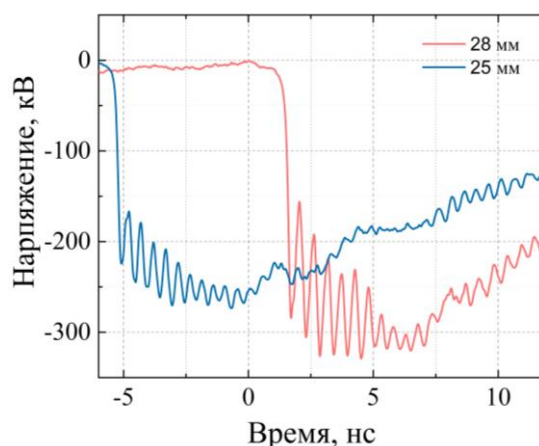


Рисунок 4. Осциллограммы напряжения на выходе НПЛ для двух диаметров внутреннего проводника (геометрия 2). Амплитуда падающего импульса 300 кВ, поле подмагничивания 55 кА/м.

В моделировании и эксперименте показано, что направление азимутального магнитного поля, в отличие от аксиального поля подмагничивания, влияет на процесс возбуждения высокочастотных колебаний. В случае разных полярностей падающего импульса напряжения, т.е. при разном направлении азимутальной компоненты напряженности магнитного поля, формы импульсов напряжения на выходе НПЛ значительно различаются. Частота колебаний при положительной полярности выше, чем при отрицательной. При этом амплитуда колебаний

выше в случае отрицательной полярности импульса напряжения, подаваемого на вход НПЛ. Простая аналитическая оценка, подкреплённая численным расчётом, указывает на то, что направление азимутальной компоненты магнитного поля, в отличие от аксиальной компоненты, влияет на вихревой ток в феррите на фронте импульса напряжения, в момент начала импульсного перемагничивания феррита.

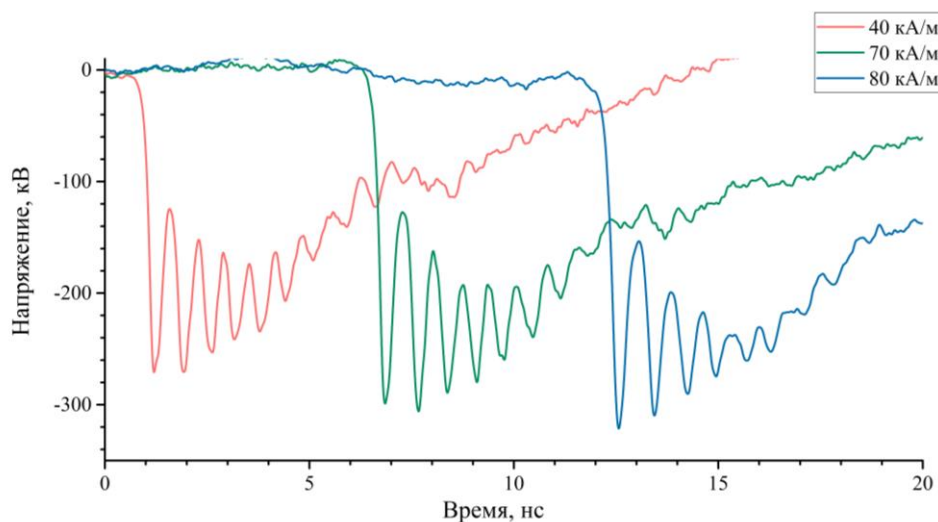


Рисунок 5. Осциллограммы импульсов напряжения на выходе НПЛ (геометрия 2) при отрицательной полярности падающего импульса амплитудой 240 кВ при разных величинах поля подмагничивания.

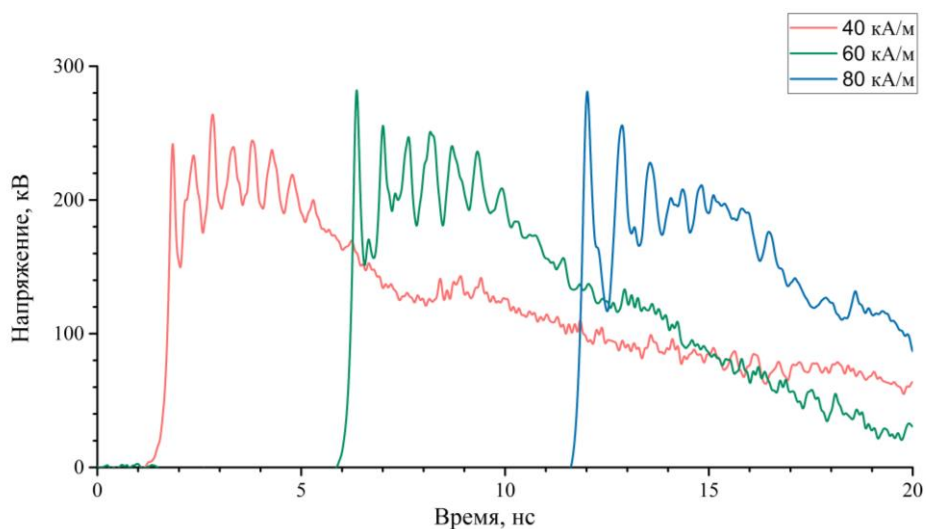


Рисунок 6. Осциллограммы импульсов напряжения на выходе НПЛ при положительной полярности падающего импульса амплитудой 240 кВ при разных величинах поля подмагничивания.

В четвертой главе сформулирована модель процесса возбуждения колебаний в линии со сплошным насыщенным ферритовым заполнением, прижатом к одному из проводников линии,

объясняющая зависимости частоты и эффективности возбуждаемых колебаний, полученные в диссертационной работе. За формирование высокочастотного импульса за фронтом импульса напряжения отвечают два механизма. В начале на очень малой длине линии формируется ударная электромагнитная волна, затем за счет процесса дисперсионного расплывания фронта импульса напряжения высокочастотная энергия начинает отекать от ее фронта. Насыщенный феррит поддерживает фронт импульса напряжения квазистационарным, преобразуя энергию постоянного тока в высокочастотную энергию. Таким образом в линии существуют два конкурирующих процесса: обострение фронта импульса напряжения и его дисперсионное расплывание, формирующее за ним высокочастотные колебания напряжения в линии передачи. Рост частоты возбуждаемых колебаний при уменьшении поперечных размеров НПЛ определяется дисперсионными свойствами волны E_{00} .

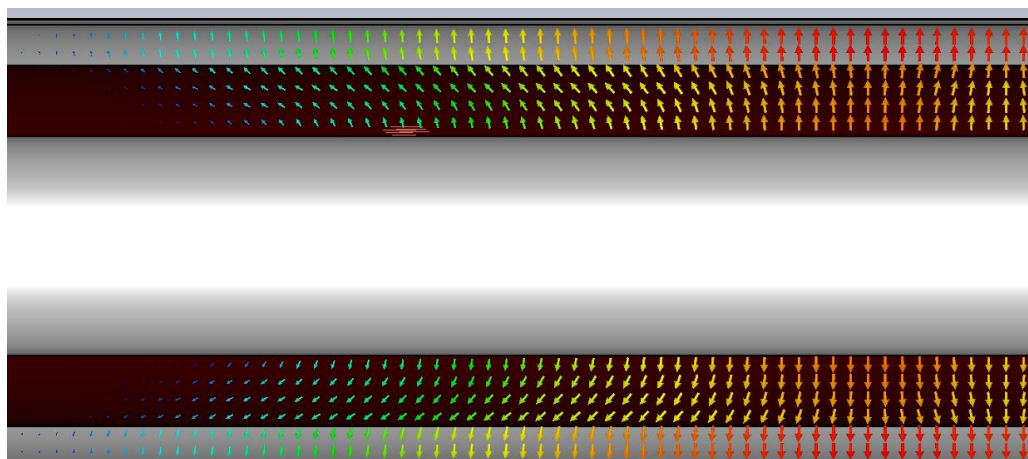


Рисунок 7. Структура электрического поля волны E_{00} в коаксиальной линии.

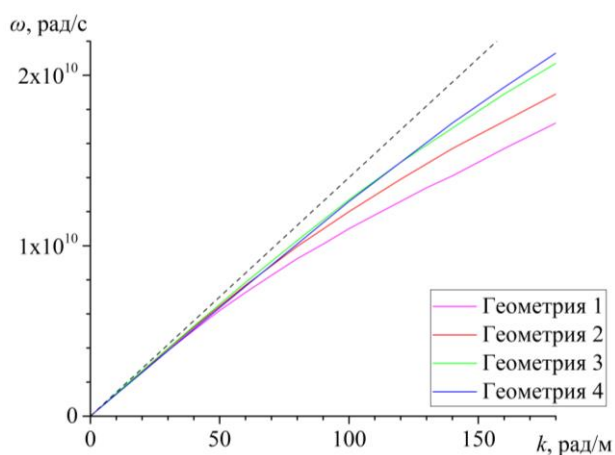


Рисунок 8. Дисперсионные зависимости волны E_{00} для двухслойных коаксиалов разных поперечных размеров, соответствующие НПЛ различных поперечных размеров.

Согласно наблюдаемым зависимостям, наибольшая амплитуда возбуждаемых колебаний, также наблюдается в случае, когда основным дисперсионным механизмом является дисперсия поверхностной волны. За перестройку частоты при изменении компонент вектора напряженности магнитного поля ответственен механизм дисперсии, связанный с прецессией вектора намагниченности феррита, поскольку замедление волн за счет дисперсии волны E_{00} более существенное в диапазоне частот, в котором наблюдается возбуждения колебаний в линиях определенной конфигурации. При удалении феррита от проводников влияние дисперсии поверхностной волны уменьшается, а дисперсия, связанная с прецессией вектора намагниченности, начинает играть определяющую роль.

В пятой главе представлена конфигурация коаксиальной нелинейной передающей линии с насыщенным ферритом в поле колец из постоянных магнитов и гофрированным внутренним проводником (ГНПЛ). Кольца из постоянных магнитов намагничены аксиально и создают магнитное поле не во всем объеме линии, а лишь в малой части, где располагается ферритовое кольцо.

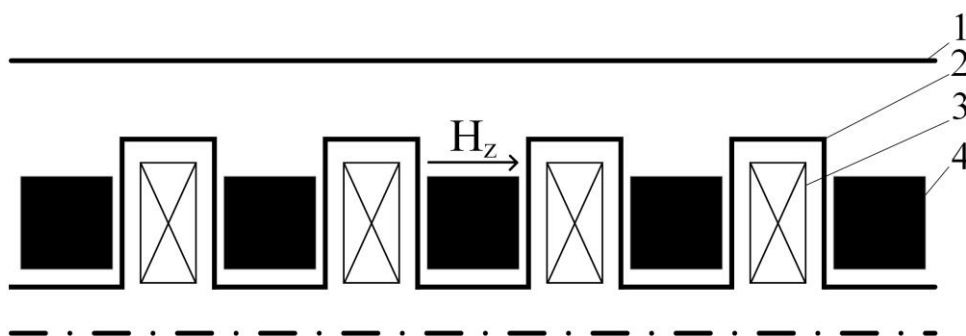


Рисунок 9. Схема НПЛ с гофрированным внутренним проводником и чередующимися ферритовыми и магнитными кольцами. 1 – внешний проводник, 2 – внутренний гофрированный проводник, 3 – постоянный кольцевой неодимовый магнит, 4 – ферритовое кольцо.

Динамика импульса напряжения в ней представляет собой обострение его фронта на первом этапе, затем в линии происходит рост мощности высокочастотных колебаний, однако при этом с ростом длины линии мощность не выходит на насыщение, как это наблюдается в НПЛ с однородным заполнением ферритом. Сравнение близких по параметрам и размерам ГНПЛ и НПЛ с однородным ферритовым заполнением показывает, что в ГНПЛ возможна генерация высокочастотных импульсов большей длительности. С ростом амплитуды падающего импульса (с ростом азимутального магнитного поля внутри феррита) возрастает частота генерации. При увеличении напряжения рост частоты замедляется. При повышении аксиального поля внутри ферритовых колец, как и в НПЛ с однородным ферритовым заполнением, происходит уменьшение частоты генерации. При этом увеличение

напряженности аксиального магнитного поля внутри ферритового кольца не приводит к существенному падению мощности высокочастотных колебаний на выходе ГНПЛ.

Дисперсионная зависимость коаксиальной передающей линии с гофрированным внутренним проводником аналогична дисперсионной зависимости дискретной линии передачи с емкостными связями между соседними ячейками линии.

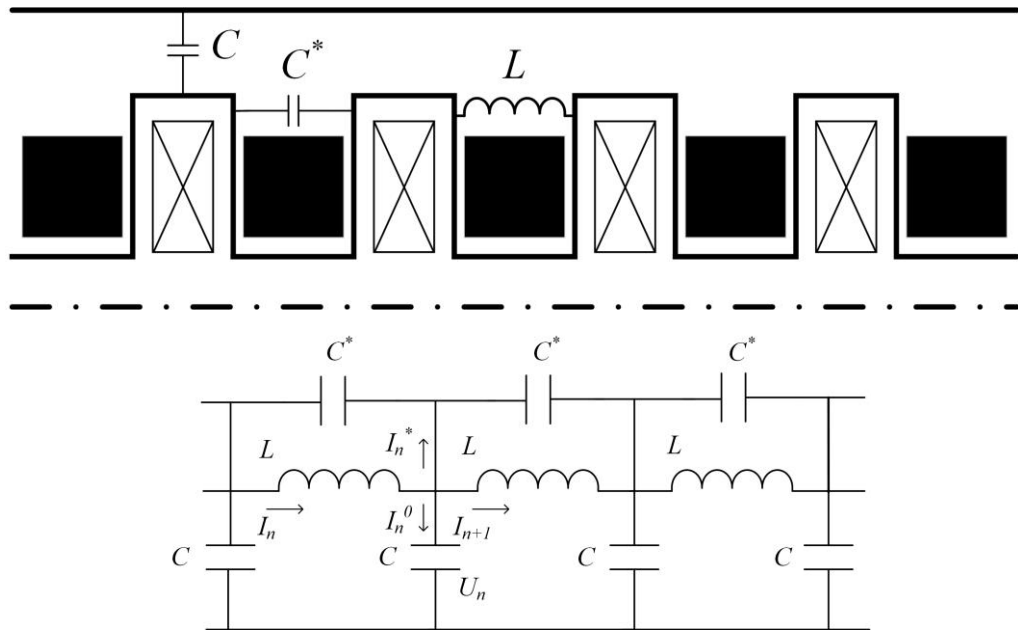


Рисунок 10. Схема замещения гофрированной коаксиальной передающей линии.

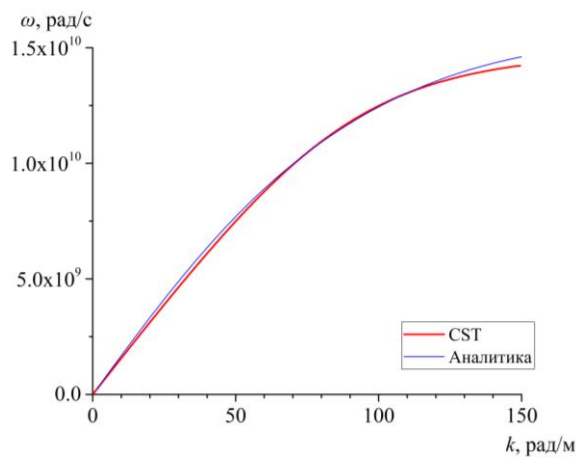


Рисунок 11. Дисперсионные зависимости для ГНПЛ, полученные аналитически и с использованием моделирования в CST Studio.

Дисперсионные кривые полученные с использованием модели линии с сосредоточенными параметрами и емкостной связью и с использованием трехмерного моделирования в CST Studio хорошо соотносятся друг с другом для различных конфигураций линий с гофрированным

внутренним проводником. При переходе к меньшим поперечным размерам линии, в которой наблюдается генерация колебаний на частоте выше 2 ГГц, емкостная связь между ячейками линии становится пренебрежимо малой. В этом случае дисперсионная зависимость линии передачи определяется дисперсией линии передачи с сосредоточенными параметрами. Уменьшение поперечных размеров ГНПЛ приводит к росту частоты генерации, вследствие изменения дисперсионных свойств линии.

Шестая глава посвящена экспериментальному исследованию шести конфигураций линий с гофрированным внутренним проводником и ферритом, насыщенным в поле постоянных магнитов. Эффективность преобразования энергии видеоимпульса в радиоимпульс для всех линий в представленных экспериментах составляет 2–6%. В экспериментах получена рекордная на сегодняшний день пиковая мощность для линии с насыщенным ферритом 800 МВт. Длительность высокочастотного импульса в линии с центральной частотой 2.7 ГГц имеет длительность 6 нс.

Таблица 2. Характеристики ГНПЛ.

	R_f , мм	R_{fi} , мм	Импеданс, Ом	Число ячеек
ГНПЛ1	22.5	14	25	100
ГНПЛ2	6	3	22	80
ГНПЛ3	16	10	22	100
ГНПЛ4	22.5	14	28	100
ГНПЛ5	16	10	28	100
ГНПЛ6	5	3	28	100

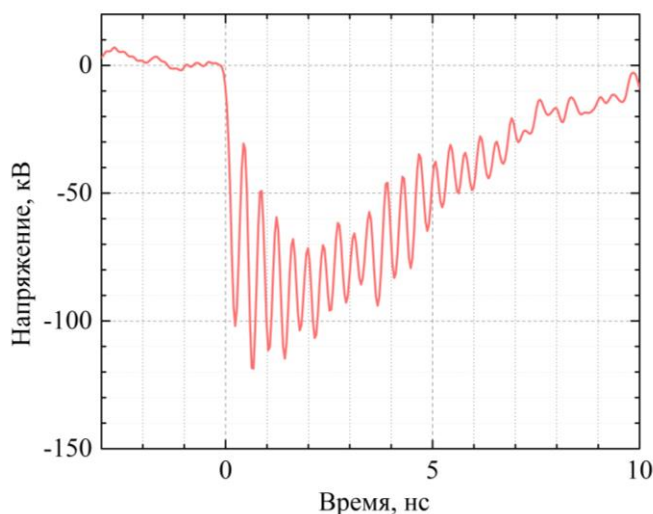


Рисунок 12. Импульса напряжения на выходе ГНПЛ2.

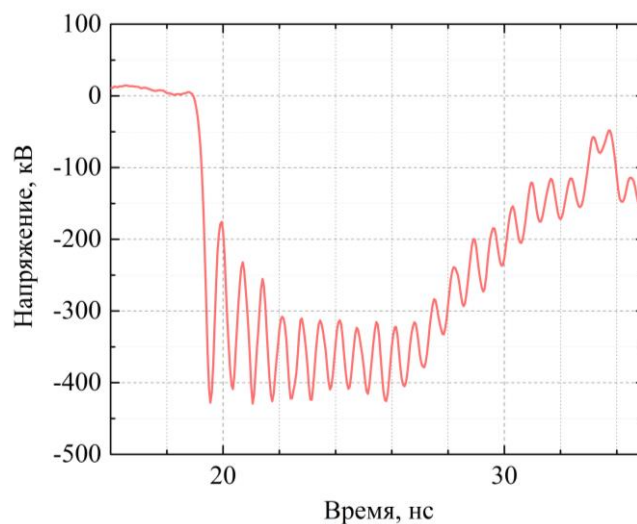


Рисунок 13. Импульс напряжения на выходе ГНПЛ4.

Таблица 3. Энергетические характеристики ГНПЛ.

	Рабочее напряжение, кВ	Длительность импульса, нс	Пиковая мощность, МВт
ГНПЛ1	100–320	5	110
ГНПЛ2	20–100	6	68
ГНПЛ3	150–360	12	800
ГНПЛ4	150–300	12	800
ГНПЛ5	140–350	9	350
ГНПЛ6	60–190	4	170

Таблица 4. Частотные характеристики ГНПЛ.

	Рабочая полоса частот, ГГц	Ширина спектра, (-10 дБ) ГГц
ГНПЛ1	0.95–1.32	0.19
ГНПЛ2	2.3–2.7	0.19
ГНПЛ3	1.2–1.45	0.1
ГНПЛ4	0.7–1.1	0.18
ГНПЛ5	1.2–1.7	0.27
ГНПЛ6	3–3.6	0.13

С ростом амплитуды падающего импульса наблюдается выход центральной частоты генерируемых высокочастотных импульсов на стационарное значение.

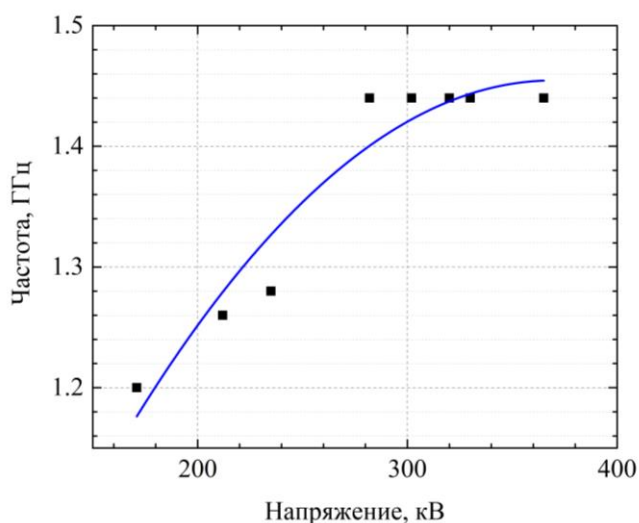


Рисунок 14. Зависимость центральной частоты импульса от напряжения падающего импульса в ГНПЛЗ.

При увеличении аксиального магнитного поля внутри ферритового кольца наблюдается уменьшение частоты генерации и одновременное уменьшение длины генерируемого импульса, что было продемонстрировано для ГНПЛ №3. С уменьшением аксиального поля внутри феррита частота генерируемого импульса растет. В слабых магнитных полях внутри феррита наблюдается увеличение длительности генерируемого импульса.

В заключении подведены краткие итоги диссертационной работы. Автор выражает благодарность научному руководителю и всем коллегам, учувствовавшим в подготовке и проведении исследований, представленных в диссертации.

Список публикаций автора по теме диссертации

1. Pripitnev, P. 2-D And 3-D Numerical Simulation of Ferrite Loaded Coaxial Transmission Lines / P. Pripitnev, I. Romanchenko, V. Tarakanov, I. Pegel // 2020 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE), Tomsk, Russia. – 2020. DOI: 10.1109/EFRE47760.2020.9241904.
2. Pripitnev, P.V. Nonlinear gyromagnetic transmission line design optimization for increasing radiopulse generation efficiency / P.V. Pripitnev [et al.] // J. Phys.: Conf. Ser. – 2021. – Vol. 2094. – P. 022070. DOI: 10.1088/1742-6596/2094/2/022070.
3. Pripitnev, P.V. RF Pulse Generation in a Gyromagnetic Nonlinear Transmission Line With Periodically Placed Ferrites and Permanent Magnets / P.V. Pripitnev [et al.] // IEEE Microwave

- and Wireless Components Letters. – 2022. – Vol. 32, No. 5. – P. 471-474. DOI: 10.1109/LMWC.2021.3138964.
4. Priputnev, P.V. Influence of voltage pulse polarity on excitation of high-frequency oscillations in a nonlinear transmission line with saturated ferrite / P.V. Priputnev, [et al.] // 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects, Tomsk, Russia. – 2022. DOI: 10.56761/EFRE2022.S3-P-921201.
 5. Mutylin, O.O. Dependence of the oscillations frequency in a nonlinear transmission line with saturated ferrite on magnetic fields and line dimensions / O.O. Mutylin [et al.] // 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects, Tomsk, Russia. – 2022. DOI: 10.56761/EFRE2022.S6-P-021201.
 6. Припутнев, П.В. Системы и технологии на основе нелинейных передающих линий с ферритом / П.В. Припутнев, И.В. Романченко, В.В. Ростов // ЖТФ. – 2023. – Т. 93, № 5. – С. 595-570. DOI: 10.21883/JTF.2023.05.55453.230-22.
 7. Priputnev, P. High efficiency radio frequency pulse generation in a nonlinear corrugated coaxial transmission line with ferrite saturated by permanent magnets / P. Priputnev [et al.] // Rev. Sci. Instrum. – 2023. – Vol. 94, no. 5. DOI: 10.1063/5.0144386.
 8. Priputnev, P.V. High Power Nanosecond RF Pulse Generation in Nonlinear Transmission Lines with Spatial Dispersion / P.V. Priputnev [et al.] // 2023 IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Altai, Russia. – 2023. DOI: 10.1109/EDM58354.2023.10225026.
 9. Priputnev, P.V. Measuring the Dielectric Permittivity of NiZn Ferrite Rings / P.V. Priputnev, A.I. Klimov, R.K. Sobyenin // Russ. Phys. Jour. – 2023. Vol. 66, no. 8. DOI: 10.1007/s11182-023-03018-8.
 10. Priputnev, P.V. Generation of Sub-Gigawatt Nanosecond Pulses of Microwave Radiation Based on a Coaxial Corrugated Transmission Line with Ferrite / P.V. Priputnev, I.V. Romanchenko, R.K. Sobyenin, V.Y. Konev // Russ. Phys. Jour. – 2023. – Vol. 66, no. 6. DOI: 10.1007/s11182-023-03019-7.
 11. Способ генерации мощных импульсов СВЧ-излучения наносекундной длительности / И.В. Романченко, В.Ю. Конев, П.В. Припутнев. // Патент на изобретение 2753420 16.08.2021. Заявка №2021106419 от 12.03.2021.