

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт сильноточной электроники
Сибирского отделения Российской академии наук



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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физ.-мат. наук
Романченко Илья Викторович

Томск – 2024

Оглавление

Введение.....	5
Глава 1 Обзор исследований нелинейных передающих линий с ферритом с целью обострения фронта высоковольтных импульсов и генерации СВЧ-импульсов.....	12
1.1. Место нелинейных передающих линий в СВЧ-электронике высоких мощностей.....	12
1.2. Ударные электромагнитные волны	16
1.3. Генераторы СВЧ-импульсов на основе НПЛ с ферритом	21
1.4. Методы анализа и моделирования нелинейных передающих линий с ферритом	30
Глава 2 Моделирование передающих линий с насыщенным ферритом	33
2.1. Методика моделирования.....	33
2.2. Апробация метода моделирования.....	35
2.3. Зависимость частоты возбуждаемых колебаний поперечных размеров линии	41
2.4. Структура электромагнитных полей в линии с насыщенным ферритом	45
2.5. Зависимость параметров генерируемых ВЧ импульсов от диэлектрической проницаемости феррита	50
2.6. Зависимость эффективной магнитной проницаемости линии с насыщенным ферритом от магнитных полей.....	56
2.7. Зависимость частоты и эффективности генерации высокочастотных импульсов в НПЛ от коэффициента поперечного заполнения ферритом	60
2.8. Зависимость мощности высокочастотного импульса от волнового сопротивления передающей линии	62
2.9. Изменение волнового импульса с ростом длины пробега по линии	65
Выводы к главе 2	69
Глава 3 Влияние конфигурации нелинейной передающей линии с насыщенным ферритом на эффективность генерации высокочастотных импульсов	71
3.1. Влияние расположения ферритовых колец в поперечном сечении линии на эффективность генерации высокочастотных импульсов.....	71
3.2. Влияние зазора между ферритом и внутренним проводником на эффективность	74

3.3. Экспериментальное исследование влияния зазора между ферритом и внутренним проводником на эффективность генерации.....	76
3.4. Возбуждение высокочастотных колебаний в нелинейной передающей линии импульсами напряжения разной полярности	78
3.5. Эксперименты по возбуждению колебаний в нелинейной передающей линии импульсами напряжения разной полярности	85
3.6. Выводы к главе 3	87
Глава 4 Модель возбуждения высокочастотных колебаний импульсом напряжения с субнаносекундным фронтом в коаксиальной передающей линии с двухслойным заполнением диэлектриком.....	89
4.1. Распространение импульса напряжения с субнаносекундным фронтом в коаксиальной передающей линии с двухслойным заполнением диэлектриком	89
4.2. Дисперсионные свойства волны E_{00} линии передачи поверхностной волны	96
4.3. Модель возбуждения мощных высокочастотных колебаний в коаксиальной передающей линии с насыщенным ферритом при распространении в ней импульса напряжения с субнаносекундным фронтом	100
4.4. Основные выводы к главе 4	103
Глава 5 Нелинейные коаксиальные передающие линии с гофрированным внутренним проводником и насыщенным ферритовым заполнением.....	104
5.1. Использование постоянных магнитов для насыщения ферритового заполнения коаксиальной передающей линии.....	104
5.2. Коаксиальная передающая линия с гофрированным внутренним проводником и периодическим расположением колец из постоянных магнитов и насыщенного феррита.....	108
5.3. Динамика возбуждения высокочастотных колебаний при распространении высоковольтного импульса в нелинейной передающей линии с гофрированным внутренним проводником.....	111
5.4. Спектральные характеристики импульсов высокочастотных колебаний, генерируемых в гофрированных линиях передачи с насыщенным ферритом.	117
5.5. Механизм дисперсии в коаксиальной передающей линии с гофрированным внутренним проводником.....	122
5.6. Основные выводы к главе 5	127
Глава 6 Экспериментальное исследование генерирования наносекундных импульсов высокочастотных колебаний в гофрированных нелинейных передающих линиях с насыщенным ферритом	129

6.1. Конфигурации гофрированных нелинейных передающих линий.....	129
6.2. Генерирование высокочастотных импульсов в гофрированных нелинейных линиях передачи. Зависимость мощности колебаний от напряжения падающей волны	130
6.3. Спектральные характеристики импульсов, генерируемых в нелинейных передающих линиях с гофрированным внутренним проводником.....	142
6.4. Генерирование СВЧ-импульсов в гофрированных нелинейных передающих линиях с использованием ферритов различных марок	147
6.5. Зависимость характеристик генерируемых импульсов от аксиального магнитного поля внутри феррита	149
6.6. Нелинейная передающая линия с гофрированным внутренним проводником и ферритовым кольцами, насыщаемыми полем внешнего соленоида	152
6.7. Основные выводы к главе 6	154
Заключение	155
Приложение 1 Измерение диэлектрической проницаемости ферритовых колец	156
Приложение 2 Схемы и методики проведения экспериментов с нелинейными передающими линиями.....	159
Список литературы	163

Введение

Разработка источников мощных импульсов высокочастотного излучения ведётся уже около пятидесяти лет. На сегодняшний день можно выделить более десяти подходов к генерации мощного СВЧ-излучения. Исторически первым прибором мощной СВЧ-электроники является гиротрон, разработанный в середине 1960-х годов прошлого века. Вслед за гиротроном начиная с 1970-х годов начал появляться целый ряд различных устройств, использующих энергию потоков свободных электронов для получения высокочастотных колебаний: лампа бегущей волны, лампа обратной волны, релятивистский магнетрон, виркатор, релятивистский клистрон, релятивистский дифракционный генератор, многоволновый черенковский генератор, мазер на циклотронном резонансе, лазер на свободных электронах. 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 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 ведётся уже около двадцати лет, законченная теория возбуждения высокочастотных колебаний в таких линиях пока не была построена. Нет и полной ясности в вопросе максимальной эффективности преобразования энергии высоковольтных импульсов в высокочастотные колебания при использовании НПЛ с ферритом.

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 величины необходимых магнитных полей могут отличаться от релятивистских вакуумных приборов в меньшую сторону. Известные на сегодняшний день схемы с постоянными магнитами не показали высокой эффективности.

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, в 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; 10^{ая} 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.

Публикации по результатам работы

Материалы диссертационной работы опубликованы в 11 печатных изданиях, из них 5 статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК [98, 101, 102, 104, 105], 5 статей в сборниках трудов конференций [96, 97, 99, 100, 103], получен 1 патент на изобретение [106].

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.

Глава 1

Обзор исследований нелинейных передающих линий с ферритом с целью обострения фронта высоковольтных импульсов и генерации СВЧ-импульсов

1.1. Место нелинейных передающих линий в СВЧ-электронике высоких мощностей

По сегодняшний день устройства мощной СВЧ-электроники активно модернизируются и улучшаются и их мощность достигает уровня нескольких ГВт [1]. В литературе к устройствам мощной СВЧ-электроники относят приборы мощность которых превышает 100 МВт, охватывающие сантиметровый и миллиметровый диапазон длин волн, до частот в сотни ГГц. Данные устройства нашли целый ряд практических применений в задачах исследования электромагнитной совместимости, в радарх, в космических технологиях для передачи энергии и движения летательных аппаратов, для нагрева плазмы, ускорения заряженных частиц, биофизических исследованиях и в ряде других задач [1].

Среди генераторов гигаваттного уровня мощности следует выделить генераторы с энергией в импульсе ~100 Дж. Такими приборами являются многоволновый черенковский генератор, генератор дифракционного излучения, релятивистские магнетрон, клистрон, магнито-изолированный линейный осциллятор (MLO), лазер на свободных электронах и мазер на циклотронном резонансе. Генераторами с энергией импульсов в десятки джоулей являются лампа бегущей волны, лампа обратной волны, виркатор. Все вышперечисленные устройства используют потоки свободных электронов для генерации импульсов СВЧ-излучения. Энергетический КПД подобных генераторов находится в интервале 10–60%, однако в этих оценках не учитываются полные энергетические затраты на генерацию, транспортировку электронного пучка и непосредственно излучение. С учетом всех энергозатрат полный энергетический КПД источников импульсов СВЧ-излучения, по сегодняшним оценкам, в лучшем случае не

превышает 10% [2]. В ряде лабораторных образцов КПД может составлять единицы и доли процента. По современным оценкам максимальная мощность СВЧ-излучения, которая может быть получена в ближайшем будущем в лабораторных условиях составляет около 100 ГВт в режиме однократного импульса. Данная оценка берется из мощности доступных лабораторных генераторов электрических импульсов, которая составляет приблизительно 1 ТВт при КПД СВЧ-генератора порядка 10% [1].

Отдельным классом устройств являются твердотельные устройства, нелинейные передающие линии (НПЛ) и сверхширокополосные устройства (СШП). Основными их преимуществами перед традиционными приборами, использующими потоки электронов, является отсутствие вакуума, тормозного рентгеновского излучения. Для работы генераторов не требуется сильное магнитное поле, взрывоэмиссионные катоды. Также высокая частота следования импульсов в приборах с электронным пучком может быть затруднительной из-за длительной рекомбинации заряда в диоде, и, как следствие, ухудшение условий для генерации из-за избыточного объемного заряда [3]. Сравнительная компактность твердотельных генераторов и простота эксплуатации делают их привлекательными для практического использования.

Следует также отметить, что развитие технологий нелинейных передающих линий способствует улучшению параметров вакуумных приборов. Для работы релятивистских устройств требуется формирование импульсов напряжения с малыми временами нарастания тока (в единицы наносекунд или сотни пикосекунд), и передающие линии с ферритом успешно применяются для этих целей [4].

Нелинейным передающими линиями называются два типа устройств: распределенные передающие линии с заполнением нелинейными диэлектриками или магнетиками, свойства которых зависят от электрических или магнитных полей в линии [4–8]; линии с сосредоточенными параметрами, включающие в себя нелинейные емкости или индуктивности [9–12], величины которых зависят

от напряжения или тока в цепи, а также, возможно, полупроводниковые диоды или газовые разрядники [13–15].

Действие НПЛ на основе нелинейных диэлектриков и нелинейных емкостей основано на генерации солитоноподобных волн за счет эффекта, при котором основание импульса напряжения движется со скоростью меньшей, чем вершина импульса, при этом обостряется его фронт и обогащается его спектр. Это обусловлено уменьшением диэлектрической проницаемости элементов в линии по мере нарастания амплитуды импульса напряжения, распространяющегося в линии передачи. Конфигурации с нелинейными диэлектриками, как правило, используются как настольные генераторы радиоимпульсов с частотой в единицы или десятки МГц с пиковой мощностью от единиц ватт до десятка МВт. НПЛ на основе полупроводниковых диодов [13, 14] на сегодняшний день являются скорее демонстрационными образцами возможности генерации с их помощью СВЧ-импульсов и выглядят перспективными при их развитии вместе с полупроводниковыми технологиями.

Хорошие результаты показал генератор на основе периодического расположения газовых разрядников в разрыве внутреннего проводника коаксиальной линии [15]. Коаксиальная линия с диаметрами 100 мм и 59 мм состояла из 2–12 разрядных промежутков, с давлением азота от 1 до 20 атм. Импеданс линии составлял 32 Ом, рабочее напряжение 50–250 кВ, частота генерации 0.8–1.15 ГГц с пиковой мощностью в несколько сотен МВт. К сожалению, данная концепция не получила дальнейшего развития в первую очередь из-за того, что наносекундный пробой промежутков при подобных условиях остается малоизученным.

Более перспективными являются нелинейные линии с ферритом. На их основе были полученные рекордные результаты по обострению фронта высоковольтного импульса: до десятков пикосекунд при скорости нарастания в единицы МВ/нс. Что касается генерации наносекундных радиоимпульсов в НПЛ с ферритовым заполнением, то их параметры достигают параметров релятивистских устройств

СВЧ-электроники в дециметровом диапазоне длин волн. Пиковая мощность генераторов достигает 700 МВт [8]. На сегодняшний день показана возможность генерации радиоимпульсов в частотном диапазоне от 1 ГГц до 20 ГГц [16]. При этом в генераторах на основе НПЛ можно значительно варьировать выходную мощность без изменения частоты генерации, а также легко перестраивать частоту в интервале десятков процентов за счет изменения тока в соленоиде.

Нелинейная линия с ферритом представляет собой отрезок передающей линии, как правило, не превышающей в длину одного метра, между проводниками которой располагается феррит. Как правило, такие устройства работают на высоких напряжениях и, как следствие, в них используются коаксиальные линии в силу их хорошей электрической прочности (рисунок 1.1). Исторически изучение НПЛ с ферритом началось с линий, в которых использовался ненасыщенный феррит. Подобные линии нашли широкое применение в импульсной технике в задачах обострения фронта высоковольтных импульсов наряду с обостряющими газовыми разрядниками высокого давления [17–21].

Первой работой, показавшей эффективность НПЛ с ферритом для обострения фронта высоковольтного импульса, стала работа Вейнера 1981 года [18]. В ней с использованием ферритовой линии длиной до 120 см, как без внешнего магнитного поля, так и с внешним полем до 0.4 Э, была показана возможность уменьшения времени нарастания высоковольтного импульса амплитудой до 10 кВ с 30 нс до 2 нс. Затем в ряде экспериментальных и теоретических исследований была продемонстрирована возможность обострения фронтов импульсов напряжения до единиц наносекунд и скоростью нарастания напряжения 100 кВ/нс. Развитие этого метода привело к тому, что коллектив авторов из ИСЭ СО РАН в 2008 году получил субнаносекундные длительности фронтов при скорости нарастания напряжения до 500 кВ/нс и амплитуде импульса до 360 кВ. Для увеличения скорости нарастания напряжения в линии с ферритом необходимо использовать внешнее магнитное поле для предварительного

насыщения ферромагнитного материала. Первые исследования по обострению фронта в линиях с насыщенным ферритом проводились коллективами из Великобритании в 1990-х годах [22–23]. Экспериментально было обнаружено, что использование изначально подмагниченного феррита позволяет значительно сократить длительность фронта высоковольтного импульса и получить рекордную в то время скорость нарастания фронта до 1 МВ/нс.

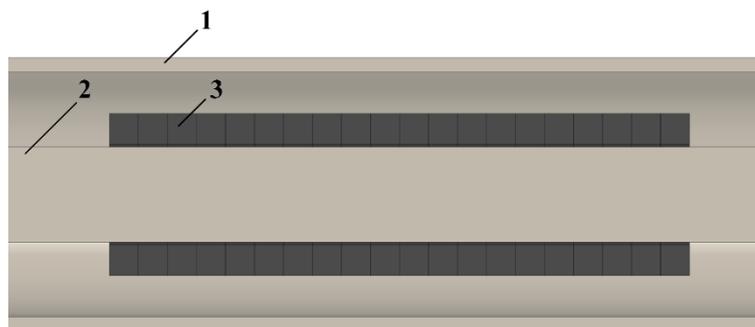


Рисунок 1.1. Схема коаксиальной НПЛ с ферритовым заполнением. 1 – внешний проводник, 2 – внутренний проводник, 3 – ферритовое заполнение.

Интерес к обострению высоковольтных импульсов остается и до сих пор [24–26]. Одной из наиболее заметных работ стала работа коллектива ИЭФ УрО РАН, в которой описана полностью твердотельная система с полупроводниковым коммутатором и нелинейной линии с ферритом [26]. Система представляла собой каскад из генератора S-500 [27] и двух линий компрессии с ферритом, в которых исходный высоковольтный импульс длительностью 7 нс на (нагрузке 40 Ом) сжимался до 0.65 нс с увеличением напряжения с 500 кВ до 1.1 МВ, при этом пиковая мощность импульса увеличивалась с 6 до 30 ГВт. Скорость нарастания напряжения составила 3 МВ/нс, а скорость роста мощности 100 ГВ/нс.

1.2. Ударные электромагнитные волны

Все работы по обострению фронта высоковольтных импульсов базировались на теории ударных электромагнитных волн (УЭМВ), развитой в 1960-е годы [28–32]. Под ударной электромагнитной волной понимается процесс быстрого изменения или «скачок» полевых величин на некотором интервале δ , который в

общем случае является движущимся. Динамика полей на этом интервале описывается уравнениями более высокого порядка по сравнению с уравнениями, описывающими поле вне интервала δ . Решение уравнений по обе стороны от интервала асимптотически стремятся к различным значениям, связанным между собой однородными граничными условиями, не зависящими от структуры поля внутри интервала δ . Образование УЭМВ описывается уравнениями электродинамики и феноменологическими уравнениями нелинейных сред, в которых они формируются. В образовании УЭМВ изменения термодинамического состояния и макроскопические движения среды не играют основную роль, и при рассмотрении процесса ими можно пренебречь.

Для рассмотрения передающих линий, заполненных ферритом, требуется феноменологическое уравнение, описывающее динамику вектора намагниченности. Если характерный масштаб времени изменения магнитного поля большой, то связь между вектором магнитной индукции \mathbf{B} и вектором напряженности магнитного поля \mathbf{H} может считаться независимой от скорости и, если не учитывать анизотропию и гистерезисные явления, эти векторы коллинеарны и зависимость между ними однозначна. В случае быстрого изменения поля необходимо переходить к динамическим моделям. Для этого пользуются «макроспиновым» приближением, в котором магнитный момент однородно намагниченного тела определяется следующим образом:

$$\mathbf{m} = V\mathbf{M}, \quad (1.1)$$

Здесь \mathbf{m} – магнитный момент, V – объем, \mathbf{M} – вектор намагниченности. Если V – атомарный объем, то \mathbf{m} – магнитный момент приходящийся на один атом; если же V – объем всего намагниченного тела, то \mathbf{m} – полный магнитный момент тела. Таким образом, в «макроспиновом» приближении вектор намагниченности является усредненным по объему магнитным моментом тела. Полагается, что доменные связи, имеющиеся в объеме магнетика, образуют сильную связь между

отдельными спинами электронов, тем самым формируя один «общий» спин или «общий» магнитный момент, связанный с ним.

На магнитный момент \mathbf{m} в магнитном поле \mathbf{H} действует момент силы (крутящий момент):

$$\mathbf{T} = \mathbf{m} \times \mathbf{H}. \quad (1.2)$$

Пользуясь механическим уравнением моментов и связью между магнитным и механическим моментом через гиромагнитное отношение для электрона γ , можно записать уравнение прецессии:

$$\frac{d\mathbf{m}}{dt} = -\gamma[\mathbf{m} \times \mathbf{H}]. \quad (1.3)$$

Накопленные опытные факты говорят о том, что магнитный момент в конечном счете выровняется по направлению внешнего магнитного поля. Однако момент силы, стоящий в правой части (1.3), не способен направить момент коллинеарно магнитному полю, поскольку он перпендикулярен ему. Следовательно, для правильного описания в уравнении динамики требуется ввести дополнительный момент силы, отвечающий за затухание прецессии, направляющий вектор магнитного момента в сторону внешнего магнитного поля. Описывающим полную динамику движения вектора магнитного момента является уравнение Ландау-Лифшица

$$\frac{d\mathbf{m}}{dt} = -\gamma[\mathbf{m} \times \mathbf{H}] - \frac{\alpha\gamma}{m}[\mathbf{m} \times [\mathbf{m} \times \mathbf{H}]]. \quad (1.4)$$

Данное уравнение может быть записано для вектора намагниченности в «макроспиновом» приближении:

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\gamma[\mathbf{M} \times \mathbf{H}] - \frac{\alpha\gamma}{M_s}[\mathbf{M} \times [\mathbf{M} \times \mathbf{H}]], \quad (1.5)$$

здесь M_s – величина намагниченности насыщения, α – феноменологический коэффициент затухания, γ – гиромагнитное отношение для электрона. Первое

слагаемое в правой части отвечает за прецессию вектора намагниченности, а второе за ее затухание.

Для описания процесса формирования ударных волн в двухсвязных волноводах (линиях передачи) необходимо совместное решение уравнений Максвелла и уравнения для нелинейной среды (для линии с ферритовым заполнением таким уравнением будет являться уравнение (1.5)). Удобством такого подхода является учет зависимости полей от поперечных координат. Такое описание на сегодняшний день не представляется невыполнимым в аналитическом виде. Однако можно перейти к упрощенной модели двухпроводной линии передачи, заполненной ферритом, поперечные размеры которой меньше характерной длины волны, распространяющейся в ней. Двухпроводные линии передачи могут быть описаны при помощи телеграфных уравнений:

$$\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial \Phi}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial I}{\partial z} + \frac{\partial Q}{\partial t} = 0, \quad (1.6)$$

здесь I – ток в линии, U – напряжение, Q – погонный заряд, Φ – погонный магнитный поток. Связь между этими величинами дается нелинейными интегро-дифференциальными операторами, вид которых зависит от конфигурации проводников и заполняющей среды:

$$\Phi = \Phi(U, I), \quad Q = Q(U, I) . \quad (1.7)$$

При рассмотрении медленных процессов, для которых связь между Φ и I можно считать квазистатической система уравнений (1.6) является квазилинейной системой гиперболического типа. Исследование таких систем уравнений выполняется с использованием теории характеристик. С точки зрения физики, можно считать, что в системе нет дисперсионных свойств, т.е. малые возмущения распространяются вдоль характеристик со скоростью, не зависящей от их частоты.

Частными интегралами (1.6) являются римановы решения:

$$I = F\left(t \mp \frac{z}{v(I)}\right), \quad U = \pm \int \rho(I) dI, \quad (1.7)$$

где F – произвольная функция, $v(I)=(LC)^{-1/2}$, $\rho(I)=(L/C)^{1/2}$, L – индуктивность единицы длины линии, C – емкость единицы длины линии. Каждая точка волны (1.7) движется с постоянной скоростью $v(I)$ вдоль характеристики $t \mp \frac{z}{v(I)} = \psi(I)$, здесь ψ – произвольная функция. На тех участках, где $\partial v/\partial z < 0$, что с физической точки зрения означает, что скорость вершины волны выше, чем скорость ее основания, крутизна профиля волны начинает расти, и в определенный момент времени зависимость I от координаты и времени становится неоднозначной (рисунок 1.2). Поскольку эта неоднозначность лишена физического смысла, а система (1.6) не имеет при данных начальных условия других непрерывных решений, то в рамках предположения о квазистатической связи $\Phi(I)$, должен появиться разрыв непрерывности величин тока и напряжения U и I – образоваться ударная волна. При этом распространение УЭМВ всегда сопровождается диссипацией энергии.

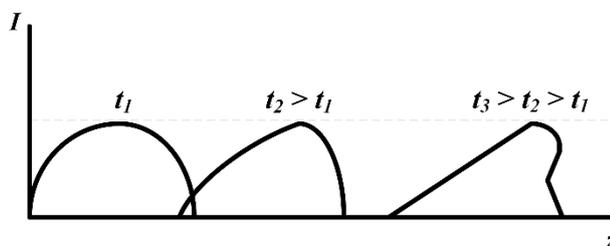


Рисунок 1.2. Эволюция профиля простой волны при образовании УЭМВ.

В случае наличия в линии низкочастотных потерь, они являются несущественными в области фронта УЭМВ и допускают существование разрывов, однако влияют на процесс формирования УЭМВ. При низкочастотных потерях формирование УЭМВ происходит для волн достаточно большой амплитуды, в противном случае образование ударной волны невозможно в силу того, что затухание препятствует деформации фронта волны.

Высокочастотные потери приводят к тому, что на участках с высокой скоростью роста тока диссипация начинает увеличиваться, ограничивая минимальную длительность этих участков. В результате вместо скачка наблюдается ударный фронт конечной длительности. Этот эффект играет ключевую роль в процессе обострения фронта высоковольтных импульсов в линиях с ферритовым заполнением, а также при возбуждении в них высокочастотных колебаний.

1.3. Генераторы СВЧ-импульсов на основе НПЛ с ферритом

Возбуждение коротких высокочастотных импульсов в передающей линии с насыщенным ферритом одним из первых продемонстрировал Фрейдман в 1960 году [33]. Практически в то же время в 1959 году в США было предложено использовать малый ферритовый образец в качестве когерентного осциллятора [34, 35]. Для этого феррит должен был находиться в сильном магнитном поле, создаваемом импульсно. Ферритовый образец располагался в торце прямоугольного волновода, в котором была продемонстрирована генерация СВЧ-импульсов длительностью 1 нс на частотах 7–9 ГГц. Мощность генератора не превышала 100 Вт. Развитие идеи, предложенной в [33], получило в работе Паунда [36]. Однако дальнейших публикаций этой концепции не последовало, по-видимому, из-за малых размеров ферритовых образцов и всей системы, что не позволяло увеличивать мощность генератора.

Возбуждение высокочастотных колебаний в генераторах на основе передающих линий с насыщенным ферритом связано с эффектом импульсного перемангничивания насыщенного магнетика [37, 38]. Как уже было отмечено, изначально феррит находится в состоянии насыщения. В таком состоянии феррит описывается уравнением Ландау-Лифшица (1.5). Если время нарастания компоненты магнитного поля, ортогональной к полю насыщения, заметно меньше характерного времени релаксации ферромагнетика, то, поскольку модуль вектора

намагниченности уже не может измениться из-за насыщения, вектор намагниченности \mathbf{M} отклоняется на угол θ от суммарного вектора напряженности магнитного поля \mathbf{H} . После чего он начинает движение по поверхности сферы вокруг направления результирующего поля (рисунок 1.3), и за счет затухания в магнетике стремится к направлению вектора результирующей напряженности магнитного поля \mathbf{H} .

В работах по обострению фронта с помощью ферритовых линий за ударным фронтом не наблюдались высокочастотные колебания. Это связано с тем, что для возбуждения колебаний необходимо наличие дисперсии, связанной с обратимыми процессами. За образованием ударного фронта отвечает дисперсия, связанная с необратимым диссипативным процессом – перемагничиванием. Следовательно, для возбуждения колебаний в линии требуется наличие дисперсии другой природы.

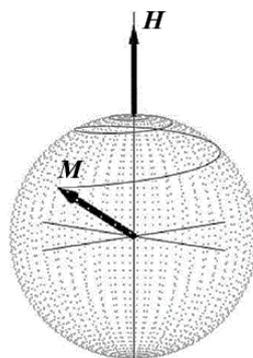


Рисунок 1.3. Динамика вектора намагниченности \mathbf{M} при импульсном перемагничивании ферромагнетика.

Первым важным шагом в создании мощных генераторов СВЧ-импульсов на основе линий с ферритом стал цикл работ группы из ИФМ РАН [39–43]. Эти работы основывались на теории УЭМВ. Базируясь на этой теории, была продемонстрирована эффективная генерация радиоимпульсов длительностью в несколько десятков периодов колебаний ударным фронтом при его распространении в линии с пространственной дисперсией [39]. Схема замещения линии с пространственной дисперсией представлена на рисунке 1.4.

Пространственная дисперсия достигается за счет перекрестных емкостных связей звеньев линии и определяется параметром отношения емкости перекрестной связи к емкости звена линии C^*/C_0 . В разработанной авторами модели возбуждение колебаний наблюдается при синхронизме между ударным фронтом и возбуждаемой им волной. Это означает, что скорость ударного фронта должна быть равной фазовой скорости волны $v_{sh}=v_{ph}$, при этом для эффективной генерации требуется, чтобы групповая скорость волны была меньше скорости ударного фронта $v_{sh}>v_g$, что обеспечивает эффективный отток энергии от ударного фронта и приводит к формированию за ним цуга колебаний. В работе [39] экспериментально и в численном моделировании была продемонстрирована возможность получения большого числа колебаний в цуге. Длительность радиоимпульса и его частота были ограничены высокочастотными потерями в НПЛ.

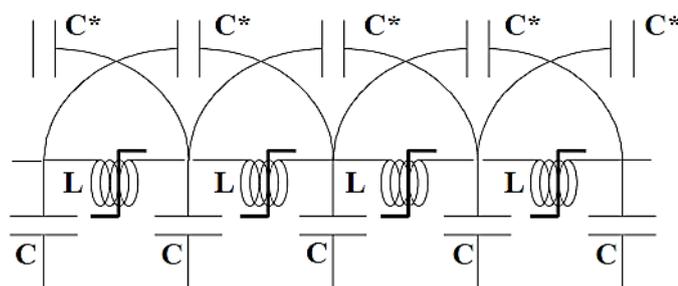


Рисунок 1.4. Схема замещения линии с перекрестными емкостными связями.

Последовавший за данной работой ряд теоретических работ [40 – 43] был направлен на повышение эффективности генерации радиоимпульсов, а также расширению частотного диапазона. Результатом работ нижегородской группы стало создание экспериментального макета источника радиоимпульсов группой из Великобритании под руководством Седдона в 2007 году [12, 44]. Разработанный генератор представлял собой последовательность из 40 LC-звеньев и работал при амплитуде импульса напряжения 30–50 кВ с частотой следования импульсов до 1.5 кГц. Центральная частота колебаний находилась в интервале от 200 МГц до 2 ГГц и, в первую очередь, определялась емкостями и индуктивностями звеньев линии. Интервал перестройки частоты в

НПЛ с конкретными параметрами (величинами емкостей и индуктивности) составлял $\pm 20\%$. Перестройка частоты осуществлялась за счет изменения скорости ударного фронта при изменении начальной намагниченности индуктивностей. Максимальная мощность генератора составила 20 МВт. Длительность импульса изменялась от нескольких периодов колебаний до пятидесяти, что позволяло получать ширину спектра от 2.5% до 40%. Также в работе была показана возможность фазирования и сложения мощности от четырех подобных генераторов. Большую роль в реализации проекта сыграло численное моделирование. Несколько позже, в 2011 году, был разработан еще один генератор, основанный на линии с перекрестными связями [45]. В этой работе был представлен генератор, состоящий из 200 LC-звеньев, с мощностью в сотни киловатт и частотой генерации в несколько сотен МГц.

Следующим значительным шагом в развитии генераторов на основе НПЛ с насыщенным ферритом стала работа коллектива из ИСЭ СО РАН [8], которая стала продолжением работы по обострению фронта высоковольтного импульса в коаксиальных передающих линиях с ферритом до субнаносекундных значений [46]. Работа Седдона [12] и работа [8] стали отправными точками в развитии направления генерации высокочастотных импульсов в НПЛ с ферритом и привлекли к этой тематике большое количество исследовательских групп из разных стран. В работе [8] продемонстрирован способ возбуждения высокочастотных колебаний при распространении импульса напряжения с ударным фронтом в линии с временной дисперсией. Временная дисперсия в линии передачи обусловлена обратимым процессом импульсного перемагничивания феррита при возбуждении гиромагнитной прецессии, который был описан ранее. Из-за этого в современной литературе НПЛ, работающие на данном эффекте, иногда называются гиромагнитными НПЛ. В работе [8] центральная частота возбуждаемых колебаний находилась в интервале от 600 МГц до 1.1 ГГц с шириной спектра СВЧ-импульса по уровню 3 дБ около 15%. Длина линии составляла около одного метра. На рисунке 1.5 показана

осциллограмма импульса напряжения на выходе НПЛ с насыщенным ферритом, полученная в данной работе. Перестройка частоты осуществлялась изменением поля подмагничивания феррита, с оптимальной величиной в интервале 20–40 кА/м. Пиковая мощность достигала 700 МВт с энергетическим КПД преобразования энергии видеоимпульса в радиоимпульс около 10%. Логическим продолжением данной работы было создание источника СВЧ-излучения на основе НПЛ с ферритом [47]. Внешний вид источника и его габариты представлены на рисунке 1.6. Источник состоял из высоковольтного генератора СИНУС-200 – (1), НПЛ – (2), полосового фильтра – (3), модового конвертора – (4) и рупорной антенны – (5). НПЛ была заполнена вакуумным маслом для повышения электрической прочности. Вакуумное масло было выбрано по причине того, что оно обладает значительно меньшими высокочастотными потерями по сравнению с трансформаторным. В передающей линии с волновым сопротивлением 28 Ом генерировался СВЧ-импульс длительностью 5 нс, после чего он излучался с помощью рупорной антенны и измерялся приемной антенной. Эффективный потенциал источника составил 560 кВ с центральной частотой 1.2 ГГц при ширине спектра 0.4 ГГц по уровню 10 дБ. Источник мог работать с частотой следования импульсов 200 Гц. Спектр излученного импульса в соответствии с современной классификацией относится к широкополосным.

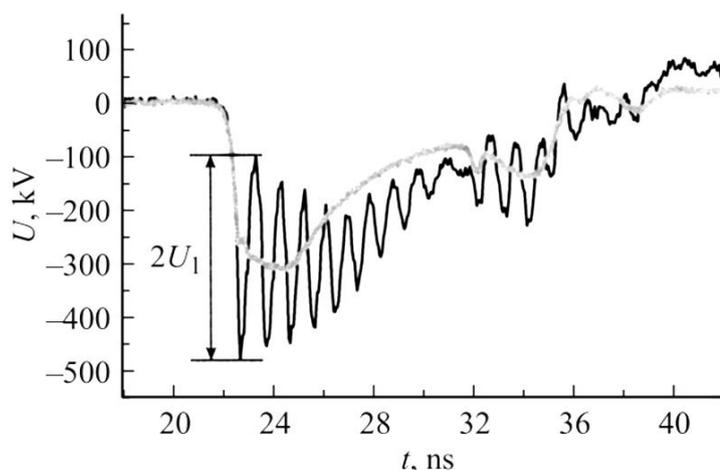


Рисунок 1.5. Осциллограмма напряжения на выходе НПЛ с насыщенным ферритом из работы [46].

Практически в то же время генераторы на основе НПЛ с ферритом привлекли внимание исследователей из Великобритании и США. В 2011 году учеными из Великобритании совместно с Рукиным из ИЭФ УрО РАН был создан макет полностью твердотельного генератора, включающего генератор импульсов напряжения на SOS-диодах, способного формировать на нагрузке высоковольтные импульсы длительностью до 10 нс с напряжением до 100 кВ [48]. Максимальная пиковая мощность разработанного генератора составила 90 МВт при рабочем напряжении 80 кВ. Центральная частота генерируемых импульсов находилась в интервале от 750 МГц до 1 ГГц, а частота следования импульсов достигала 2 кГц.

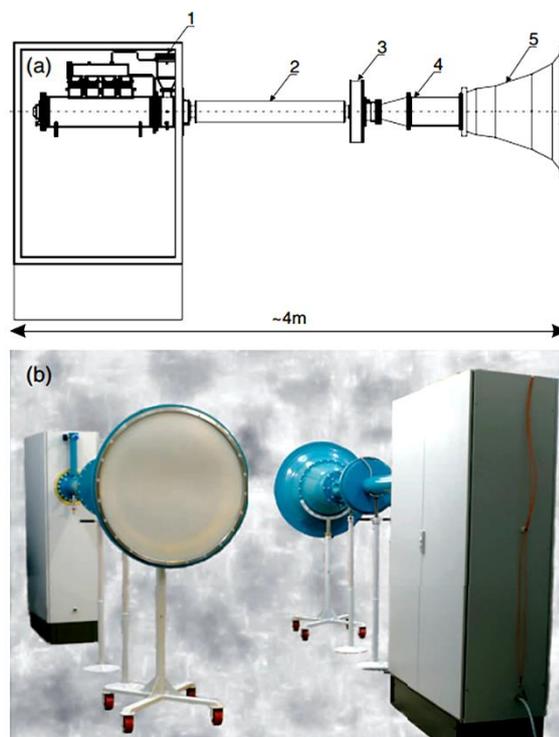


Рисунок 1.6. Внешний вид источника наносекундных импульсов СВЧ-излучения на основе НПЛ с насыщенным ферритом из работы [47].

В период с 2010 по 2013 год последовал цикл работ от группы исследователей из Техасского технического университета, США [49–52]. Первой работой стало исследование возможности замены соленоида, используемого для насыщения феррита, на сборку из постоянных магнитов [49]. Подход, изложенный в работе,

не оправдался, показав малую мощность генерации и очень короткий импульс СВЧ-колебаний, менее 2 нс. После этого данная группа не публиковала работы с использованием постоянных магнитов. Затем группа пошла по пути компактных линий меньшей мощности с импедансом 50 Ом, работающих от импульсов напряжения амплитудой в десятки кВ [50]. НПЛ генератора в диаметре была не более 10 мм, а ее длина составляла приблизительно 50 см. Максимальная пиковая мощность, полученная в экспериментах, составляла 9 МВт при амплитуде импульса напряжения 50 кВ. В экспериментах были получены СВЧ-импульсы с центральной частотой в интервале от 2.7 до 5 ГГц и длительностью импульса, не превышающей 3 нс. В другой работе группы рассматривались различные ферриты, применяемые для генерации высокочастотных импульсов с целью увеличения эффективности генераторов [51]. В НПЛ обычно используются магнитомягкие ферриты и гранатовые ферриты, поскольку они обладают высокой начальной магнитной проницаемостью, малой коэрцитивной силой, большим внутренним сопротивлением и низкими потерями на перемагничивание. В работе было показано влияние полосы ферромагнитного резонанса на эффективность генерации в НПЛ с ферритом. Отдельно следует выделить генератор, разработанный этой же группой, который представлял собой полосковую линию с волновым сопротивлением 50 Ом и YIG ферритами [52]. Генератор работал на центральной частоте 1 ГГц с длительностью импульса до 5 нс, ширина спектра составляла 40%, и пиковая СВЧ-мощность находилась в интервале 2–13 МВт.

Другая группа из исследовательской лаборатории ВВС США в Нью Мексико работала над реализацией генератора с пространственной дисперсией в коаксиальной передающей линии [53, 54]. Результатом работы стал макет генератора, в котором феррит насыщается полем соленоида. НПЛ представляла собой 60 LC-звеньев с волновым сопротивлением 50 Ом с емкостной связью между соседними звеньями. Была продемонстрирована возможность генерации радиоимпульсов длительностью от 4 до 17 нс в зависимости от центральной частоты колебаний в импульсе. Центральная частота изменялась полем

подмагничивания в интервале от 0.95 до 1.45 ГГц. Пиковая мощность составляла 200 МВт, а максимальная энергия СВЧ-импульса 170 мДж.

В последние годы в ИЭФ УрО РАН активно развиваются методы генерации высокочастотных импульсов в сантиметровом диапазоне длин волн [16, 55, 56]. Была достигнута максимальная частота генерации 20 ГГц. В одной из этих работ использовались ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса, что заметно увеличило эффективность генерации НПЛ. Также было показано, что возможно возбуждение высокочастотных колебаний в НПЛ с ферритом без внешнего поля, используя такие ферритовые кольца.

Следует отметить, что кроме коллективов, представленных выше, исследованиями в области генерации высокочастотных импульсов в НПЛ также занимаются во Франции, Китае, Сингапуре, Южной Корее, Украине и Бразилии [57–61]. На основе линий с насыщенным ферритом разрабатывались системы для модуляции электронных пучков [62], а также генераторы для системы междисциплинарных исследований [63].

Максимальная пиковая мощность, полученная на сегодняшний день в одиночном генераторе, составляет 600–700 МВт, что находится вблизи максимальной электрической прочности коаксиальной линии, заполненной маслом. Таким образом, для повышения эффективного потенциала излучательных систем на основе НПЛ нельзя прибегнуть к повышению генерируемой мощности от одной линии. Решением является использование многоканальных систем. Удобным здесь является еще и то, что НПЛ позволяют изменять время задержки распространения в них высоковольтного импульса за счет изменения внешнего поля. Этот эффект успешно используется для фазировки нескольких генераторов в многоканальных системах.

В 2015 году коллективом из ИСЭ СО РАН был создан двухканальный источник СВЧ-излучения с возможностью электронного контроля сканирования луча [64]. В одноканальном режиме каждая НПЛ источника могла генерировать

высокочастотные импульсы с пиковой мощностью от 50 до 700 МВт на центральной частоте 0.5–1.7 ГГц. Частота следования импульсов составила 100 Гц. Фазирование обеспечивалось за счет наличия дополнительной секции НПЛ длиной 30 см для формирования ударного фронта высоковольтного импульса длительностью 0.5 нс и обеспечения необходимой временной задержки между каналами для когерентного сложения мощности. В источнике использовалась спиральная антенна в каждом канале, поскольку она наиболее удобна для коаксиальной геометрии генератора и обеспечивает близкую к круговой поляризацию излученного импульса. Излучаемая пиковая мощность составила 350 МВт, что соответствует эффективному потенциалу в 350 кВ. В двухканальном режиме была продемонстрирована возможность сканирования лучом в горизонтальной плоскости на $\pm 15^\circ$.

В 2017 году коллективом из ИСЭ СО РАН и ИЭФ УрО РАН была разработана четырехканальная система аналогичная двухканальной [65]. Система могла работать с частотой следования импульсов до 1 кГц. Центральная частота высокочастотного импульса составляла 2.1 ГГц, а длительностью импульса 3 нс. Был достигнут максимальный эффективный потенциал в 360 кВ с возможностью сканирования луча в горизонтальной плоскости на $\pm 17^\circ$.

Многоканальные системы разрабатывались и коллективами из США, в частности группой из Техасского технического университета [66]. В работе представлена четырехканальная система, работающая на значительно меньших мощностях, примерно до 5 МВт (это соответствует напряженности электрического поля 8 кВ/м на расстоянии 10 м) в диапазоне частот 2–4 ГГц с частотой следования импульсов 1 кГц. Длительность импульса не превышала 2 нс. Сканирование лучом в горизонтальной плоскости осуществлялось на $\pm 17^\circ$.

В последние в ИЭФ УрО РАН созданы четырехканальные системы с центральными частотами импульсов 4 и 8 ГГц [67, 68]. В системах получены напряженности электрического поля при сложении мощности от 4 каналов в открытом пространстве 250 кВ/м и 1.5 кВ/см на расстоянии 3 м соответственно.

1.4. Методы анализа и моделирования нелинейных передающих линий с ферритом

Большинство генераторов и источников наносекундных импульсов СВЧ-излучения, представленных в обзоре, были созданы без использования точных аналитических моделей, а в большей степени на основе накопленных авторами экспериментальных фактов. Наиболее простой подход к теоретическому описанию процессов в НПЛ с насыщенным ферритом может заключаться в использовании уравнения Ландау-Лифшица, в котором полевые величины оцениваются из квазистационарных величин тока и напряжения в линии [69, 70]. Более корректным способом построения аналитической модели является подход, в котором была построена теория УЭМВ: это – использование уравнения Ландау-Лифшица (1.5) совместно с телеграфными уравнениями (1.6). На основе этих уравнений, была разработана модель стационарным решением которой является бегущая электромагнитная волна в однородной коаксиальной передающей линии с насыщенным ферритом в отсутствие затухания [71]. Анализ решения показал хорошее согласие с закономерностями, наблюдаемыми в первых экспериментах с НПЛ [8]. Недостатком модели является отсутствие учета зависимости полей, ортогональных направлению распространения волны, поскольку в поперечном сечении НПЛ не являются однородными, а представляют собой слоистую структуру из феррита и диэлектрика между проводниками линии передачи.

Построение модели, учитывающей все компоненты электромагнитных полей и их зависимости от всех координат, должно быть основано на совместном решении уравнения Ландау-Лифшица совместно с системой уравнений Максвелла. Сложность модели предполагает ее численное решение.

Исторически, первыми работами, которые были посвящены численному моделированию НПЛ с ферритом, являются работы Долана [4, 20, 72]. В них представлены результаты моделирования обострения фронтов высоковольтных импульсов в линиях с насыщенным и ненасыщенным ферритом, которые сравнивались с экспериментальными результатами. В рамках модели проводилось

совместное решение системы телеграфных уравнений и уравнения Ландау-Лифшица для изучения нестационарных процессов при формировании ударных волн. Выбор этих уравнений для моделирования, скорее всего, был связан с ограниченными вычислительными мощностями, доступными в то время, как следствие одномерная модель является более удобной. Результаты моделирования, представленные в работах, показали хорошее качественное и количественное согласие с экспериментом. При моделировании обострения высоковольтного фронта в линиях с предварительным подмагничиванием за фронтом импульса напряжения наблюдались непродолжительные затухающие высокочастотные колебания. Важным выводом из данных работ является то, что при учете в модели вихревых токов, возбуждаемых прецессией вектора намагниченности во внешнем проводнике передающей линии, заметно увеличивается точность предсказания величины времени задержки распространения импульсов по НПЛ.

Как уже отмечалось ранее, численное моделирование сыграло значительную роль в изучении процессов при возбуждении высокочастотных колебаний в линиях с пространственной дисперсией в виде перекрестных емкостных связей [39–43], что впоследствии привело к созданию генератора в работах [12, 44]. Модель, используемая в работах, представляла собой совместное решение феноменологического уравнения, описывающего магнетик, и уравнений Кирхгофа для звеньев цепи искусственной нелинейной передающей линии.

До недавнего времени подход с использованием уравнений Кирхгофа или телеграфных уравнений продолжал использоваться для моделирования передающих линий с распределенным заполнением ферритом [73, 74]. Результаты работ показали хорошее согласование с экспериментальными закономерностями, но поскольку в них учитывались не все компоненты электромагнитных полей, эти модели не совсем подходят для оптимизации конструкции генераторов на основе НПЛ с насыщенным ферритом.

В моделях, включающих в себя уравнения Максвелла, для их численного интегрирования необходимо использовать метод «Finite Difference Time Domain» или FDTD-метод [75]. Работы, посвященные численному моделированию ферритов с использованием FDTD-метода, датируются еще 1990ми годами [76, 77]. Однако, этот метод не использовался для моделирования НПЛ с ферритовым заполнением до недавнего времени. Вероятно, это связано с доступными вычислительными мощностями, более целесообразным было иметь быстро интегрируемые, не ресурсоёмкие модели, хорошо решающие задачи, которые ставились перед ними в то время. Сегодня моделирование НПЛ с ферритом FDTD-методом применяется все шире даже на персональных компьютерах. Одними из первых работ по FDTD-моделированию НПЛ являются работы коллектива из Харькова [60, 78–80], а также коллектива из Китая [81]. Такие расчёты также успешно используются для моделирования компрессоров высоковольтных импульсов, основанных на НПЛ с ферритом [82].

Глава 2

Моделирование передающих линий с насыщенным ферритом

2.1. Методика моделирования

Как уже отмечалось в предыдущей главе, распространение импульса напряжения в линии передачи, заполненной ферритом, насыщенным внешним магнитным полем, сопровождается укорочением фронта импульса тока до длительности, как правило, менее одной наносекунды, что также получило название в литературе как формирование ударного фронта. В экспериментальных условиях феррит первоначально намагничивается до насыщения в направлении, коллинеарном направлению распространения электромагнитной волны, а распространяющийся в линии высоковольтный импульс приводит к перемагничиванию ферритового заполнения, сдвигая вектор \mathbf{M} в азимутальном направлении. Для типичных экспериментальных условий феррит может быть описан в рамках макроспинового приближения, а динамика вектора намагниченности \mathbf{M} описывается уравнением Ландау-Лифшица (1.5).

Одной из первых и основных задач при проектировании и моделировании генераторов наносекундных СВЧ-импульсов на основе НПЛ является задача определения частоты возбуждаемых колебаний. В простейшем случае, пользуясь уравнением Ландау-Лифшица и телеграфными уравнениями, можно получить выражение для частоты возбуждаемых колебаний в линии. Пренебрегая членом, отвечающим за затухание, в (1.5), можно записать выражение для частоты колебаний, которая зависит только от азимутального поля в линии, при отсутствии переменного во времени поля H_z [71]:

$$f_c = \frac{\gamma \mu_0}{2\pi} H_\theta \quad (2.1)$$

Здесь μ_0 – магнитная постоянная и H_θ – азимутальная компонента напряженности магнитного поля в линии передачи. Если учитывать переменное

во времени аксиальное магнитное поле и коэффициент поперечного заполнения ферритом, то для частоты возбуждаемых колебаний можно записать следующее выражение [64]:

$$f_c = \frac{\gamma \mu_0 H_\theta}{4\pi} \sqrt{1 + \frac{\chi M_s}{\mu_0 \sqrt{H_\theta^2 + H_z^2}}}. \quad (2.2)$$

Здесь χ – коэффициент поперечного заполнения ферритом, M_s – намагниченность насыщения.

Выражение (2.2) является приближенным, поскольку учитывает только ТЕМ волны, распространяющиеся в линии передачи. В ней не учтено возможное влияние высших типов волн. Для корректного учета всех типов волн в линии необходимо решать уравнения Максвелла, описывающие все компоненты электромагнитных полей в линии. Для этого, расчет геометрий НПЛ должен проводиться с использованием численного моделирования. Моделированию нелинейных передающих линий с ферритовым заполнением, насыщенным внешним магнитным полем, и посвящен данный раздел. Основными задачами является определение основных факторов, влияющих на амплитуду и частоту возбуждаемых в коаксиальных передающих линиях с насыщенным ферритом колебаний.

Все результаты моделирования, представленные в данной работе, были получены с использованием полностью электромагнитного кода KARAT [83].

В коде KARAT насыщенный феррит описывается как феноменологическая среда, в рамках данной задачи обладающая одновременно гиромангнитными и диэлектрическими свойствами и для которой выполняется уравнение:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{J}. \quad (2.3)$$

Здесь ток \mathbf{J} в данной задаче представляет собой сумму вихревого тока \mathbf{J}_c и тока поляризации \mathbf{J}_d :

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_c + \mathbf{J}_d, \quad (2.4)$$

а вихревой ток:

$$\mathbf{J}_c = \text{rot } \mathbf{M}. \quad (2.5)$$

Здесь \mathbf{M} – вектор намагниченности среды, который вычисляется из уравнения Ландау-Лифшица при заданных начальных и граничных условиях. Это уравнение решается на каждом временном шаге вместе с уравнениями Максвелла. В коде KARAT уравнение Ландау-Лифшица решается методом прогноза и коррекции, обеспечивающим второй порядок точности по временному шагу. Решение уравнений Максвелла осуществляется FDTD методом. Код позволяет проводить расчеты в двухмерном и трехмерном случаях в декартовых и цилиндрических координатах.

Что касается тока диэлектрической поляризации, существует несколько способов его учета. Самое простое – это использование диэлектрической проницаемости, не зависящей от частоты. В данном случае уравнение (2.3) переписывается в виде:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{J}_c. \quad (2.6)$$

\mathbf{D} – вектор электрической индукции.

2.2. Апробация метода моделирования

Для проверки возможности моделирования НПЛ с ферритом были выбраны две геометрии передающих линий, изученные в экспериментах. Сравнение форм сигналов, а также зависимостей центральной частоты генерируемых наносекундных высокочастотных импульсов от компонент напряженности магнитного поля с экспериментом проводилось с результатами моделирования в осесимметричной RZ версии, а также в трехмерных (XYZ и RθZ) моделях.

Параметры линий:

Геометрия 1: внешний и внутренний диаметры проводников 80 мм и 40 мм; внешний и внутренний диаметр ферритовых колец 65 мм и 40 мм; длина ферритового заполнения 800 мм.

Геометрия 2: внешний и внутренний диаметры проводников 56 мм и 28 мм; наружный и диаметр ферритовых колец 45 мм и 28 мм; длина ферритового заполнения 800 мм.

Линии передачи (включая коаксиальные участки слева и справа от феррита и радиальный зазор между ферритом и внешним проводником) заполнены диэлектриком (вакуумное масло) с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 2.2$. Схема расчетной области представлена на рисунке 2.1. Расчеты проводились для следующих характеристик феррита, заявленных производителем, $M_s = 0.314$ Тл и диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 8$ (статическое значение). Параметр феноменологического затухания был равен $\alpha = 0.15$ во всех представленных в работе расчетах.

Форма импульса напряжения, подаваемого на вход НПЛ, близкая к экспериментальной формируемой импульсным генератором СИНУС, представлена на рисунке 2.2. Амплитуда напряжения изменялась в диапазоне 80–300 кВ, а величина аксиальной компоненты напряженности магнитного поля подмагничивания в диапазоне 20–70 кА/м.



Рисунок 2.1. Схема расчётной области НПЛ из в RZ версии.

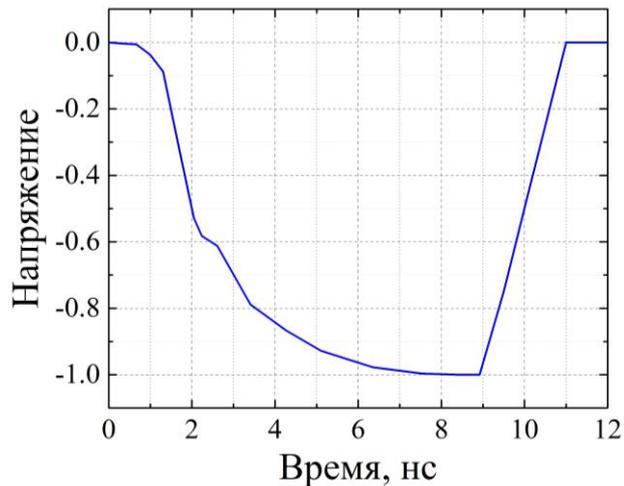


Рисунок 2.2. Форма падающего импульса напряжения в относительных единицах, использованная в расчетах.

На рисунке 2.3 представлены осциллограммы импульсов напряжения на выходе НПЛ (геометрия 1), полученные в эксперименте и численном моделировании в различных системах координат. Амплитуда падающего импульса напряжения составляла 300 кВ, внешнее аксиальное поле подмагничивания 48.3 кА/м. Данные условия соответствуют режиму максимальной эффективности преобразования энергии видеоимпульса в энергию радиоимпульса, полученной экспериментально, в НПЛ (геометрия 1).

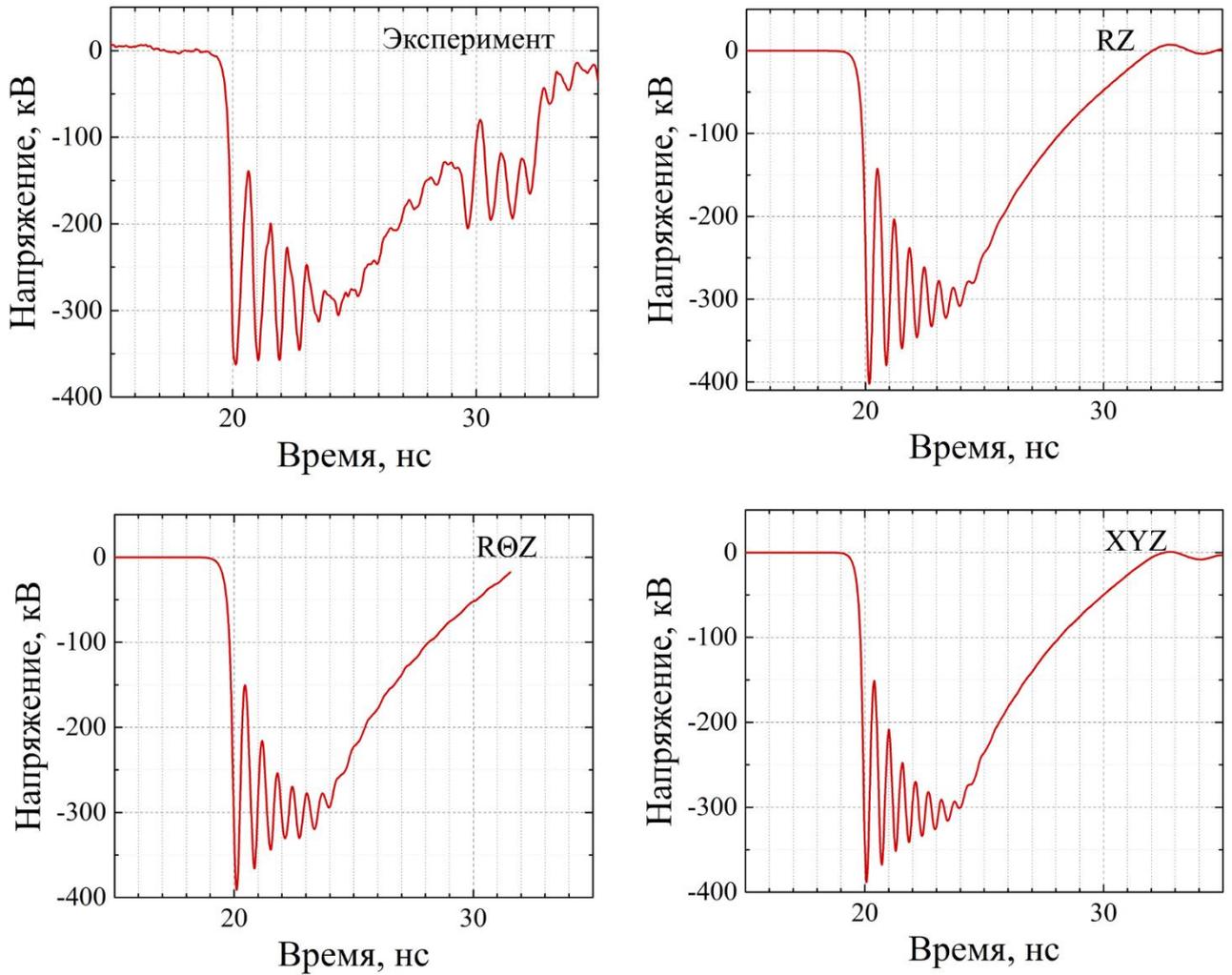


Рисунок 2.3. Осциллограммы импульсов напряжения на выходе НПЛ (геометрия 1). Эксперимент и моделирование.

Зависимости центральной частоты колебаний радиоимпульса от продольного поля подмагничивания для двух геометрий НПЛ представлены на рисунке 2.4, где представлено сравнение экспериментальных результатов, значение частоты, получаемое по формуле (2.2) и результатов моделирования в RZ и R Θ Z случаях. По сравнению с ранее опубликованными результатами, в рамках данной работы было проведено измерение диэлектрической проницаемости ферритовых колец, использованных в экспериментальной работе, для уточнения ее значения. Эти измерения показали, что в статическом приближении и на звуковых частотах (1–100 КГц) значение диэлектрической проницаемости ферритов марки ВМП имеет величину $\epsilon=13$. Результаты измерений диэлектрической проницаемости

ферритов представлены в приложении 1. На рисунке 2.5 представлены зависимости центральной частоты от усредненного по толщине феррита азимутального магнитного поля (связанного с протекающим по линии импульсом тока) в случае внешнего продольного магнитного поля 30 кА/м.

На данных графиках (рисунок 2.5) не приводятся кривые для XYZ-моделирования, так как оно не проводилось во всем диапазоне аксиальных и азимутальных магнитных полей. Причиной является значительно большая продолжительность таких расчетов, вызванная необходимостью обеспечения достаточного количества разбиений пространственной сетки. Чтобы обеспечить хорошую точность, сетка должна достигать размеров порядка 100 разбиений по каждой из поперечных координат, при этом время одного расчета составляет порядка 10 часов на персональном компьютере без использования графического ускорителя. Выборочные трехмерные расчёты показали, что возбуждение несимметричных колебаний не наблюдается, а, следовательно, осесимметричных расчетов достаточно для адекватного моделирования экспериментов.

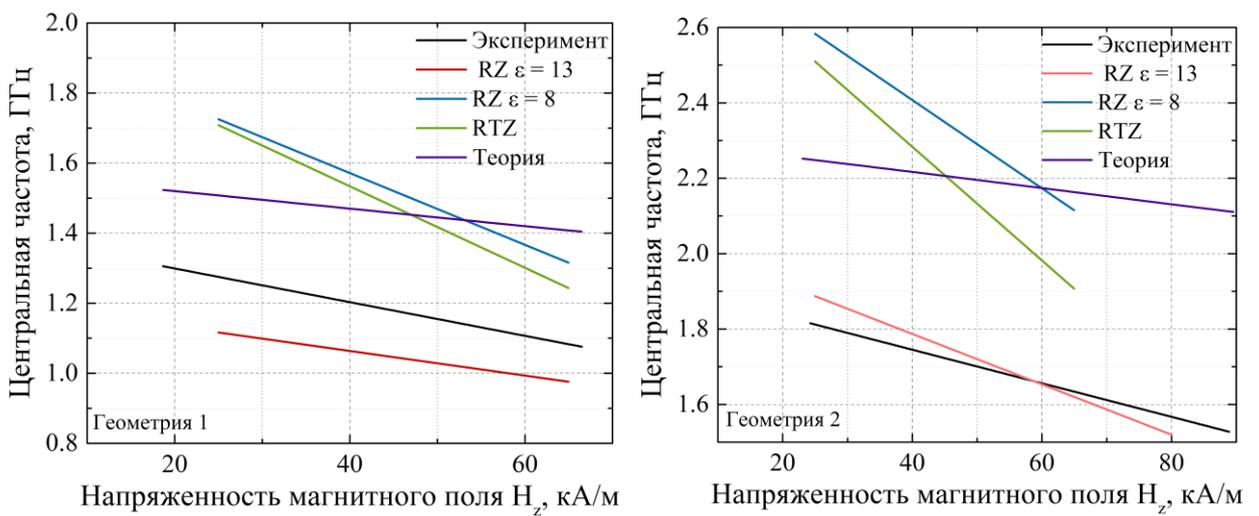


Рисунок 2.4. Зависимость центральной частоты колебаний радиоимпульса на выходе НПЛ от продольного поля подмагничивания H_z .

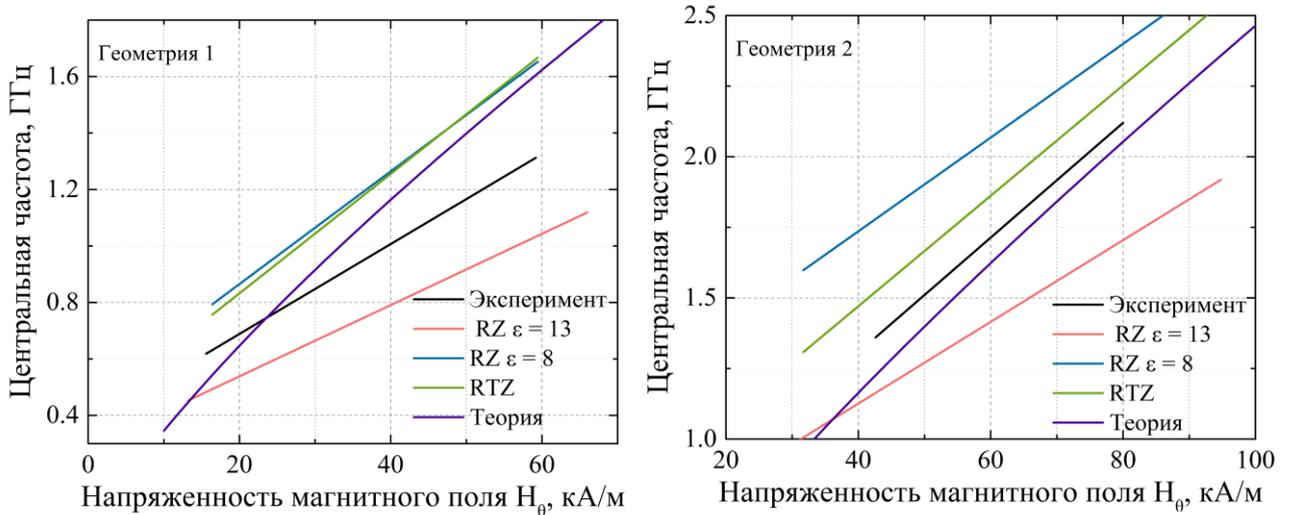


Рисунок 2.5. Зависимость центральной частоты колебаний радиоимпульса на выходе НПЛ от азимутального поля H_θ .

В случае диэлектрической проницаемости равной 13 результаты зависимости центральной частоты колебаний от продольного поля хорошо согласуются с экспериментом. Далее в работе $\varepsilon = 13$. Однако в случае диэлектрической проницаемости, равной 8, центральная частота возбуждаемых колебаний в моделировании несколько выше, чем в эксперименте. Это расхождение может быть связано с тем, что усреднение азимутального поля делается в приближении полного согласования НПЛ и передающей линии для определения величины тока в линиях. В действительности в каждом конкретном случае величины тока различны, в том числе, и из-за изменения импеданса НПЛ при распространении импульсов напряжения разных амплитуд, что может привести к смещению кривых на рисунке 2.5. Что касается эффективности преобразования энергии импульса напряжения в энергию высокочастотных колебаний, то моделирование показывает хорошее согласие с экспериментом в средней и верхней части диапазона полей подмагничивания. Осесимметричное моделирование RZ дает несколько более высокую (около 12%) величину эффективности преобразования энергии, чем R θ Z моделирование (10%). Это видно из рисунка 2.3, где амплитуда первого колебания в случае R θ Z расчета меньше, чем в случае RZ. Экспериментальное значение эффективности для геометрии 1 составляет 10%.

Дополнительные различия между моделированием и экспериментом могут быть вызваны частотной зависимостью диэлектрической проницаемости феррита вплоть до частот в единицы ГГц. Измерение такой зависимости в рамках диссертационной работы не проводилось.

2.3. Зависимость частоты возбуждаемых колебаний поперечных размеров линии

Согласно выражению (2.2) и результатам моделирования из предыдущего параграфа видно, что для того, чтобы повысить частоту генерации в НПЛ, необходимо увеличивать азимутальную компоненту напряженности магнитного поля в линии передачи. Этого можно достичь только за счет повышения мощности видеоимпульса, падающего на НПЛ. Уменьшение импеданса линии, как альтернатива, не рассматривается, поскольку это приведет к снижению электрической прочности линии. Технически значительное увеличение падающей мощности при напряжениях в сотни киловольт не простая задача, поскольку требует увеличения энергозапаса генератора видеоимпульсов. Кроме того, повышение напряжения видеоимпульса рано или поздно также приведет к пробоем коаксиала. Таким образом, для генерации импульсов с частотой выше 2 ГГц нельзя использовать НПЛ геометрии 1 и 2.

Из зависимостей частоты возбуждаемых колебаний от величины компонент напряженности магнитного поля для геометрий 1 и 2 можно сделать вывод, что в линии (геометрия 2) при фиксированном H_z , при одинаковых величинах азимутальной компоненты напряженности магнитного поля, частота генерации выше, чем в НПЛ (геометрия 1). При усредненном азимутальном магнитном поле 60 кА/м центральная частота колебаний составляет 1.04 ГГц для НПЛ (геометрия 1) и 1.42 ГГц для НПЛ (геометрия 2). Таким образом, уменьшение поперечных размеров нелинейной линии передачи в 1.4 раза привело к увеличению частоты возбуждаемых колебаний также примерно в 1.4 раза. Можно предположить, что подобная тенденция будет наблюдаться и при дальнейшем уменьшении поперечных размеров линии с ферритом.

Импеданс коаксиальной линии (геометрии 1 и 2), заполненной маслом, составляет 28 Ом в отсутствие феррита, что, как будет показано в следующих разделах, соответствует максимальной эффективности преобразования энергии видеоимпульса в радиоимпульс. Поэтому для изучения частотной зависимости возбуждаемых колебаний от поперечных размеров линии в данной работе в моделировании будут рассматриваться коаксиальные НПЛ именно с таким же импедансом.

Частотная зависимость возбуждаемых колебаний от поперечных размеров линий должна быть получена при фиксированных величинах аксиальной и азимутальной составляющей напряженности магнитного поля. В качестве этих значений возьмем такие (далее называемые оптимальными) при которых эффективность возбуждения колебаний близка к максимальной. В случае коаксиальных НПЛ с ферритом это, как правило, соответствует максимальной амплитуде первого колебания высокочастотного импульса. Из экспериментальных работ известно, что близкими к оптимальным являются величины $H_z=50$ кА/м и $H_\theta=65$ кА/м [8]. Для установления оптимальных величин компонент магнитного поля в численном эксперименте была проведена серия расчетов для геометрий 1 и 2. В расчетах длина ферритового заполнения составляла 80 см, что является типичным значением для экспериментов, после которой потери в феррите начинают препятствовать нарастанию мощности высокочастотных колебаний.

Величина аксиального поля H_z задается постоянной. В качестве величины азимутального магнитного поля принимается усредненное по радиусу феррита поле с учетом отражения падающего импульса напряжения от НПЛ:

$$\overline{H_{\theta}} = \frac{U \ln(r_2 / r_1) \sqrt{\varepsilon_0}}{120\pi(r_2 - r_1) \ln(R_2 / R_1)}; \quad (2.7)$$

здесь U – амплитуда импульса напряжения в НПЛ, ε_0 – диэлектрическая проницаемость масла, r_1 и r_2 – внутренний и внешний радиусы ферритовых колец, R_1 и R_2 – внутренний и внешний радиусы передающей линии.

Результаты численных экспериментов для НПЛ (геометрия 1) представлены в таблице 2.1. Прочерк соответствует отсутствию колебаний.

Для геометрии 1 оптимальными полями в численном эксперименте являются $H_z=40$ кА/м и $H_{\theta}=66$ кА/м. Для дальнейших расчетов выбраны именно эти величины, поскольку они близки к оптимальным и для НПЛ (геометрия 2).

Зависимость частоты возбуждаемых колебаний от поперечных размеров коаксиальной линии определялась для линий, поперечные размеры (их диаметры) которых изменялись в 1.4 раза. Таким образом, для численного эксперимента было выбрано семь линий, размеры которых представлены в таблице 2.2. Напряжение падающего импульса выбиралось в соответствии с формулой 2.7 для обеспечения величины усредненного азимутального поля в феррите 66 кА/м с учетом отражений от участка, где начинается ферритовое заполнение.

Таблица 2.1. Величина амплитуды первого колебания на выходе линии в зависимости от компонент напряженности магнитного поля.

$H_{\theta} \backslash H_z$	10 кА/м	20 кА/м	40 кА/м	60 кА/м	80 кА/м
22 кА/м	-	50.5 кВ	30 кВ	5 кВ	-
44 кА/м	94.5 кВ	100.5 кВ	99 кВ	68 кВ	32.5 кВ
66 кА/м	140 кВ	144 кВ	157 кВ	135 кВ	96.5 кВ

Таблица 2.2. Поперечные размеры (диаметры) НПЛ, для которых проводились расчеты.

№	Диаметр проводников коаксиальной линии, мм	Диаметры ферритовых колец, мм
Геометрия 0	112x56	91x56
Геометрия 1	80x40	65x40
Геометрия 2	56x28	45x28
Геометрия 3	40x20	32x20
Геометрия 4	28x14	23x14
Геометрия 5	20x10	16x10
Геометрия 6	14x7	11x7

Величины центральной частоты радиопульсов для НПЛ с различными поперечными размерами представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Величина центральной частоты колебаний в НПЛ различных поперечных размеров.

№	Напряжение падающего импульса	Центральная частота колебаний
Геометрия 0	420 кВ	0.9 ГГц
Геометрия 1	300 кВ	1.1 ГГц
Геометрия 2	210 кВ	1.5 ГГц
Геометрия 3	148 кВ	1.9 ГГц
Геометрия 4	105 кВ	2.6 ГГц
Геометрия 5	74 кВ	3.3 ГГц
Геометрия 6	52 кВ	3.8 ГГц

Ниже, когда говорится о геометрии НПЛ с определенным номером, понимается передающая линия с размерами проводников и ферритов, указанными в таблице 2.2. При этом напряжение падающего импульса соответствует таблице 2.3, а аксиальное поле подмагничивания имеет величину $H_z=40$ кА/м.

Таким образом, основываясь на результатах моделирования, можно утверждать, что частота возбуждаемых в НПЛ с насыщенным ферритом колебаний зависит не только от аксиальной и азимутальной компоненты напряженности магнитного поля, но и от поперечных размеров коаксиальных линий. С изменением поперечных размеров коаксиалов в 1.4 раза частота колебаний изменяется в среднем в 1.3 раза при фиксированных аксиальных и азимутальных полях.

2.4. Структура электромагнитных полей в линии с насыщенным ферритом

В экспериментах по возбуждению колебаний в коаксиальной передающей линии с насыщенным ферритом на вход линии подается импульс напряжения в виде ТЕМ волны. При возбуждении гиромагнитной прецессии в НПЛ за счет вращения вектора намагниченности феррита \mathbf{M} появляются отличные от нуля компоненты магнитных полей B_r и B_z , поскольку вектор намагниченности феррита движется по поверхности сферы, радиусом которой является результирующий вектор напряженности магнитного поля, повернутый относительно оси передающей линии на угол тангенс которого определяется отношением компонент напряженности магнитного поля H_θ/H_z . В соответствии с уравнениями Максвелла это также приведет к существованию всех трех компонент напряженности электрического поля на участке линии, где происходит прецессия вектора намагниченности.

С использованием численного моделирования возможно получить осциллограммы для компонент электромагнитного поля в НПЛ по мере распространения по ней видеоимпульса, что не представляется невозможным в реальном эксперименте. Типичные осциллограммы для компонент

электрического и магнитного полей в НПЛ (геометрия 1) на среднем радиусе ферритового кольца (26 мм) на длинах 20, 50 и 80 см представлены на рисунках 2.6 и 2.7. Амплитуда падающего импульса 300 кВ, внешнее магнитное поле 40 кА/м.

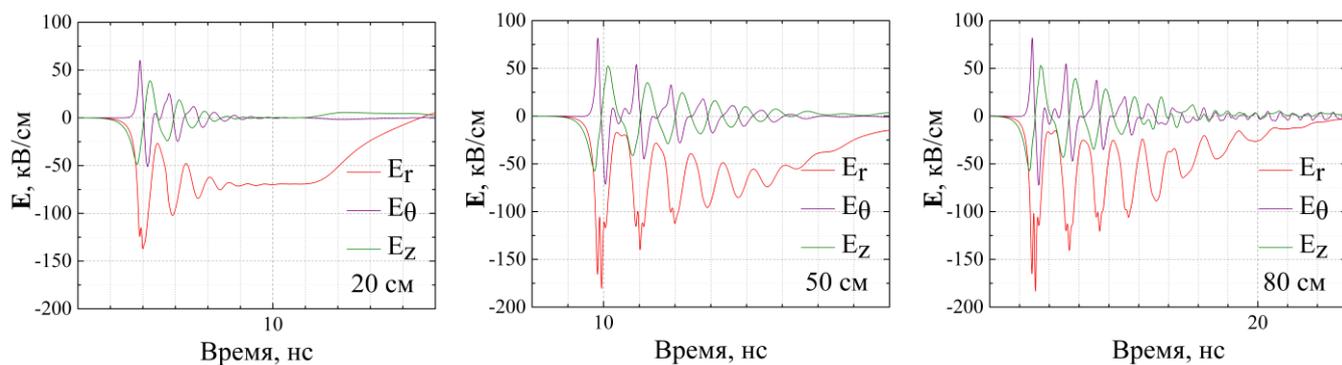


Рисунок 2.6. Осциллограммы компонент напряженности электрического поля на различных расстояниях в НПЛ (геометрия 1).

Подобная картина наблюдается и в линиях меньших поперечных размеров. На рисунках 2.8 и 2.9 представлены осциллограммы компонент напряженности электрического поля и магнитной индукции в НПЛ (геометрия 4). Амплитуда падающего импульса 105 кВ, напряженность внешнего магнитного поля 40 кА/м.

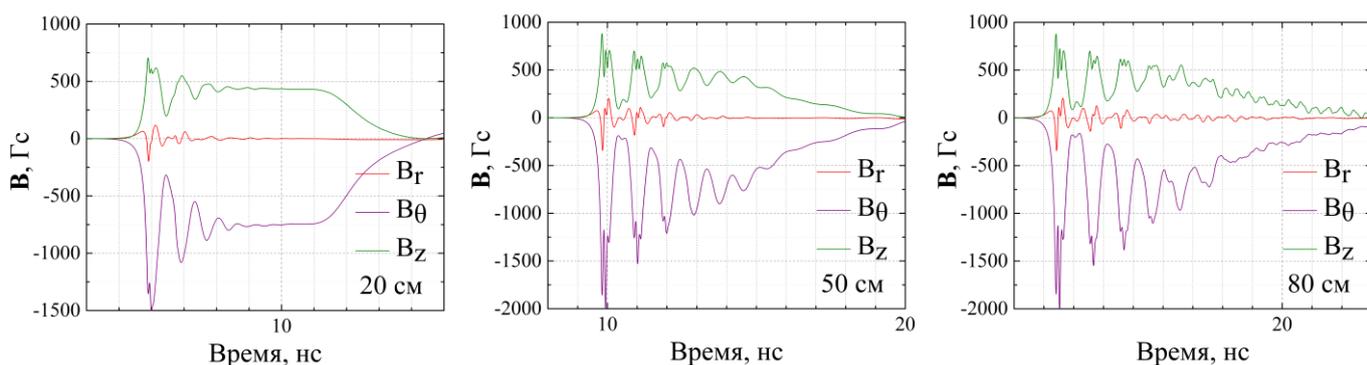


Рисунок 2.7. Осциллограммы компонент магнитной индукции на различных расстояниях в НПЛ (геометрия 1).

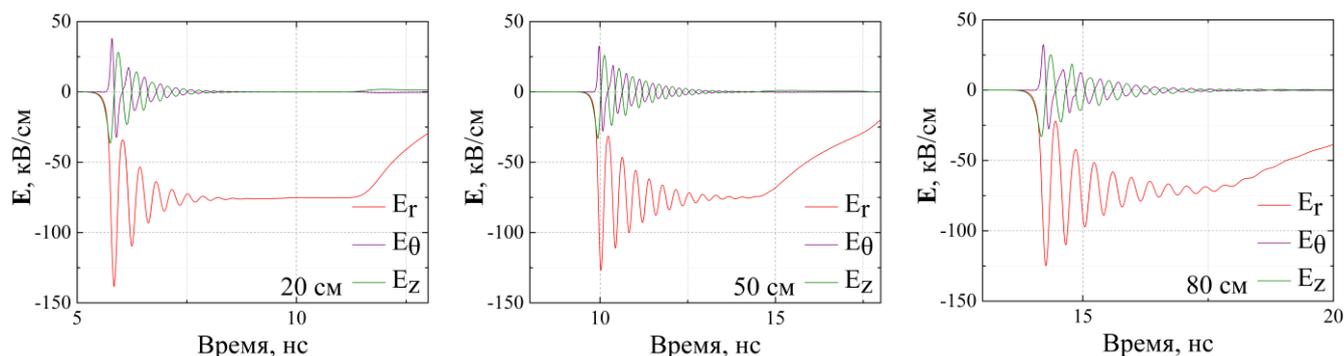


Рисунок 2.8. Осциллограммы компонент напряженности электрического поля на различных расстояниях в НПЛ (геометрия 4).

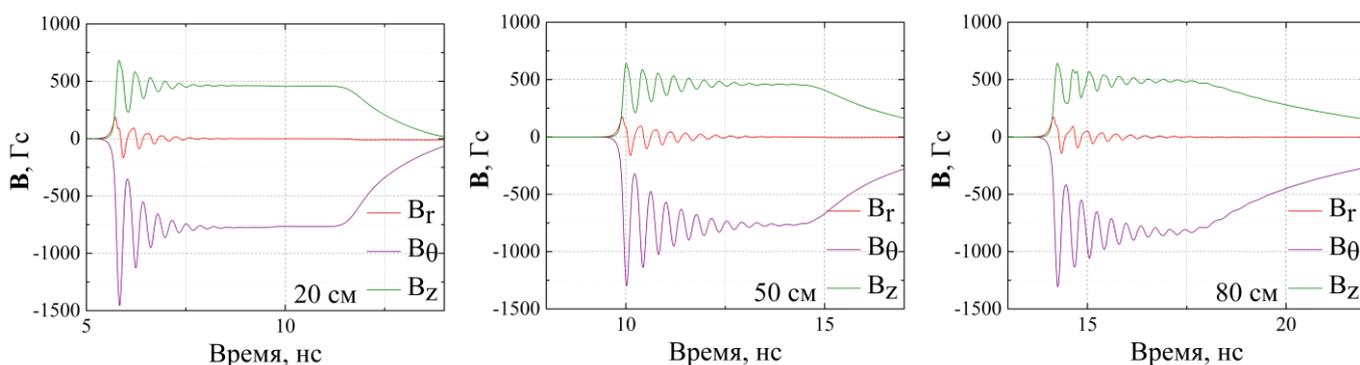


Рисунок 2.9. Осциллограммы компонент магнитной индукции на различных расстояниях в НПЛ (геометрия 4).

Видно, что по мере распространения видеоимпульса по линии передачи происходит нарастание мощности колебаний, как это и наблюдалось в экспериментах с НПЛ различной длины. На осциллограммах магнитного поля видно, что в линии больших поперечных размеров осцилляции компоненты B_r невелики относительно B_θ и B_z . Напротив, колебания азимутального и продольного электрического поля имеют амплитуду, сравнимую с радиальной компонентой. Из данных осциллограмм полей сложно сделать вывод о модовой структуре колебаний. Структура поля волны на выходе НПЛ в коаксиале без феррита с масляным заполнением представляет собой структуру ТЕМ волны. Это может быть объяснено тем, что частоты отсечки для следующих за ТЕМ волной мод коаксиальной передающей линии выше или сравнимы с частотой генерации. Для коаксиальной линии модами, следующими за ТЕМ, являются TE_{11} , TM_{01} и

TE₀₁. Критические частоты для этих волн даются следующими приближительными выражениями, справедливыми при $D-d \ll D$:

$$f_{H_{11}} \approx \frac{2c}{\pi(D+d)} \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}}, \quad (2.8)$$

$$f_{E_{01}, H_{01}} \approx \frac{c}{D-d} \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}}. \quad (2.9)$$

Здесь c – скорость света в вакууме, D – внешний диаметр, d – внутренний диаметр. Для линии (геометрия 1) критическая частота для волны TE₁₁ составляет 1.07 ГГц, что близко к центральной частоте генерации. Для волн TM₀₁ и TE₀₁ критическая частота составляет 5.07 ГГц.

На осциллограммах полей НПЛ (геометрия 1) видна примесь высоких гармоник. Они проявляются при напряжениях падающего импульса выше 200 кВ и при диэлектрической проницаемости феррита ε выше 10. Причина данного эффекта не ясна, в экспериментах он не наблюдался. При переходе к линиям меньшего поперечного размера он также пропадает. В силу выше указанных факторов изучение природы данного эффекта останется вне данной работы.

Динамика возбуждения колебаний такова, что по мере распространения видеоимпульса по НПЛ период колебаний изменяется, и формируется импульс, период колебаний во котором к его концу меньше, чем в его начале. Это можно продемонстрировать на примере изменения периода первых двух колебаний импульса (рисунок 2.10, 2.11).

Видно, что по мере распространения импульса в НПЛ период первых колебаний незначительно увеличивается, причем этот эффект сильнее выражен в передающих линиях больших поперечных размеров. Это согласуется с экспериментальными данными, согласно которым центральная частота генерируемых импульсов уменьшается с увеличением длины нелинейной передающей линии. Такое изменение периода колебаний объясняется тем, что за

счет дисперсии высокочастотные составляющие импульса, обладающие меньшей групповой скоростью, смещаются к концу импульса. В НПЛ меньших поперечных размеров групповая скорость высокочастотных компонент импульса отличается меньше. Подробнее дисперсионные свойства НПЛ с ферритом будут рассмотрены в главе 4.

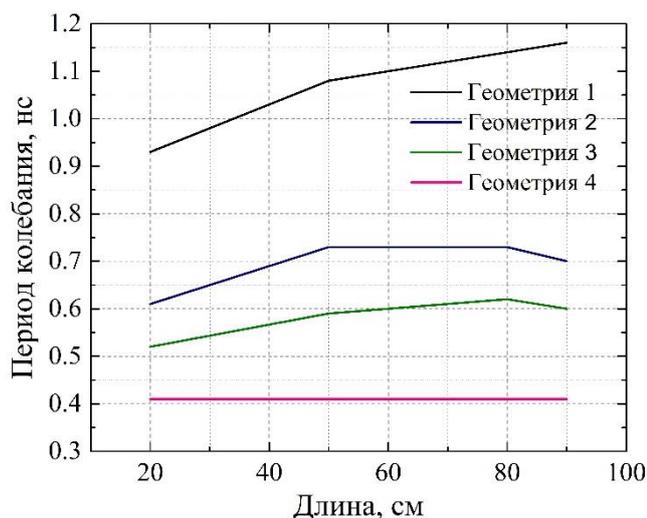


Рисунок 2.10. Период первого колебания, измеренный в разном сечении НПЛ по длине.

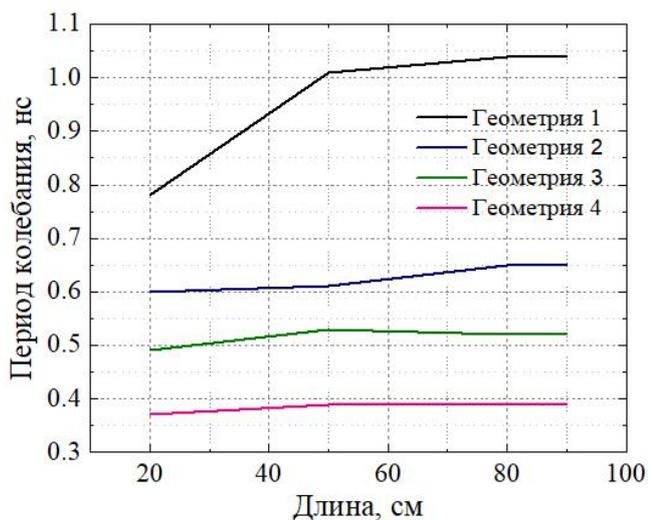


Рисунок 2.11. Период второго колебания, измеренный в разном сечении НПЛ по длине.

2.5. Зависимость параметров генерируемых ВЧ импульсов от диэлектрической проницаемости феррита

Поскольку NiZn ферриты марки ВНП, используемые в экспериментах, обладают достаточно высокой диэлектрической проницаемостью, можно предположить, что ее величина может влиять на характеристики возбуждаемых высокочастотных импульсов. Из результатов параграфа 2.2 видно, что характеристики импульсов, в частности, их центральная частота, заметно различаются в случаях, когда диэлектрическая проницаемость феррита ε составляет 8 и 13. В первую очередь это может быть вызвано тем, что изменяется согласование НПЛ с коаксиальным фидером, заполненным маслом. Однако, влияние этого эффекта не столь существенно. Действительно, при диэлектрической проницаемости феррита равной $\varepsilon = 13$ азимутальное магнитное поле внутри НПЛ лишь на 8% выше, чем при $\varepsilon = 8$. Такое изменение азимутальной компоненты не может объяснить изменение частоты возбуждаемых колебаний приблизительно в 1.5 раза для геометрии 1.

Таким образом, можно полагать, что при использовании другой марки ферритовых колец, диэлектрическая проницаемость которых иная, чем у NiZn колец марки ВНП, частотные характеристики генерируемых импульсов будут отличаться. Было проведено исследование зависимостей от ε центральной частоты возбуждаемых в НПЛ импульсов, а также эффективности генерации, определяемой по амплитуде первого колебания. В данном численном эксперименте амплитуда падающего импульса напряжения была фиксированной и не менялась для разных ε .

Для расчетов были выбраны геометрии 1, 4 и 5 из соображений того, что их размеры соответствуют размерам НПЛ, которые могут быть использованы в экспериментах или реализованы в готовых устройствах для различных практических применений; размеры ферритов в них соответствуют стандартным типоразмерам ферритовых колец. Они охватывают частотный диапазон, в

котором можно реализовать импульсно-периодический режим работы генераторов. Полученные зависимости представлены на рисунке 2.12.

Результаты моделирования показывают, что для всех геометрий с увеличением диэлектрической проницаемости примерно до 20 наблюдается близкое к линейному нарастание мощности первого колебания, сопровождаемое быстрым падением частоты колебаний. Далее с увеличением ϵ мощность и частота колебаний изменяются слабо. Вместе с ростом амплитуды высокочастотных колебаний в линии наблюдается нарастание осциллирующей аксиальной компоненты электрического поля E_z , амплитуда колебаний которой становится сравнимой с амплитудой колебаний E_r .

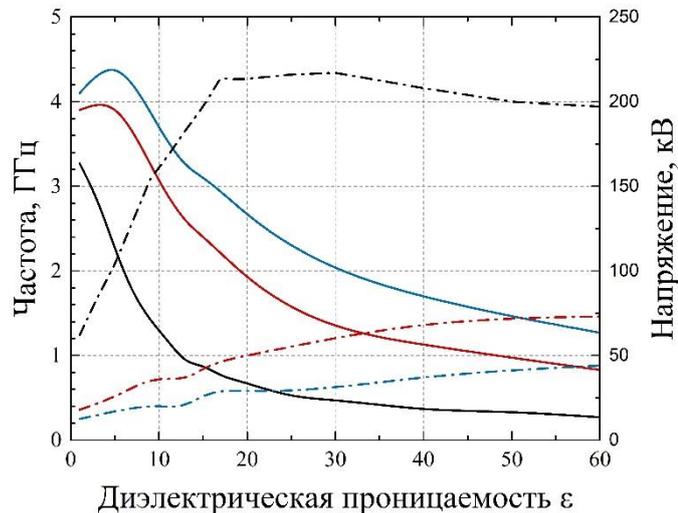


Рисунок 2.12. Зависимость центральной частоты колебаний импульса и его амплитуды первого колебания от диэлектрической проницаемости феррита. Сплошная линия – частота, штрихпунктирная – амплитуда первого колебания; черная – геометрия 1, красная – геометрия 4, синяя – геометрия 5.

Амплитуда отраженного импульса напряжения для разных величин ϵ представлена в таблице 2.4. При малых ϵ (до 5) отражение от НПЛ соответствует отражению от передающей линии, обладающей большим импедансом, чем фидерный коаксиал. Это означает, что при уменьшении диэлектрической проницаемости феррита, азимутальная компонента напряженности магнитного поля должна также уменьшаться, что должно привести скорее к падению частоты,

нежели к ее росту, как это имеет место в экспериментах и моделировании, описанных выше.

Рассматривая согласование между фидерной коаксиальной линией и НПЛ с различным ε феррита, целесообразно ввести эффективную диэлектрическую проницаемость для коаксиала с двухслойным заполнением диэлектриком. Для этого можно воспользоваться моделью, в которой емкость единицы длины коаксиального конденсатора вычисляется как емкость двух последовательно включенных конденсаторов, заполненных разными диэлектриками: ферритом и маслом. Тогда емкость единицы длины линии определяется следующим образом:

$$\frac{1}{C_0} = \frac{1}{C_f} + \frac{1}{C_d}. \quad (2.10)$$

Здесь C_0 – емкость единицы длины двухслойного коаксиала, C_f – емкость, соответствующая части поперечного сечения, заполненного ферритом, C_d – емкость, соответствующая части поперечного сечения, заполненного маслом. В свою очередь, емкость двухслойного коаксиала может быть записана как

$$C_0 = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_{eff}}{\ln(R_2 / R_1)}. \quad (2.11)$$

Используя (2.10) и (2.11), можно записать выражение для ε_{eff} :

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_d\varepsilon_f \ln(R_2 / R_1)}{(\varepsilon_d \ln(R_f / R_1) + \varepsilon_f \ln(R_2 / R_f))}. \quad (2.12)$$

Здесь R_f – внешний радиус феррита, ε_d – диэлектрическая проницаемость масла, ε_f – диэлектрическая проницаемость феррита. Значения ε_{eff} в зависимости от диэлектрической проницаемости феррита представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4. Амплитуда отраженного импульса напряжения и эффективная диэлектрическая проницаемость в зависимости от диэлектрической проницаемости феррита.

ϵ_f	Геометрия 1		Геометрия 4		Геометрия 5	
	U_{omp}	ϵ_{eff}	U_{omp}	ϵ_{eff}	U_{omp}	ϵ_{eff}
1	115 кВ	1.2	41 кВ	1.18	28 кВ	1.21
5	44 кВ	3.62	15 кВ	3.68	11 кВ	3.55
10	24 кВ	4.9	8 кВ	4.98	6 кВ	4.67
15	14 кВ	5.47	5 кВ	5.66	4 кВ	5.22
20	10 кВ	5.85	3 кВ	6.07	3 кВ	5.55
40	1 кВ	6.5	0 кВ	8.8	1 кВ	6.12
60	-1 кВ	6.76	-1 кВ	7.1	0 кВ	6.34

При малых значениях ϵ_f наблюдается сильное отражение от НПЛ, что может влиять на частоту и эффективность генерации. Для согласования НПЛ в случае малой диэлектрической проницаемости феррита в численном эксперименте над ферритовым слоем можно использовать слой диэлектрика с диэлектрической проницаемостью выше, чем у масла. Использование данного слоя диэлектрика позволит получить нужное значение ϵ_{eff} , при котором наблюдается хорошее согласование линий. В случае диэлектрической проницаемости феррита, равной 13, отражения от НПЛ уже становятся пренебрежимо малыми, в этом случае $\epsilon_{eff}=5.26$ в геометрии 1. Наименьшее значение диэлектрической проницаемости феррита, при которой можно получить эффективную диэлектрическую проницаемость НПЛ 5.26 за счет слоя диэлектрика над ферритом, составляет 4. В этом случае диэлектрик должен обладать диэлектрической проницаемостью 20, а НПЛ и коаксиальный фидер с масляным заполнением должны быть согласованы, как и в случае диэлектрической проницаемости феррита равной 13. Осциллограммы для НПЛ с диэлектрической проницаемостью феррита $\epsilon_{eff}=4$ для слоя масла и слой диэлектрика с $\epsilon=20$ между ферритом и внешним проводником

коаксиала представлены на рисунках 2.13 и 2.14, которые были получены в моделировании.

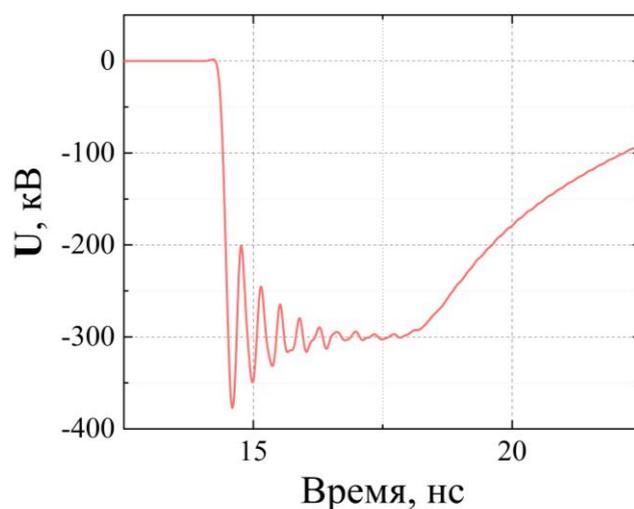


Рисунок 2.13. Осциллограмма напряжения на выходе НПЛ с диэлектрической проницаемостью феррита 4, с масляным слоем между ферритом и внешним проводником коаксиала.

Результаты моделирования показали, что в обоих случаях формы импульсов напряжения на выходе НПЛ практически не различаются. В случае слоя диэлектрика с $\epsilon=20$ от НПЛ отражался импульс напряжения амплитудой 16 кВ – такой же, как и в случае диэлектрической проницаемости феррита 13 и масла между ферритом и внешним проводником. Центральная частота высокочастотного импульса составляет 2.7 ГГц, амплитуда первого колебания 85 кВ. В случае масла между ферритом и внешним проводником центральная частота составляет 2.54 ГГц, амплитуда первого колебания 96 кВ. Амплитуда отраженной волны напряжения 53 кВ.

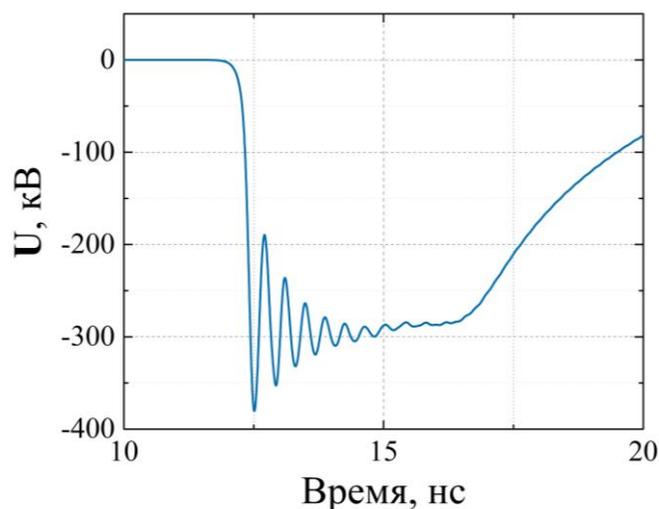


Рисунок 2.14. Осциллограмма напряжения на выходе НПЛ с диэлектрической проницаемостью феррита 4 и диэлектрическим слоем ($\epsilon=20$) между ферритом и внешним проводником коаксиала.

Подобные численные эксперименты в случае диэлектрической проницаемости феррита равной 4 были проведены и для НПЛ геометрия 4 и 5. Для геометрии 4 диэлектрическая проницаемость слоя диэлектрика должна составлять 56. В случае слоя диэлектрика центральная частота составляет 3.56 ГГц и амплитуда первого колебания 25 кВ. В случае слоя масла центральная частота составляет 3.88 ГГц и амплитуда первого колебания 19 кВ. Для геометрии 5 диэлектрическая проницаемость слоя диэлектрика должна составлять 11. В случае слоя диэлектрика центральная частота составляет 4.55 ГГц и амплитуда первого колебания 13 кВ. В случае слоя масла центральная частота составляет 4.2 ГГц и амплитуда первого колебания 11 кВ.

Результаты данной серии численных экспериментов указывают на то, величина диэлектрической проницаемости феррита сильно влияет на эффективность возбуждения колебаний в НПЛ и на их частоту. При обеспечении согласования между НПЛ и коаксиальным фидером, что соответствует максимальной мощности видеоимпульса, поступающей в НПЛ, существенного роста мощности высокочастотных колебаний не наблюдается. Из осциллограмм напряжения на выходе НПЛ видно, что в случае согласования время пробега по

НПЛ меньше, чем в рассогласованном режиме, несмотря на более высокое значение эффективной диэлектрической проницаемости НПЛ ε_{eff} .

В случае согласования, азимутальная компонента напряженности магнитного выше на 32%. Несмотря на то, что феррит первоначально находится в насыщенном состоянии, экспериментальные наблюдения показывают, что остаточные магнитные свойства НПЛ, связанные с прецессией вектора намагниченности, влияют на время пробега импульса по линии передачи. Эти магнитные свойства НПЛ в первом приближении могут быть описаны эффективным значением магнитной проницаемости, характеризующей всю передающую линию. Рост азимутальной компоненты напряженности магнитного поля должен приводить к уменьшению этой величины, что приведет к уменьшению времени пробега импульса по НПЛ. Зависимость эффективной магнитной проницаемости от магнитных полей в нелинейной передающей линии будет рассмотрена ниже.

2.6. Зависимость эффективной магнитной проницаемости линии с насыщенным ферритом от магнитных полей

Эксперименты показывают, что несмотря на то, что феррит находится в насыщенном состоянии во внешнем магнитном поле, магнитная проницаемость НПЛ не равна единице (с точки зрения согласования линий и времени пробега импульса по НПЛ). Это связано с тем, что у насыщенного феррита в слабых магнитных полях магнитная проницаемость отлична от единицы и может быть вычислена по следующей формуле:

$$\mu = 1 + \frac{M_s}{\mu_0 H_\Sigma}. \quad (2.13)$$

Наличие остаточной магнитной проницаемости проявляется в первую очередь в заметном увеличении времени пробега электромагнитного импульса по НПЛ. Формула (2.13) дает приближенное значение, которое как правило на практике

является завышенным. Под эффективной магнитной проницаемостью НПЛ будем понимать некую постоянную величину, определяющую магнитные свойства всего поперечного сечения коаксиала, а не только части ферритового заполнения. Введение эффективной магнитной проницаемости всей НПЛ является удобным инструментом для практических задач, поскольку с ее помощью можно вычислить время пробега по НПЛ и использовать ее для согласования линий передачи и коаксиальных фидеров. Магнитная проницаемость феррита может быть пересчитана из эффективной магнитной проницаемости линии, если это необходимо.

Определить зависимость эффективной магнитной проницаемости μ_{eff} от компонент магнитных полей можно двумя способами. Первым способом является определение μ_{eff} из согласования НПЛ и обычной коаксиальной фидерной линии волновое сопротивление которой известно. В численном моделировании сначала определяется волновое сопротивление ρ_0 НПЛ без магнитных свойств, т.е. НПЛ представляет собой слой диэлектрика с диэлектрической проницаемостью равной 13, надетый на внутренний проводник коаксиала и масляного слоя сверху. После чего проводится расчет, в котором у НПЛ уже присутствуют магнитные свойства в соответствии с уравнением Ландау-Лифшица. В данном расчете определяется импеданс НПЛ с магнитными свойствами ρ по амплитуде отраженного импульса. Изменение импеданса НПЛ в данном случае определяется только эффективной магнитной проницаемостью, которая может быть вычислена из следующего соотношения $\rho = \rho_0 \sqrt{\mu_{eff}}$.

Другим способом, которым можно определить величину эффективной магнитной проницаемости является регистрация изменения времени пробега по НПЛ при наличии и в отсутствии в ней магнитных свойств, связанных с насыщенным ферритом, аналогично методу согласования. В данном случае величину эффективной магнитной проницаемости НПЛ можно определить из соотношения:

$$v = \frac{v_0}{\sqrt{\mu_{eff}}}. \quad (2.14)$$

Численный эксперимент проводился для НПЛ геометрия 1. Амплитуда падающего импульса напряжения изменялась от 100 до 300 кВ с шагом 100 кВ. Величина аксиального поля подмагничивания изменялась в интервале от 20 до 100 кА/м. Полученные зависимости $\mu_{eff}(H_z)$ представлены на рисунках 2.15–2.17 для разных амплитуд падающего импульса напряжения.

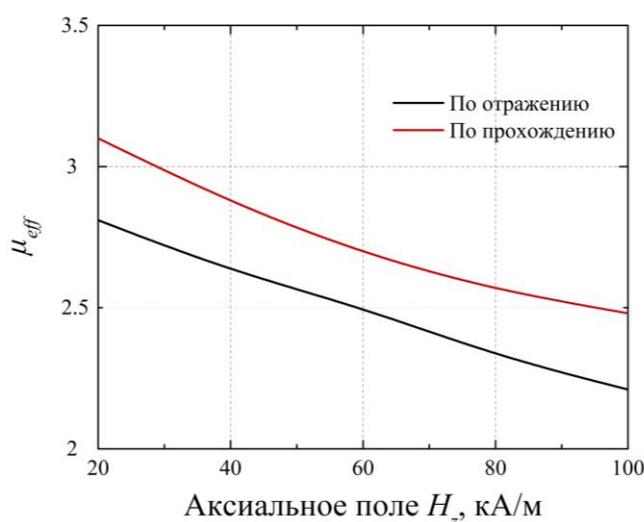


Рисунок 2.15. Зависимость эффективной магнитной проницаемости от аксиального магнитного поля в НПЛ для напряжения падающего импульса 300 кВ, что соответствует азимутальному полю 66 кА/м.

Результаты численного эксперимента показывают, что зависимости $\mu_{eff}(H_z)$, полученные разными методами имеют одинаковый характер, но при этом количественно отличаются. Это скорее всего связано, во-первых, с погрешностью численного расчета, поскольку время распространения сигнала по НПЛ имеет небольшую зависимость от числа разбиений сетки. Во-вторых, скорость распространения волны определялась как скорость распространения вершины фронта импульса напряжения, при этом по мере нарастания мощности колебаний фронт импульса начинает искажаться, что также вносит погрешность в определении времени распространения импульса. В свою очередь метод определения эффективной магнитной проницаемости по амплитуде отраженного

импульса напряжения не имеет таких нюансов, вносящих дополнительные погрешности в измерения.

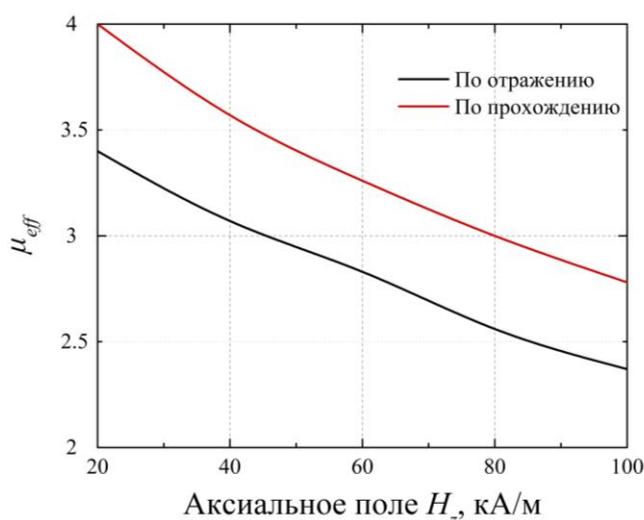


Рисунок 2.16. Зависимость эффективной магнитной проницаемости от аксиального магнитного поля в НПЛ для напряжения падающего импульса 200 кВ, что соответствует азимутальному полю 44 кА/м.

Также интерес представляет зависимость эффективной проницаемости от модуля вектора напряженности магнитного поля. Она представлена на рисунке 2.18 для μ_{eff} определенного через импеданс НПЛ. Из результатов видно, что при одной и той же величине модуля вектора напряженности магнитного поля значения μ_{eff} для разного азимутального поля близки друг к другу. Тем не менее, моделирование показывает, даже в сильных магнитных полях в НПЛ с насыщенным ферритом, эффективная магнитная проницаемость не равна единице. Таким образом можно сделать вывод, что для диапазонов магнитных полей, при которых в эксперименте наблюдается возбуждение высокочастотных колебаний эффективная магнитная проницаемость коаксиальной НПЛ изменяется в интервале от 2 до 3.

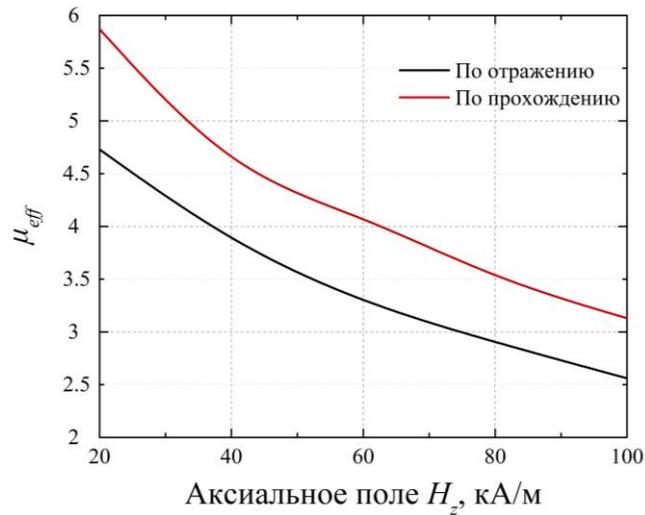


Рисунок 2.17. Зависимость эффективной магнитной проницаемости от аксиального магнитного поля в НПЛ для напряжения падающего импульса 100 кВ, что соответствует азимутальному полю 22 кА/м.

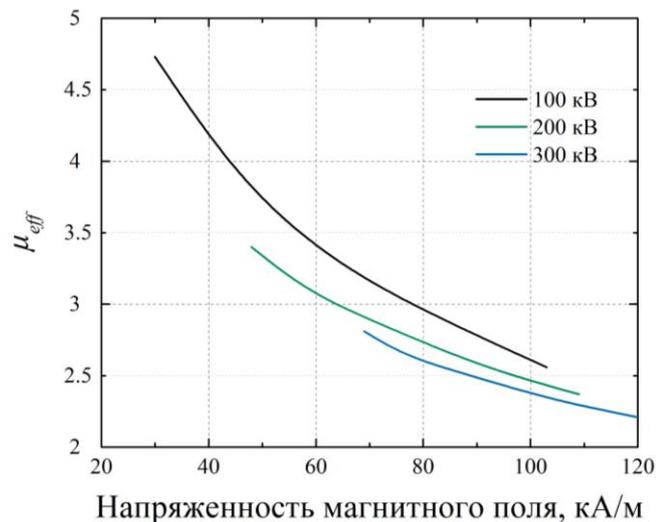


Рисунок 2.18. Зависимость эффективной магнитной проницаемости от модуля вектора напряженности магнитного поля в НПЛ.

2.7. Зависимость частоты и эффективности генерации высокочастотных импульсов в НПЛ от коэффициента поперечного заполнения ферритом

Обычно в экспериментах с НПЛ феррит занимает примерно половину площади поперечного сечения линии. Коэффициент поперечного заполнения

коаксиальной передающей линии ферритом может быть задан как отношение площади поперечного сечения феррита к полной площади поперечного сечения передающей линии:

$$\chi = \frac{R_f^2 - r_f^2}{R^2 - r^2}. \quad (2.15)$$

Зависимость частоты и эффективности генерации в НПЛ от коэффициента поперечного заполнения в численном моделировании рассматривалась для НПЛ геометрия 1–3. Для НПЛ меньшего поперечного размера подобный численный эксперимент занимает больше времени из-за пропорционального изменения временного шага. Результаты, полученные для геометрий 1–3, могут быть качественно экстраполированы и на меньшие поперечные размеры НПЛ.

На рисунках 2.19 и 2.20 представлены зависимости центральной частоты радиоимпульса и амплитуды первого колебания от коэффициента поперечного заполнения НПЛ ферритом. Амплитуда первого колебания нормирована на амплитуду падающего импульса (300 кВ для геометрии 1 и 2, 148 кВ для геометрии 3). Аксиальное магнитное поле составляло 40 кА/м.

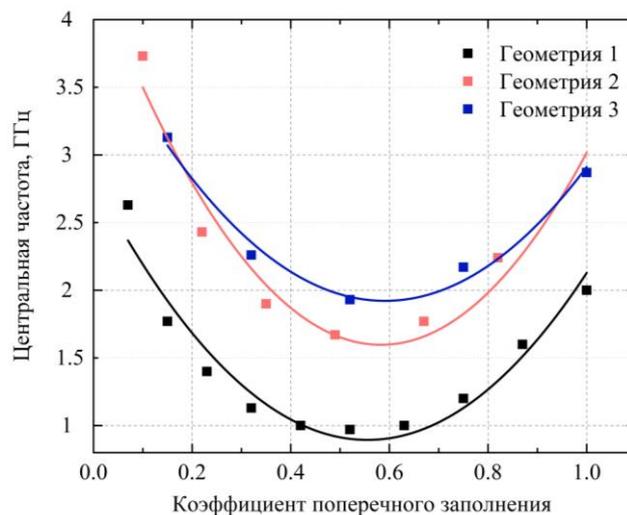


Рисунок 2.19. Зависимость центральной частоты радиоимпульса от коэффициента поперечного заполнения НПЛ ферритом.

Результаты моделирования показали, что максимальная амплитуда первого колебания достигается, когда коэффициент поперечного заполнения НПЛ ферритом равен 0.4–0.5. При этом максимальная эффективность соответствует минимальной частоте колебаний. Результаты хорошо согласуются с имеющимся экспериментальным опытом, изложенном в диссертационной работе [84].

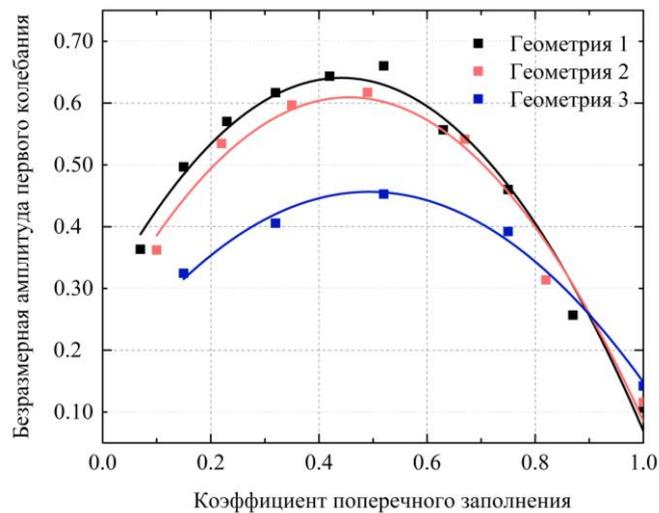


Рисунок 2.20. Зависимость безразмерной амплитуды первого колебания радиоимпульса от коэффициента поперечного заполнения НПЛ ферритом.

Зависимость частоты колебаний от коэффициента поперечного заполнения имеет две ветви, при этом левая ветвь при малых χ обладает слегка большей крутизной. Что касается амплитуды первого колебания, то для нее характерен более резкий спад при $\chi \rightarrow 1$. Когда поперечное сечение НПЛ полностью заполнено ферритом $\chi=1$, амплитуда колебаний минимальна для всех исследованных геометрий, и при этом глубина модуляции импульса примерно в 4 раза меньше, чем при $\chi=0.1$.

2.8. Зависимость мощности высокочастотного импульса от волнового сопротивления передающей линии

Как отмечалось выше, частота и мощность СВЧ-импульса, генерируемого в НПЛ с ферритом, зависит от азимутального магнитного поля, создаваемого протекающим по линии импульсом тока. В работе рассматривались НПЛ с

импедансом, равным 28 Ом, поскольку при этом импедансе в моделировании и экспериментах наблюдалась высокая эффективность генерации. Представляет интерес получить зависимость мощности СВЧ-импульса от импеданса коаксиальной передающей линии, в которой расположен феррит в численном эксперименте.

Моделирование проводилось для НПЛ (геометрия 2) при амплитуде падающего импульса напряжения 300 кВ. Диаметр внутреннего проводника и размеры ферритовых колец были фиксированы. Импеданс изменялся за счет изменения диаметра внешнего проводника в интервале от 19 до 50 Ом. Импеданс 19 Ом соответствует полному поперечному заполнению НПЛ ферритом. Импеданс 50 Ом был выбран верхним пределом из соображений того, что в литературе не встречается информации о генераторах на основе НПЛ с большим импедансом. Можно ожидать, что увеличение волнового сопротивления передающей линии приведет к дальнейшему падению пиковой мощности высокочастотного импульса из-за снижения мощности видеоимпульса, поступающей в линию.

На рисунке 2.21 представлены результаты моделирования зависимости амплитуды первого колебания высокочастотного импульса от импеданса линии. Поскольку при изменении диаметра внешнего проводника линии при фиксированных размерах ферритовых колец изменяется и коэффициент поперечного заполнения ферритом, зависимость амплитуды первого колебания от коэффициента поперечного заполнения передающей линии ферритом для этого численного эксперимента также представлена на рисунке 2.21.

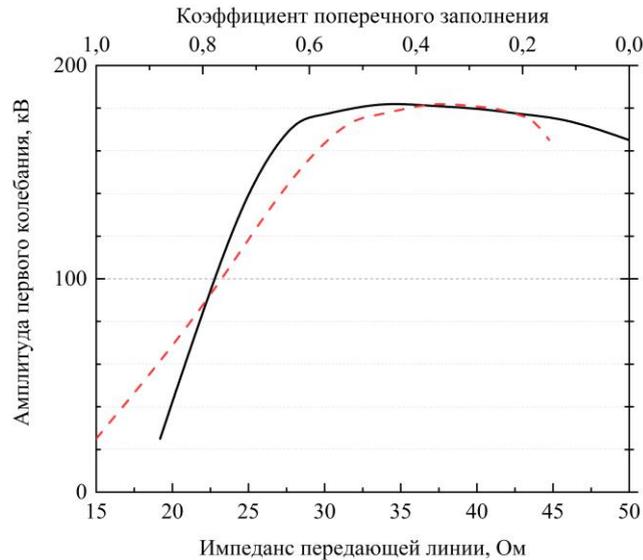


Рисунок 2.21. Зависимость амплитуды первого колебания от импеданса передающей линии и коэффициента поперечного заполнения ферритом. Черная сплошная линия – зависимость от импеданса, красная пунктирная линия – зависимость от коэффициента поперечного заполнения.

Результаты моделирования показали, что начиная с импеданса примерно 25 Ом величина амплитуды первого колебания в высокочастотном импульсе изменяется слабо. При этом с ростом волнового сопротивления частота колебаний увеличивается с 1,5 ГГц до 1 ГГц. Однако несмотря на то, что амплитуда первого колебания с ростом импеданса меняется слабо, пиковая мощность СВЧ-импульса на выходе НПЛ падает значительно. Зависимость пиковой мощности высокочастотного импульса от импеданса линии представлена на рисунке 2.22. Форма зависимости амплитуды первого колебания от коэффициента поперечного заполнения оказалась типичной для правой ветви данной зависимости, однако для ее левой ветви характерный спад не наблюдается, что может быть связано с различным согласованием НПЛ в двух численных экспериментах.

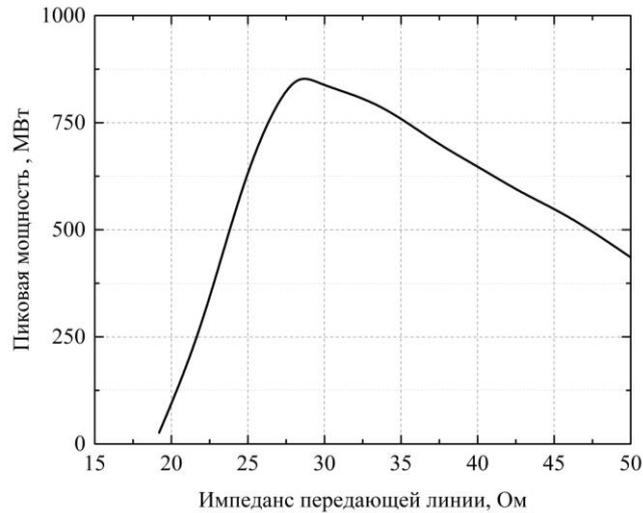


Рисунок 2.22. Зависимость пиковой мощности СВЧ-импульса от импеданса линии.

Как видно из результатов моделирования, максимальная пиковая мощность высокочастотного импульса может быть получена в интервале волновых сопротивлений коаксиальной передающей линии от 25 до 35 Ом. Можно сделать вывод, что линии, рассматриваемые в данном разделе работы, обладают оптимальным импедансом по пиковой мощности высокочастотных колебаний на выходе НПЛ с ферритом.

2.9. Изменение волнового импульса с ростом длины пробега по линии

Ранее, в отсутствие возможностей численного моделирования, разработка и оптимизация генераторов высокочастотных импульсов на основе НПЛ с насыщенным ферритом проводились эмпирически. В литературе практически нет информации о том, как изменяется волновой импульс, распространяясь в НПЛ на длину более 1 метра. В первую очередь это связано с требованиями, накладываемыми на высоковольтный импульс, падающий на НПЛ. Как показывает практика, его длительность должна существенно превышать 10 нс. Во-вторых, для линии большой длины требуется соленоид соответствующей длины, создающий магнитное поле величиной до 100 кА/м. Для такого соленоида

требуется специальная система питания. В-третьих, имеющаяся информация о зависимости амплитуды высокочастотных колебаний в импульсе от длины НПЛ говорит о том, что в линии (геометрия 1) на длине 1 метр происходит насыщение этой амплитуды, а после 1.1 метра она начинает уменьшаться [84]. Длина НПЛ в данной экспериментальной работе была ограничена длиной соленоида.

Уменьшение амплитуды высокочастотных колебаний при увеличении длины линии свыше 1 метра может указывать на дополнительные, не связанные со вторым слагаемым в уравнении Ландау-Лифшица каналы потерь высокочастотной энергии в передающей линии, за счет которых отток мощности высокочастотных колебаний становится больше притока мощности на длине 1 метр. Возможно, это высокочастотные диэлектрические потери в ферритах. Этот факт затрудняет возможность экспериментального исследования данной задачи. Конечно, для подобного эксперимента можно использовать высокочастотные ферриты, в которых диэлектрические потери малы, однако это значительно увеличит стоимость исследования. Использование численного моделирования позволяет наблюдать динамику волнового импульса в НПЛ с увеличением длины свыше 1 метра. В модели, рассматриваемой в данной работе, единственным диссипативным механизмом в НПЛ является затухание прецессии вектора намагниченности.

Численный эксперимент с увеличением длины НПЛ был проведен для линий геометрия 1 и геометрия 2 (амплитуда падающего импульса составляла 300 кВ). Полученные осциллограммы представлены на рисунках 2.23 и 2.24.

На вход НПЛ подавался импульс с длительностью фронта 0.5 нс, такой фронт уже может считаться ударным для данных линий, поэтому в линии происходит быстрое нарастание амплитуды первых колебаний. В обеих геометриях амплитуда достигает максимума на длине порядка 100 см. С дальнейшим увеличением длины происходит незначительное нарастание амплитуды последующих колебаний при неизменной амплитуде первого колебания. Можно

сделать вывод, длина 80–100 см является оптимальной по пиковой мощности СВЧ-импульса, что согласуется с экспериментальными данными.

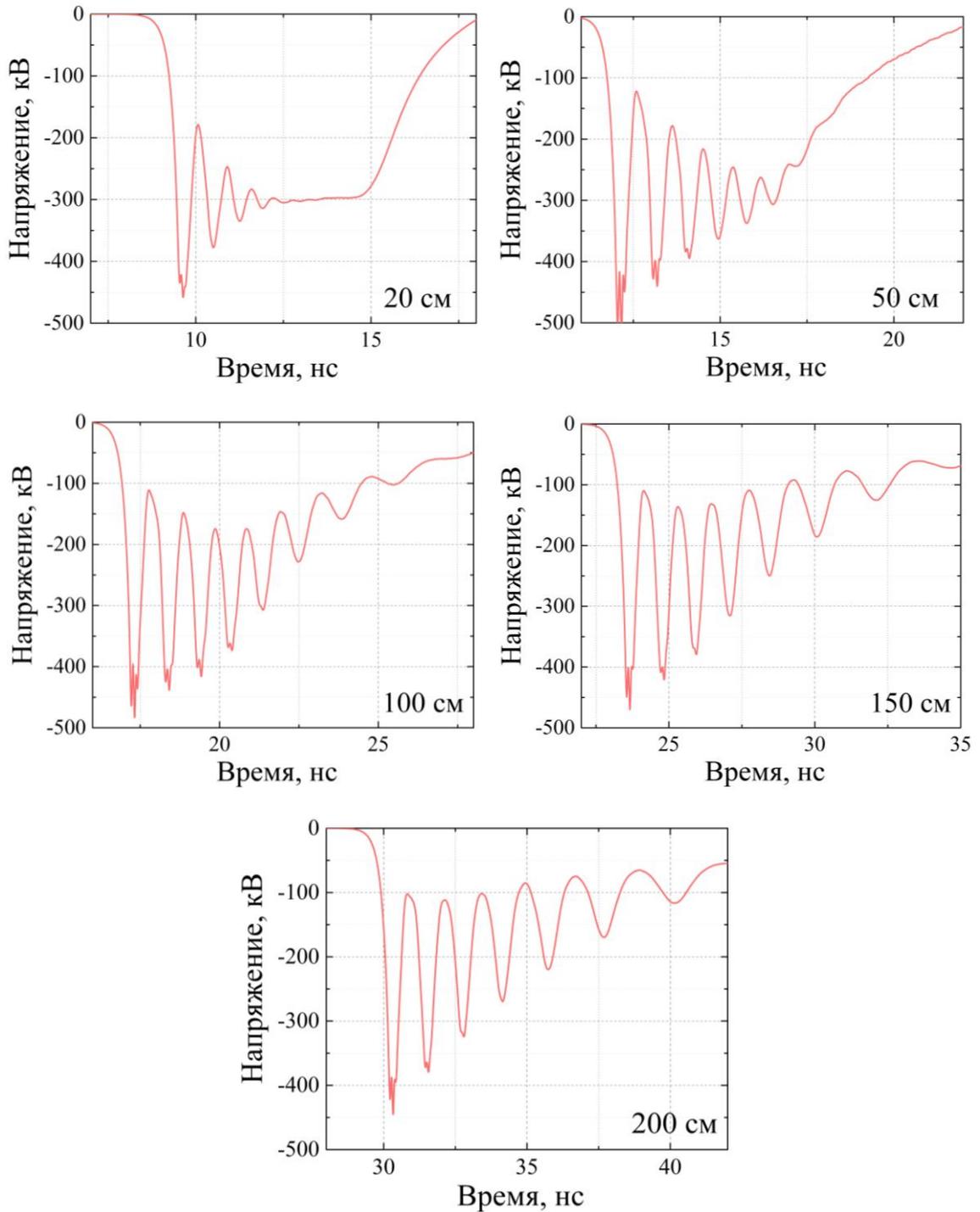


Рисунок 2.23. Динамика волнового импульса с изменением длины НПЛ в геометрии 1.

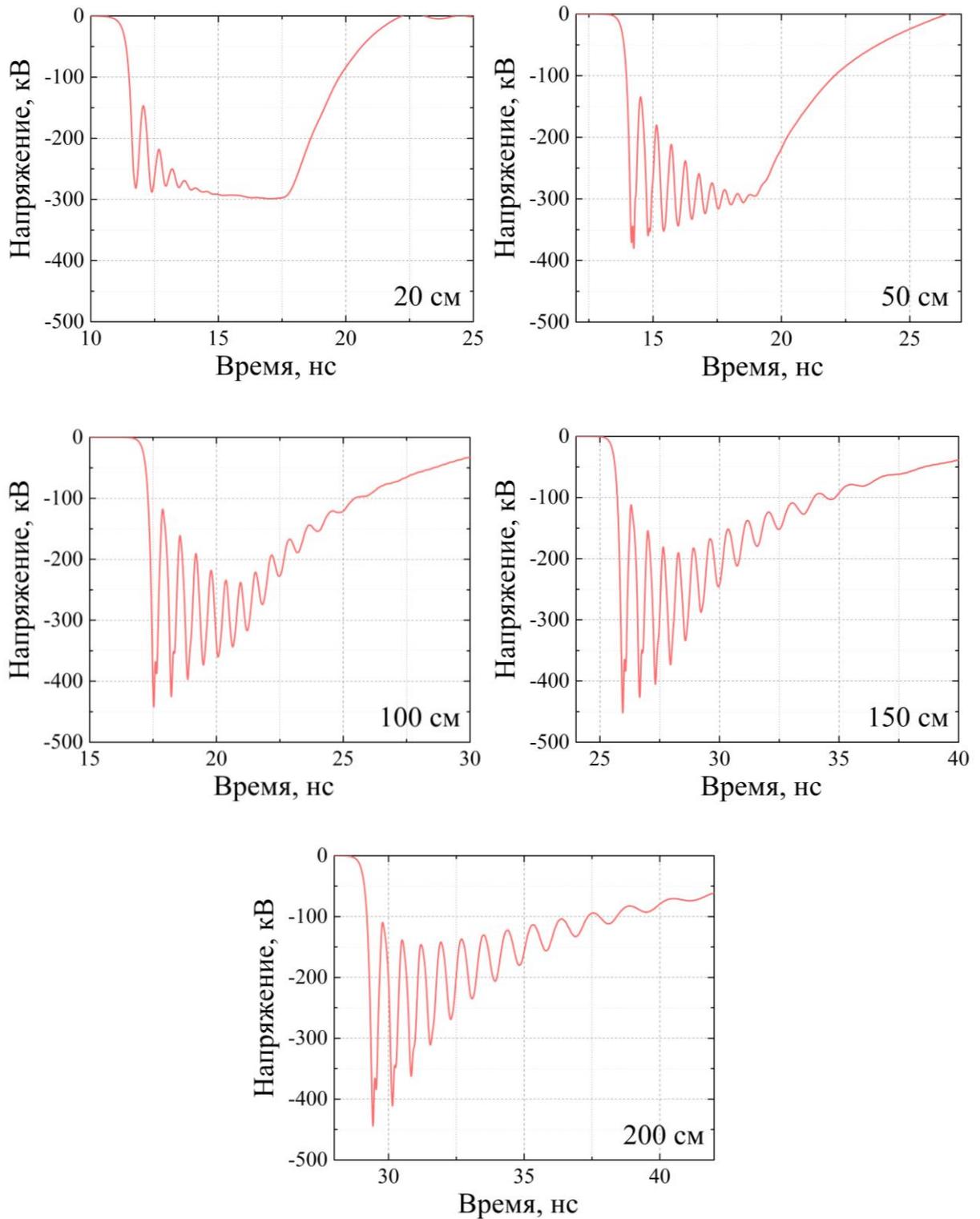


Рисунок 2.24. Динамика волнового импульса с изменением длины НПЛ в геометрии 2.

Количество осцилляций также перестают увеличиваться в линии длиной более 100 см. По мере увеличения длины НПЛ центральная частота колебаний падает: для линии геометрия 1 – с 1.13 ГГц до 0.74 ГГц, для линии геометрия 2 – с 1.5 ГГц

до 1.32 ГГц на длинах от 100 до 200 см. Это заметно на осциллограммах в изменении периода первых четырех колебаний. Уменьшение частоты, а также уменьшение амплитуды колебаний в импульсе на выходе линии длиной 200 см указывает, по всей видимости, на дисперсионное расплывание импульса.

Выводы к главе 2

Частота колебаний, возбуждаемых в нелинейных передающих линиях с насыщенным ферритом, зависит не только от величин компонент напряженности магнитного поля. Наблюдается сильная зависимость частоты от поперечных размеров линии передачи и ферритовых колец. Результаты моделирования показали, что с уменьшением поперечных размеров системы в 1.4 раза происходит рост центральной частоты генерируемого радиоимпульса примерно в 1.3 раза при одних и тех же величинах компонент напряженности магнитного поля. Также частота возбуждаемых колебаний имеет сильную зависимость от диэлектрической проницаемости феррита. При увеличении диэлектрической проницаемости до 20 частота колебаний уменьшается, в 2–3 раза в зависимости от поперечных размеров линии, после чего уменьшение частоты замедляется.

При малых значениях диэлектрической проницаемости феррита, в случае, когда феррит располагается непосредственно на внутреннем проводнике линии, высокочастотные колебания малы. Близкая к максимальной амплитуда колебаний наблюдается при диэлектрической проницаемости феррита около 15.

Результаты моделирования показали, что максимальная амплитуда первого колебания высокочастотного импульса достигается при коэффициенте поперечного заполнения НПЛ ферритом 0.4–0.5. 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 видеоимпульса в высокочастотные колебания

наблюдается, когда ферритовые кольца располагаются внутри коаксиала с импедансом от 25 до 35 Ом.

В осциллирующей линии 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. Подробный модовый анализ возбуждаемых волн не проводился.

По мере распространения импульса в НПЛ происходит насыщение мощности колебаний на длине порядка 1 метра. При дальнейшем движении импульса максимальная амплитуда колебаний начинает уменьшаться, частота колебаний также непрерывно уменьшается, что проявляется в увеличении интервалов между локальными максимумами импульса напряжения.

Глава 3

Влияние конфигурации нелинейной передающей линии с насыщенным ферритом на эффективность генерации высокочастотных импульсов

3.1. Влияние расположения ферритовых колец в поперечном сечении линии на эффективность генерации высокочастотных импульсов

В предыдущей главе работы рассмотрена конфигурация линий с ферритом, в которой феррит расположен непосредственно на внутреннем проводнике коаксиала. Такая конфигурация НПЛ хорошо показала себя в экспериментах как по обострению фронта высоковольтных импульсов, так и по генерации мощных импульсов СВЧ-излучения. Однако для полноты следует рассмотреть случаи различного расположения феррита. Об одном из частных случаев – полное заполнение ферритом – уже было сказано в предыдущей главе; в этом случае эффективность низка.

Можно выделить три варианта расположения феррита: непосредственно у внутреннего проводника, непосредственно у внешнего проводника, и между проводниками симметрично относительно среднего радиуса коаксиальной передающей линии. Рассмотрим то, чем различаются данные конфигурации НПЛ с точки зрения генерации СВЧ-импульсов.

Экспериментально выполнить эту задачу в полной мере затруднительным, поскольку доступные типоразмеры NiZn ферритовых колец довольно ограничены. Поэтому исследование выполнялась с использованием численного эксперимента. Рассматривались конфигурации НПЛ, основанные на геометриях 1, 2, 3, описанных в предыдущей главе. Расположение феррита изменялось с сохранением площади поперечного сечения ферритового кольца.

Для геометрии 1, размеры проводников которой составляют 80x40 мм и размеры ферритовых колец 65x40, площадь поперечного сечения феррита 20.6 см². Таким образом, для геометрии 1 рассматривались три конфигурации с ферритовыми кольцами 65x40, 70x48, 80x62 мм. Осциллограммы для этих трех

вариантов НПЛ, представлены на рисунке 3.1. Моделирование показало, что при небольшом варьировании площади поперечного сечения феррита, при его расположении вблизи внешнего проводника и между проводниками передающей линии, амплитуда первого колебания и частота колебаний импульса изменяются незначительно. Внешнее магнитное поле 40 кА/м является оптимальным для всех трех конфигураций. Из осциллограмм видно, что в случае расположения ферритов вблизи проводников линии передачи мощность СВЧ-импульса максимальна. Минимальная мощность наблюдается, когда феррит находится посередине зазора коаксиала. В этом случае частота колебаний значительно выше, чем в первых двух конфигурациях.

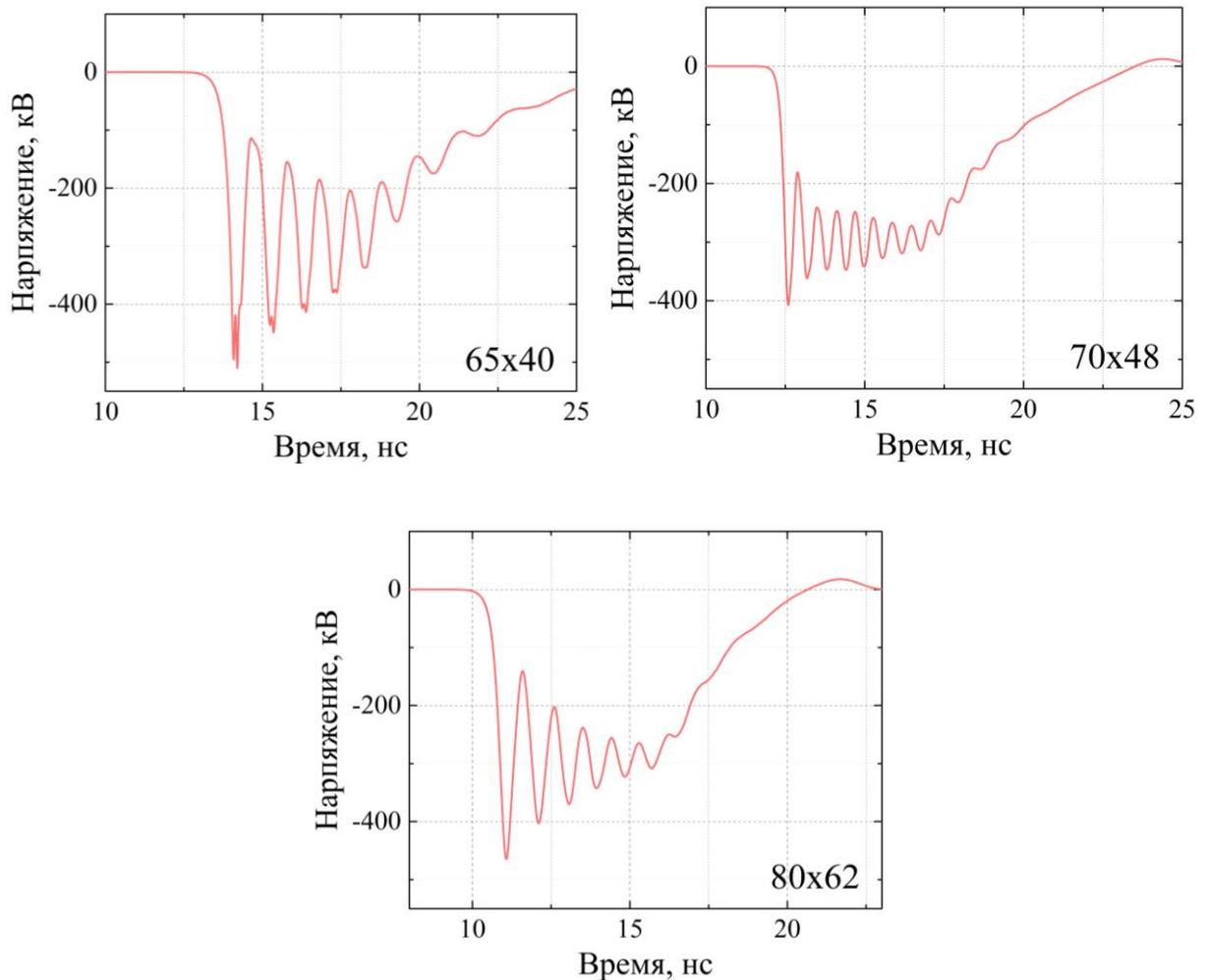


Рисунок 3.1. Осциллограммы импульсов на выходе НПЛ (геометрия 1) для различных вариантов расположения феррита.

Сводные результаты моделирования представлены в таблице 3.1. В ней использованы обозначения: амплитуда первого колебания – U_1 , величина отраженного от НПЛ импульса напряжения – U_{ref} (знак плюс обозначает, что напряжение не изменило знака относительно падающего импульса напряжения), центральная частота колебаний высокочастотного импульса – f , характерное время распространения импульса по линии (длина которой не изменялась) – τ .

Таблица 3.1. Результаты моделирования различных конфигураций НПЛ.

Размер феррита, мм	U_1 , кВ	U_{ref} , кВ	f , ГГц	τ , нс
Геометрия 1 80x40				
65x40	186	20	0.97	13.2
70x48	113	30	1.67	11.9
80x62	162	34	1.07	10
Геометрия 2 56x28				
45x28	185	9	1.63	13
49x34	104	22	2.57	11.7
56x43	150	26	1.7	10.3
Геометрия 3 40x20				
32x20	67	10	1.87	14.4
36x26	45	16	3.07	12.3
40x31	48	17	1.9	11.3

Для всех трех конфигураций характерны одни и те же изменения импульса в зависимости от расположения феррита в поперечном сечении коаксиала. Амплитуда первого колебания близка для случаев, когда феррит граничит с одним из проводников, и значительно меньше в случае расположения феррита в середине зазора. Согласование между НПЛ и коаксиальным фидером с волновым сопротивлением 28 Ом ухудшается по мере того, как феррит приближается к внешнему проводнику, однако это изменение незначительно. При этом в случае, когда между ферритом и проводником имеется зазор, частота значительно выше,

чем в первых двух случаях. Можно предположить, что в данном случае имеет место несколько иной механизм возбуждения колебаний.

3.2. Влияние зазора между ферритом и внутренним проводником на эффективность

В генераторах на основе НПЛ с насыщенным ферритом, работающих в импульсно периодическом режиме, для повышения электрической прочности между ферритом и внутренним проводником оставляется зазор 1–2 мм, заполненный маслом. Результаты, описанные в параграфе 3.1, говорят о том, что по мере удаления феррита от внутреннего проводника мощность высокочастотных колебаний должна падать. Смоделируем как влияет небольшой зазор между ферритом и внутренним проводником на параметры высокочастотного импульса.

В численном эксперименте рассматривались НПЛ геометрии 1, 2 и 3. Для каждой из геометрий проводилось два расчета, в которых размеры феррита оставались неизменными. В первом расчёте уменьшался диаметр внутреннего проводника участка коаксиальной передающей линии, в котором располагается феррит, таким образом, что его волновое сопротивление без учета феррита составляло 32 Ома, при этом передающие линии на входе и выходе НПЛ оставались неизменными с импедансом 28 Ом; во втором расчете изменялся диаметр внутренних проводников всех коаксиалов (НПЛ, фидера и выходного) на одинаковую величину таким образом, что волновое сопротивление коаксиалов составляло 32 Ома.

Три осциллограммы, полученные в моделировании представлены на рисунке 3.2. Для геометрии 2 соответствующий эксперимент представлен в параграфе 3.3. Показаны формы импульсов на выходе НПЛ; а – в исходном варианте, б - диаметр внутреннего проводника изменен с 28 до 25 мм, (появился масляный зазор 1.5 мм), а волновое сопротивление коаксиала без учета феррита

составляет 32 Ома, в – диаметр внутреннего проводника НПЛ, так и всех коаксиалов уменьшены с 28 до 25 мм, весь тракт согласован на 32 Ома если не учитывать ферритовое заполнение в НПЛ.

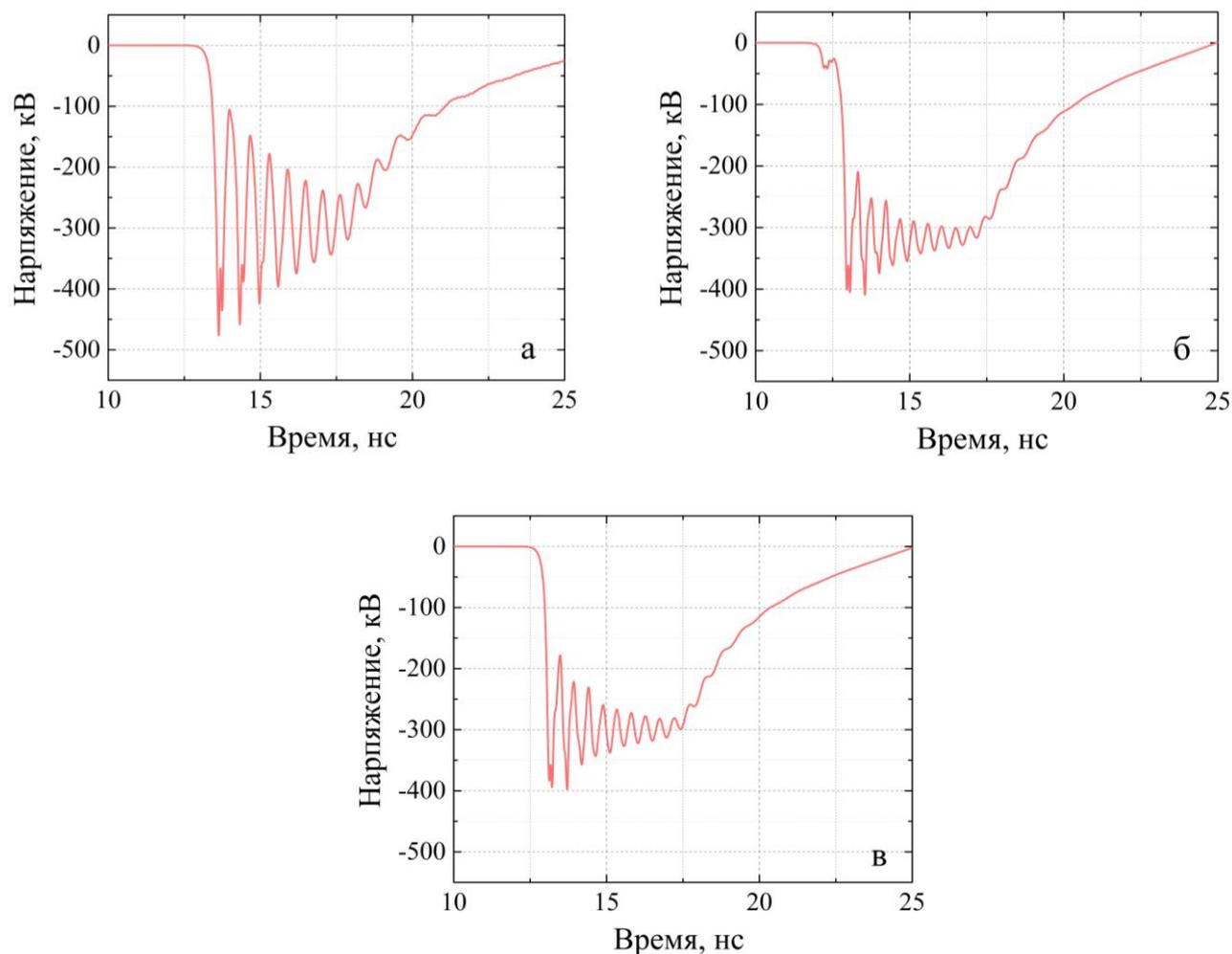


Рисунок 3.2. Формы импульса напряжения на выходе НПЛ (геометрия 2). а – без зазора, б – зазор 1.5 мм между ферритом и внутренним проводником НПЛ, в – зазор между ферритом и внутренним проводником НПЛ и измененные диаметры коаксиалов до и после НПЛ.

Видно значительное падение амплитуды высокочастотных колебаний при добавлении зазора в 1.5 мм между ферритом и внутренним проводником НПЛ. Результаты моделирования представлены в сводной таблице 3.2.

Моделирование показало, что наличие малого масляного зазора между ферритом и внутренним проводником уменьшает эффективность генерации

импульсов СВЧ-излучения. Особенно сильно это проявляется в НПЛ (геометрия 2). В главе 2 было показано, что увеличение волнового сопротивления коаксиальной передающей линии не приводит к уменьшению амплитуды высокочастотных колебаний. Можно сделать вывод, что наличие зазора изменяет распределение электромагнитных полей в линии, что проявляется в уменьшении эффективности преобразования энергии видеоимпульса в радиоимпульс, а также к небольшому увеличению частоты.

Таблица 3.1. Результаты моделирования НПЛ с зазором между ферритом и внутренним проводником передающей линии.

Диаметр внутреннего проводника	U_1 , кВ	U_{ref} , кВ	f , ГГц
Геометрия 1 80x40			
НПЛ 40 мм	186	20	0.97
НПЛ 38 мм	161	42	1.27
Везде 38 мм	158	24	1.23
Геометрия 2 56x28			
НПЛ 28 мм	185	9	1.63
НПЛ 25 мм	98	33	2.17
Везде 25 мм	108	16	2.1
Геометрия 3 40x20			
НПЛ 20 мм	67	10	1.87
НПЛ 18 мм	61	20	2.3
Везде 18 мм	60	12	2.23

3.3. Экспериментальное исследование влияния зазора между ферритом и внутренним проводником на эффективность генерации

Экспериментальная проверка влияния масляного зазора между ферритом и внутренним проводником коаксиала проводилась для НПЛ (геометрия 2). Схема проведения эксперимента соответствовала схеме 2 (Приложение 2).

Напряжение падающего высоковольтного импульса от генератора СИНУС-200 составляло 200–330 кВ. Поле подмагничивания феррита изменялось в интервале 32–72 кА/м. На рисунках 3.3–3.5 представлены осциллограммы, полученные в эксперименте.

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. Такая разница в мощности колебаний наблюдается для широкого диапазона напряжений и не может быть объяснена лишь меньшей величиной азимутальной компоненты напряженности магнитного поля в НПЛ с диаметром внутреннего проводника 25 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.

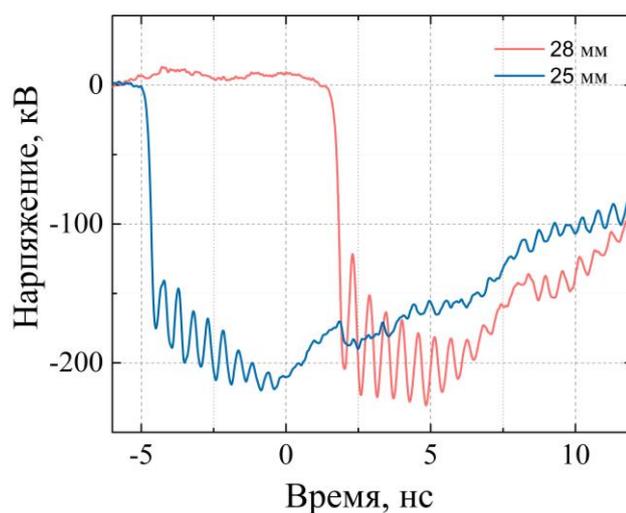


Рисунок 3.3. Осциллограммы напряжения на выходе НПЛ для двух диаметров внутреннего проводника. Амплитуда падающего импульса 240 кВ, поле подмагничивания 47.7 кА/м.

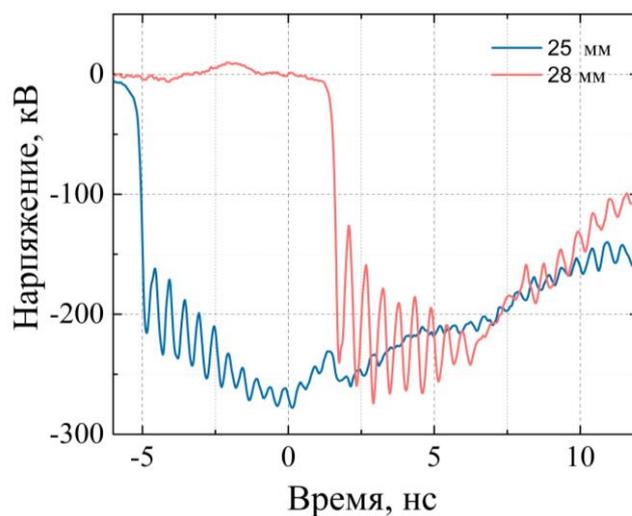


Рисунок 3.4. Осциллограммы напряжения на выходе НПЛ для двух диаметров внутреннего проводника. Амплитуда падающего импульса 270 кВ, поле подмагничивания 47.7 кА/м.

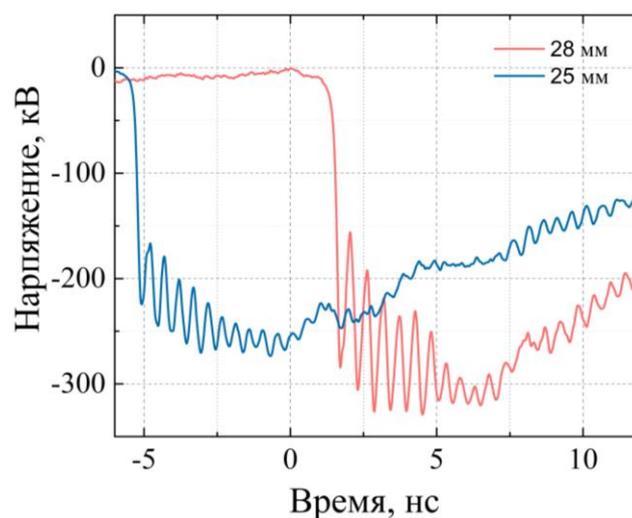


Рисунок 3.5. Осциллограммы напряжения на выходе НПЛ для двух диаметров внутреннего проводника. Амплитуда падающего импульса 300 кВ, поле подмагничивания 55 кА/м.

3.4. Возбуждение высокочастотных колебаний в нелинейной передающей линии импульсами напряжения разной полярности

Из накопленного экспериментального опыта и опыта моделирования известно, что параметры генерируемых в коаксиальной НПЛ СВЧ-импульсов не зависят от

направления внешнего поля подмагничивания H_z . При этом зависимость от азимутального поля H_θ не была исследована. В первую очередь это связано с тем, что использованные генераторы высоковольтных импульсов спроектированы таким образом, что они создают на внутреннем электроде отрицательный потенциал, необходимый для ускорения электронных пучков. Как следствие все эксперименты проводились в большинстве научных групп с отрицательной полярностью импульса напряжения.

В данном параграфе представлены результаты моделирования зависимости характеристик генерируемых импульсов СВЧ-излучения в НПЛ (геометрия 2) от полярности высоковольтного импульса. Выбор этой геометрии обусловлен тем, что именно для этой геометрии НПЛ проводилось экспериментальное исследование.

Осциллограммы импульсов напряжения на выходе НПЛ для разных полярностей импульса напряжения представлены на рисунках 3.6 и 3.7. Для наглядности импульсы сдвинуты по времени.

Видно, что при разных полярностях импульса напряжения формы импульса на выходе НПЛ заметно различаются. Такой эффект наблюдается вне зависимости от расположения феррита между проводниками линии. Осциллограммы получены для величины поля подмагничивания 50 кА/м. В случае положительной полярности падающего импульса частота возбуждаемых колебаний немного выше. Разница в частоте при одинаковой по модулю величине падающего импульса напряжения составляет 200–300 МГц. Фронт импульса на выходе НПЛ при положительной полярности по уровню 0–300 кВ длиннее на 0.15 нс, чем при отрицательной.

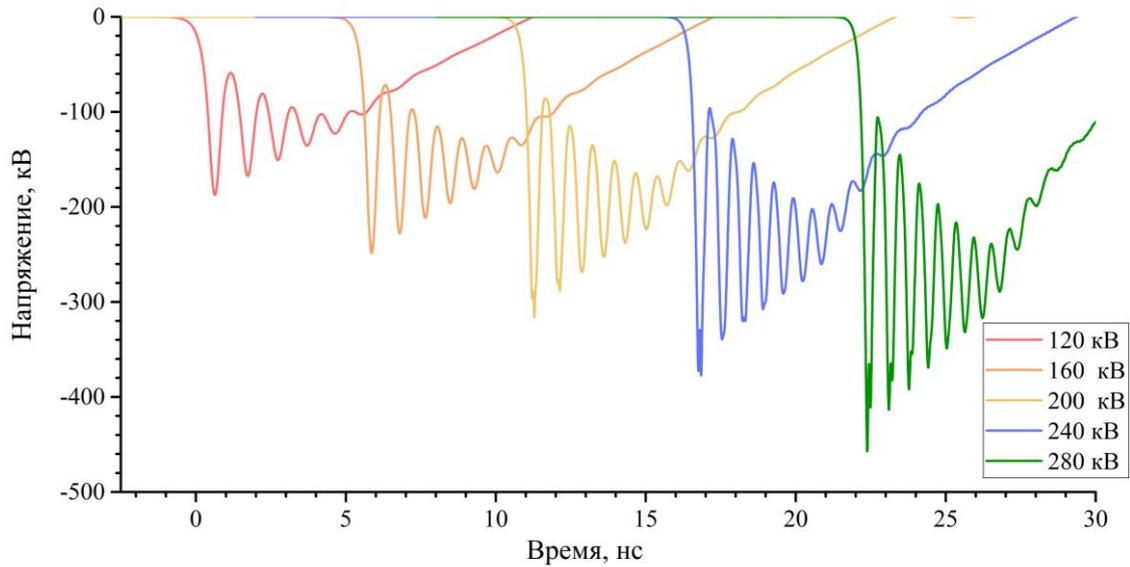


Рисунок 3.6. Осциллограммы напряжения на выходе НПЛ (геометрия 2) при отрицательной полярности падающего импульса напряжения.

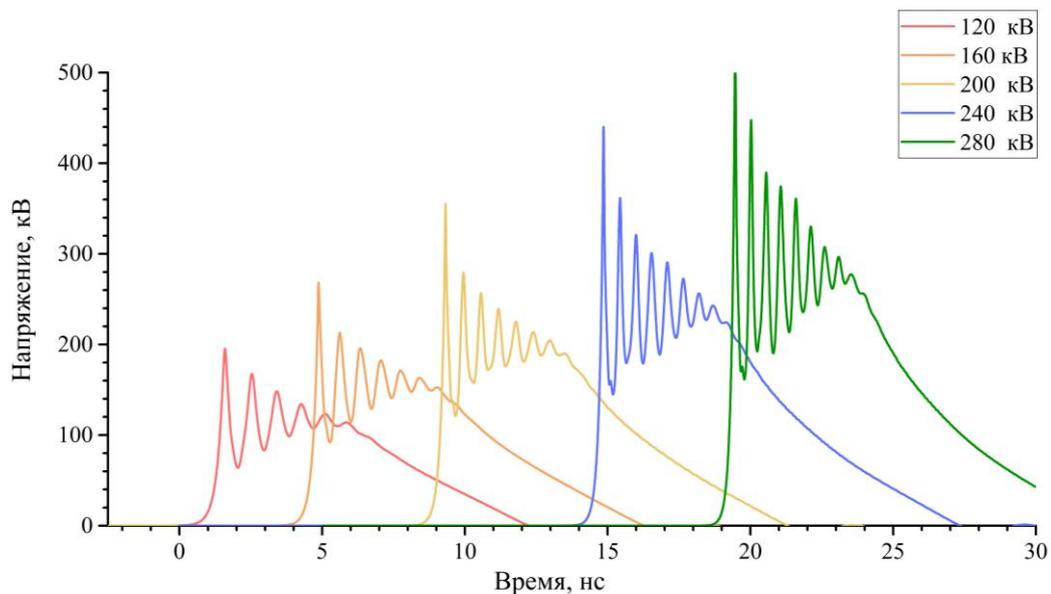


Рисунок 3.7. Осциллограммы напряжения на выходе НПЛ (геометрия 2) при положительной полярности падающего импульса напряжения.

На соответствующих картинах электрического поля внутри феррита наблюдается разница в сдвиге фазы между осцилляциями различных компонент вектора напряженности электрического поля. Иллюстрация этого представлена на рисунках 3.8 и 3.9. Осциллограммы электрического поля соответствуют точке в

феррите на расстоянии 20 см от начала НПЛ на радиусе 1.7 см. Такое расстояние выбрано для наглядности.

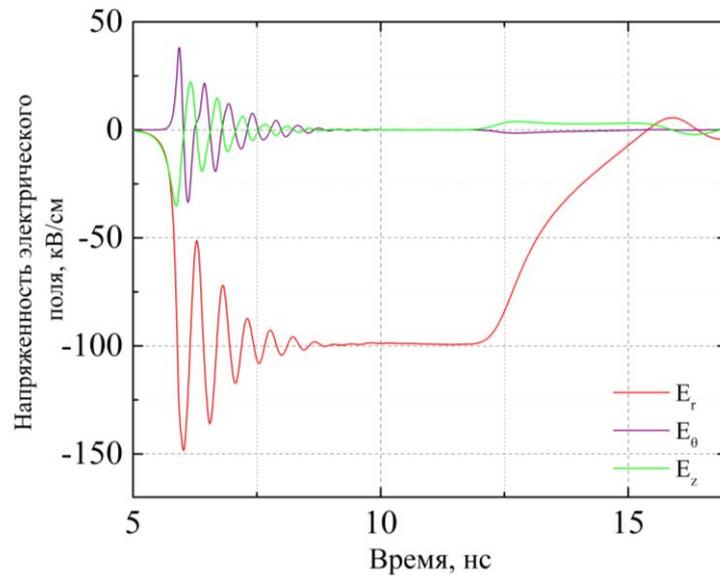


Рисунок 3.8. Осциллограммы компонент напряженности электрического поля внутри феррита при отрицательной полярности импульса.

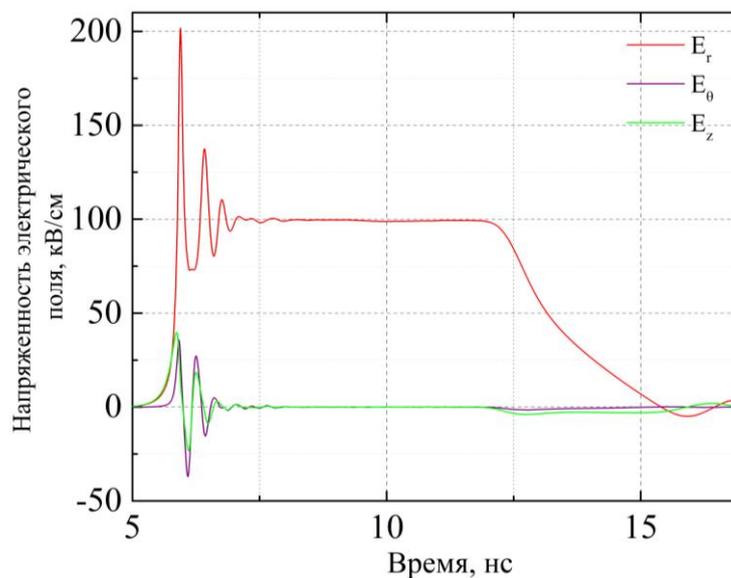


Рисунок 3.9. Осциллограммы компонент напряженности электрического поля внутри феррита при положительной полярности импульса.

Видно, что сдвиг фазы между азимутальной и аксиальной компонентой электрического поля различается при разных полярностях. Поскольку

существенные различия в фазировке компонент электрического поля и форме колебаний радиальной компоненты электрического поля наблюдаются уже на малой длине НПЛ, а также учитывая разницу в длительности фронта импульсов на выходе, можно предположить, что различие в генерируемых импульсах при различных полярностях не связано с дисперсионными свойствами линии передачи и дисперсионным искажением формы импульса. Можно предположить, что направление азимутальной компоненты напряженности магнитного поля влияет на процесс формирования ударного фронта. Для проверки данной гипотезы было проведено численное моделирование формирования фронта УЭМВ в линии (геометрия 2), длина ферритового заполнения которой равна 15 см. При этом на вход НПЛ подавался импульс, длительность фронта которого по уровню 0–1 составляет 2 нс. Результаты моделирования представлены на рисунке 3.10 (для наглядности импульс положительной полярности инвертирован).

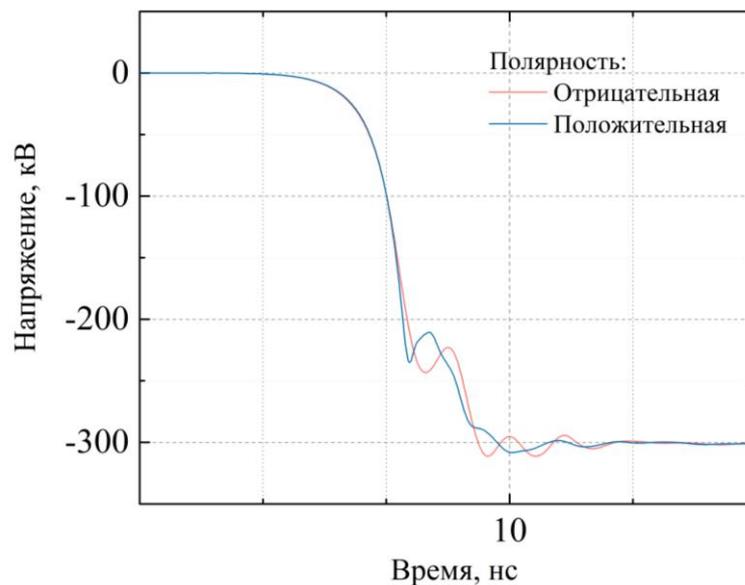


Рисунок 3.10. Форма фронта импульса напряжения на выходе НПЛ длиной 15 см для разных полярностей падающего импульса напряжения.

Видно, что заметные различия имеются уже на стадии формирования квазистационарного фронта. При изменении направления аксиального поля подмагничивания никаких изменений в форме фронта импульса напряжения в

численном эксперименте не наблюдалось. Подробное рассмотрение механизмов формирования ударного фронта и процесса возбуждения высокочастотных колебаний при разных полярностях падающего импульса напряжения в рамках диссертационной работы не проводилось.

Можно сделать промежуточный вывод о том, что изменение направления той компоненты напряженности магнитного поля, которая возбуждает прецессию в феррите, приводит к изменению условий формирования ударного фронта в линии передачи.

Зависимость процесса формирования фронта от направления азимутальной компоненты напряженности магнитного поля можно показать из следующей упрощенной аналитической модели. Рассмотрим уравнение Ландау-Лифшица без учета затухания:

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\gamma[\mathbf{M} \times \mathbf{H}]. \quad (3.1)$$

Будем рассматривать процесс, происходящий непосредственно на фронте падающего импульса напряжения, в том интервале времени, когда прецессия вектора намагниченности еще не началась. Поскольку феррит насыщен в аксиальном поле, то в этом случае компоненты вектора намагниченности равны: $M_r = 0$, $M_\theta = 0$, $M_z = M_s$, где M_s – величина намагниченности насыщения феррита. Внешнее аксиальное магнитное поле насыщающей феррит равно H_z . Азимутальное магнитное поле соответствует полю бегущей волны импульса тока и равно $H_\theta(z, t)$. Радиальное магнитное поле отсутствует. Для такой постановки задачи уравнение (3.1) запишется по компонентам в цилиндрической системе координат следующим образом:

$$\begin{aligned}
\frac{dM_r}{dt} &= -\gamma(M_\theta H_z - M_z H_\theta) \\
\frac{dM_\theta}{dt} &= \gamma M_r H_z \\
\frac{dM_z}{dt} &= -\gamma M_r H_\theta
\end{aligned} \quad . \quad (3.2)$$

Изменяющийся во времени вектор намагниченности феррита возбуждает в феррите вихревой ток:

$$\mathbf{j} = \text{rot} \mathbf{M}. \quad (3.3)$$

Компоненты вектора плотности вихревого тока имеют вид:

$$\begin{aligned}
j_r &= \frac{\partial M_z}{\partial \theta} - \frac{\partial M_\theta}{\partial z} \\
j_\theta &= \frac{\partial M_r}{\partial z} - \frac{\partial M_z}{\partial r} \\
j_z &= \frac{\partial M_\theta}{\partial r} - \frac{\partial M_r}{\partial \theta}
\end{aligned} \quad (3.4)$$

Для определения величин последних в (3.4) необходимо подставить значения компонент вектора намагниченности. Они, в свою очередь, представляют собой интеграл по времени от правой части соответствующей компоненты из (3.2). С учетом этого получим:

$$\begin{aligned}
j_r &= -\gamma \left(\frac{\partial}{\partial \theta} \int M_r H_\theta dt + \frac{\partial}{\partial z} \int M_r H_z dt \right) \\
j_\theta &= -\gamma \left(\frac{\partial}{\partial z} \int (M_\theta H_z - M_z H_\theta) dt - \frac{\partial}{\partial r} \int M_r H_\theta dt \right) \\
j_z &= \gamma \left(\frac{\partial}{\partial r} \int \gamma M_r H_z dt + \frac{\partial}{\partial \theta} \int (M_\theta H_z - M_z H_\theta) dt \right)
\end{aligned} \quad (3.5)$$

С учетом всех компонент вектора напряженности магнитного поля и вектора намагниченности выражения для компонент плотности вихревого тока запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned}
 j_r &= 0 \\
 j_\theta &= \gamma M_s \int \frac{\partial H_\theta}{\partial z} dt. \\
 j_z &= 0
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

Таким образом, плотность вихревого тока в начальные моменты времени до возбуждения прецессии вектора намагниченности имеет только азимутальную компоненту, зависящую от $\frac{\partial H_\theta}{\partial z}$. Направление этого тока, стоящего в правой части второго уравнения Максвелла определяет какие поля будут возбуждаться в линии передачи.

3.5. Эксперименты по возбуждению колебаний в нелинейной передающей линии импульсами напряжения разной полярности

Для проведения экспериментов по возбуждению колебаний в НПЛ высоковольтными импульсами разной полярности схема зарядки емкостного накопителя первичного контура генератора СИНУС-200 была изменена, таким образом, чтобы получить на его выходе импульс напряжения положительной полярности. Стабильность работы генератора при этом не изменилась. Эксперимент проводился для НПЛ (геометрия 2), длина линии составляла 80 см. Схема проведения эксперимента соответствовала схеме проведения эксперимента №1 (приложение 2). В качестве референсного сигнала использовался сигнал на выходе обостряющей секции при. Длительность фронта импульса напряжения после секции обострения составляла 900 пс по уровню 0.1–0.9. Осциллограммы, полученные в эксперименте, представлены на рисунках 3.11 и 3.12; импульсы сдвинуты во времени для наглядности.

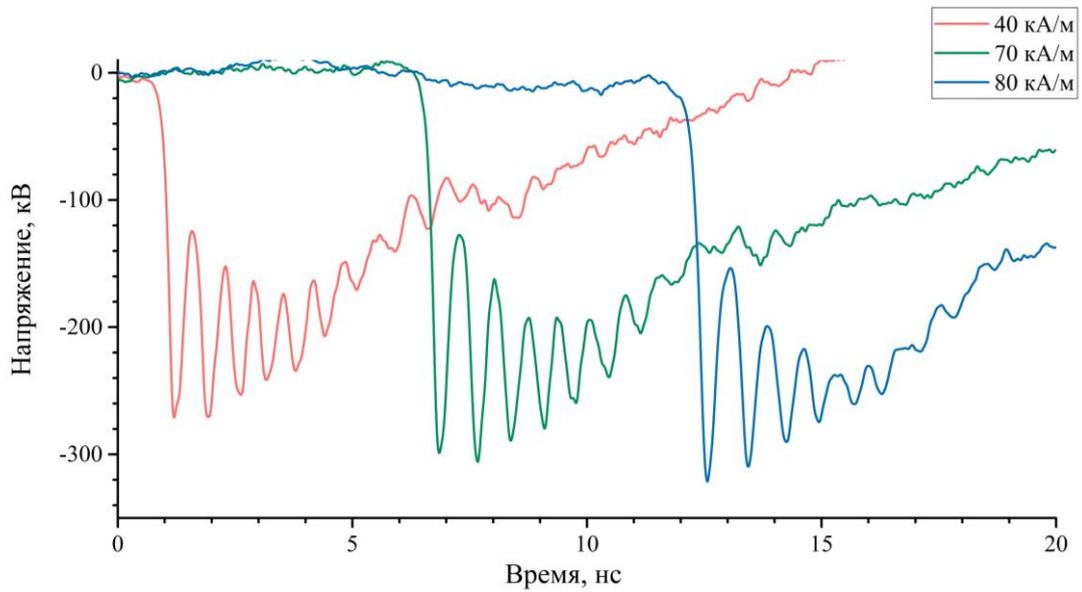


Рисунок 3.11. Осциллограммы импульсов напряжения на выходе НПЛ при отрицательной полярности падающего импульса амплитудой 240 кВ при разных величинах поля подмагничивания.

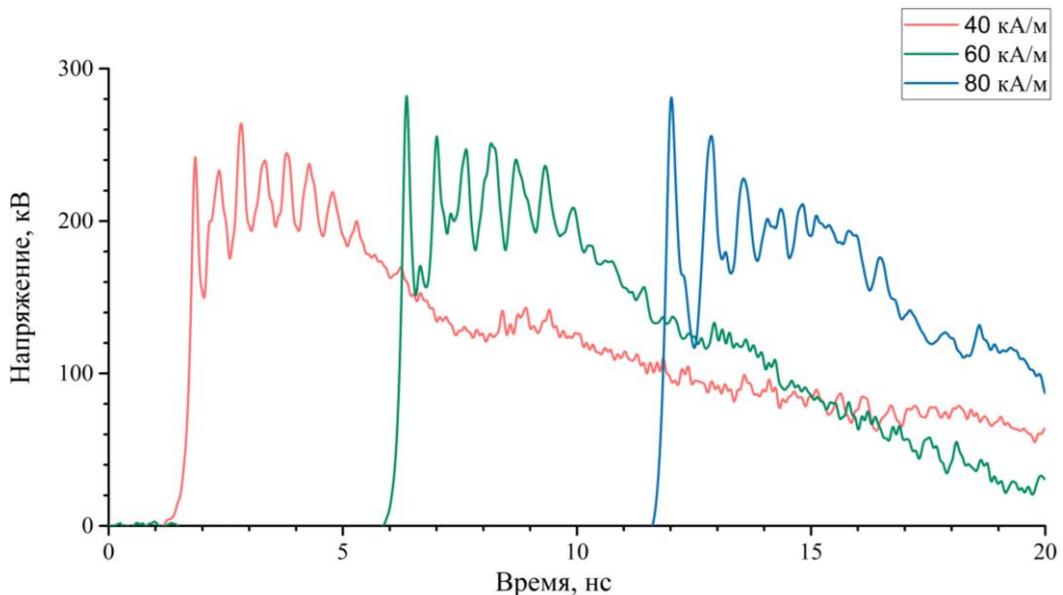


Рисунок 3.12. Осциллограммы импульсов напряжения на выходе НПЛ при положительной полярности падающего импульса амплитудой 240 кВ при разных величинах поля подмагничивания.

Результаты эксперимента, как и результаты моделирования, показали существенное различие в формах импульсов на выходе НПЛ при разной полярности импульса напряжения. Заметим, что импульсы, полученные в

эксперименте в случае положительно полярности падающего импульса напряжения, заметно отличаются от импульсов, полученных в моделировании. При этом частоты колебаний заметно выше при положительной полярности, чем при отрицательной, в широком диапазоне напряжений и аксиальных полей подмагничивания. Зависимости центральной частоты высокочастотных импульсов от поля подмагничивания представлены на рисунке 3.13. Следует также отметить, что при положительном напряжении на выходе НПЛ пиковая мощность, а также эффективность преобразования энергии видеоимпульса в СВЧ-импульс, заметно ниже, чем при отрицательном импульсе напряжения.

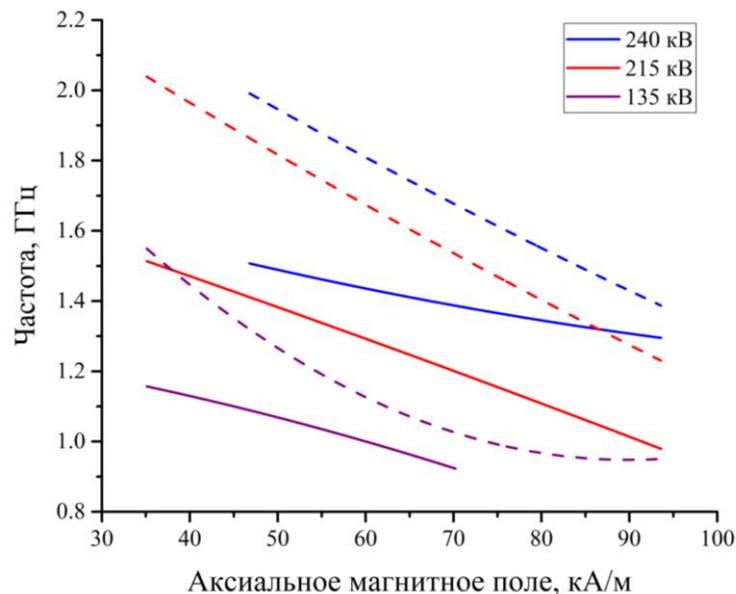


Рисунок 3.13. Зависимость центральной частоты высокочастотного импульса от напряженности аксиального магнитного поля при разных полярностях импульса напряжения. Сплошная линия – отрицательная полярность, штрихованная линия – положительная полярность.

3.6. Выводы к главе 3

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 симметрично между проводниками линии передачи эффективность генерации заметно ниже, а частота – заметно выше, чем если феррит смещен вплотную к внешнему или внутреннему проводнику.

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.

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. 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 и, следовательно, на формирование фронта ударной волны.

Глава 4

Модель возбуждения высокочастотных колебаний импульсом напряжения с субнаносекундным фронтом в коаксиальной передающей линии с двухслойным заполнением диэлектриком

4.1. Распространение импульса напряжения с субнаносекундным фронтом в коаксиальной передающей линии с двухслойным заполнением диэлектриком

Нелинейная коаксиальная передающая линия с однородным заполнением ферритом на внутреннем проводнике, если не учитывать ее нелинейные магнитные свойства, с точки зрения электродинамики представляет собой коаксиал с двухслойным заполнением диэлектриком, при этом значение диэлектрической проницаемости внутреннего слоя значительно выше, чем внешнего. Напомним, что для линий, рассмотренных в рамках данной работы, внутренний слой диэлектрика, соответствующий ферриту, имеет диэлектрическую проницаемость равную 13, а внешний слой диэлектрика, представляющий собой вакуумное масло обладает, диэлектрической проницаемостью 2.2.

Рассмотрим задачу распространения наносекундного импульса напряжения с субнаносекундным фронтом в коаксиале с двухслойным диэлектрическим заполнением. В качестве размеров такого коаксиала выберем размеры НПЛ (геометрия 1). Задачу будем рассматривать в численном эксперименте с использованием программного пакета трехмерного электромагнитного моделирования CST Studio [85]. Иллюстрация рассматриваемой задачи представлена на рисунке 4.1.

На вход линии длиной 800 мм подавался трапецеидальный импульс напряжения с передним фронтом 0.2 нс и задним фронтом 2 нс по уровню 0–1. Осциллограмма напряжения на выходе передающей линии представлена на рисунке 4.2.

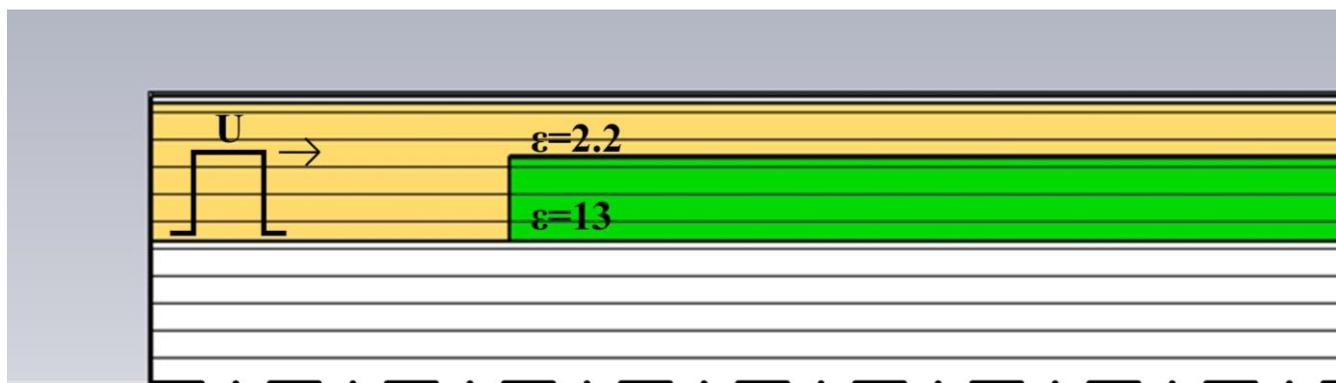


Рисунок 4.1. Иллюстрация задачи моделирования распространения импульса напряжения с субнаносекундным фронтом в коаксиальной линии передачи с двухслойным заполнением диэлектриком.

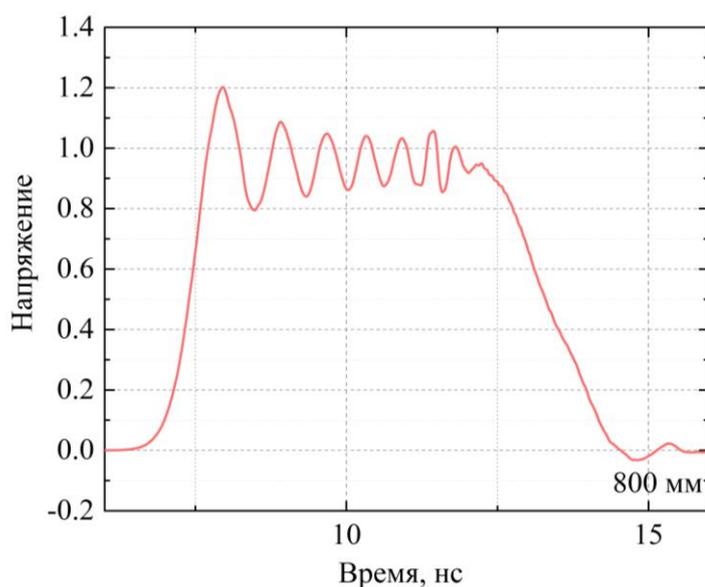


Рисунок 4.2. Осциллограмма безразмерного напряжения (в относительных единицах) на выходе двухслойной передающей линии с размерами, соответствующими НПЛ (геометрия 1).

Результаты моделирования показывают, после прохождения импульса напряжения по линии передачи его форма значительно изменилась. Фронт импульса составляет 1.43 нс по уровню 0–1, а за ним наблюдаются высокочастотные колебания. Спектр импульса на выходе линии передачи практически не изменился по сравнению с падающим, поэтому говорить о

центральной частоте колебаний для импульса рисунок 4.2 не совсем корректно, поскольку в данном случае перераспределение спектральной плотности энергии не произошло.

Рассмотрим как изменяется фронт импульса напряжения по мере того, как он распространялся по линии передачи. Динамика фронта импульса напряжения, измеренного по уровню 0–1, представлена в таблице 4.1. В таблице введены обозначения: l – расстояние, пройденное импульсом в линии передачи, τ_ϕ – длительность фронта, $\Delta\tau_\phi/l$ – скорость изменения длительности фронта с длиной пробега.

Таблица 4.1. Изменение длительности фронта импульса напряжения по мере его распространения в двухслойной линии передачи.

$l, \text{ мм}$	100	200	300	400	500	800
$\tau_\phi, \text{ нс}$	0.67	0.82	0.98	1.09	1.2	1.43
$\Delta\tau_\phi/l, \text{ нс/мм}$	4.7	1.5	1.6	1.1	1.1	0.77

Осциллограммы импульса в различных поперечных сечениях линии представлены на рисунке 4.3. Видно, что по мере распространения импульса по линии передачи его длительность постепенно нарастает. Как уже отмечалось выше, поскольку спектр импульса на выходе не имеет центральной частоты, то удобнее говорить о временных интервалах между локальными максимумами, которые будем называть периодами колебаний. При этом следует заметить, что по форме один такой период колебаний не соответствует форме монохроматического колебания. Форма колебаний на вершине импульса напряжения более соответствует колебаниям с медленно нарастающей частотой.

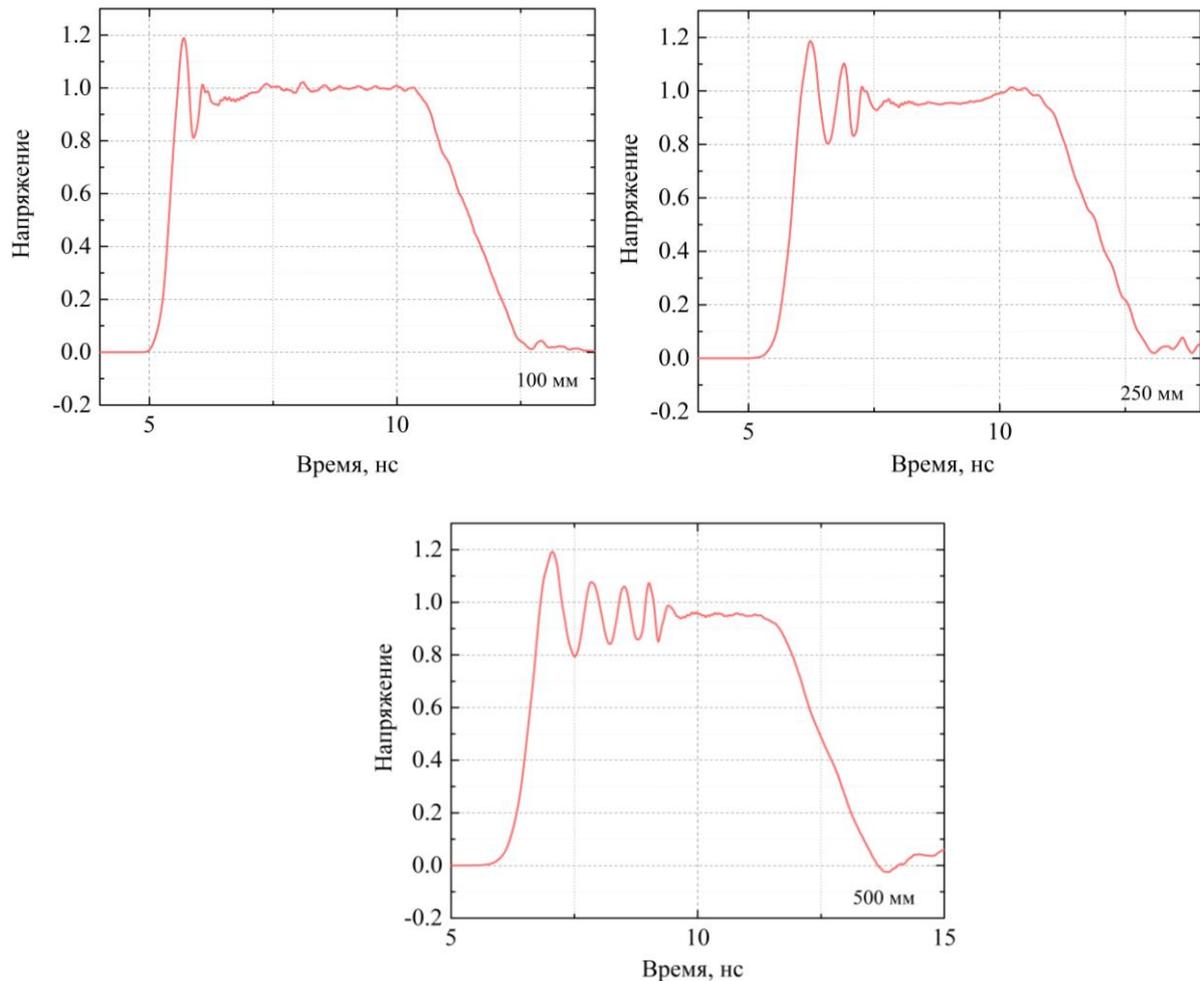


Рисунок 4.3. Осциллограммы безразмерного импульса напряжения в различных поперечных сечениях двухслойной линии передачи ($l = 100, 250, 500$ мм).

Периоды колебаний в различных поперечных сечениях двухслойной линии передачи соответствующей размерам НПЛ (геометрии 1) составляют:

$$l = 100 \text{ мм}$$

$$T_1 = 0.32 \text{ нс.}$$

$$l = 250 \text{ мм}$$

$$T_1 = 0.68 \text{ нс, } T_2 = 0.4 \text{ нс.}$$

$$l = 500 \text{ мм}$$

$$T_1 = 0.8 \text{ нс, } T_2 = 0.65 \text{ нс, } T_3 = 0.5 \text{ нс, } T_4 = 0.44 \text{ нс.}$$

$$l = 800 \text{ мм}$$

$$T_1 = 0.95 \text{ нс}, T_2 = 0.76 \text{ нс}, T_3 = 0.65 \text{ нс}, T_4 = 0.6 \text{ нс}.$$

Относительная величина максимума импульса напряжения, соответствующая первому колебанию, составляет 1.2.

Формирование импульса напряжения с затухающими высокочастотными колебаниями за его фронтом при прохождении двухслойной линии передачи длиной до 1 м наблюдается для импульсов, длительность фронта которых меньше 0.6 нс. При этом чем короче фронт, тем больше амплитуда первого колебания и число колебаний.

Данный эффект наблюдается для всех поперечных размеров коаксиальных линий передачи соответствующих геометриям НПЛ со сплошным заполнением ферритом, рассматриваемых в работе (Геометрии 0–6). Осциллограммы на выходе линий передачи, соответствующих НПЛ геометрия 2 и геометрия 5 длиной 800 мм, полученные в моделировании с использованием CST Studio представлены на рисунках 4.4 и 4.5.

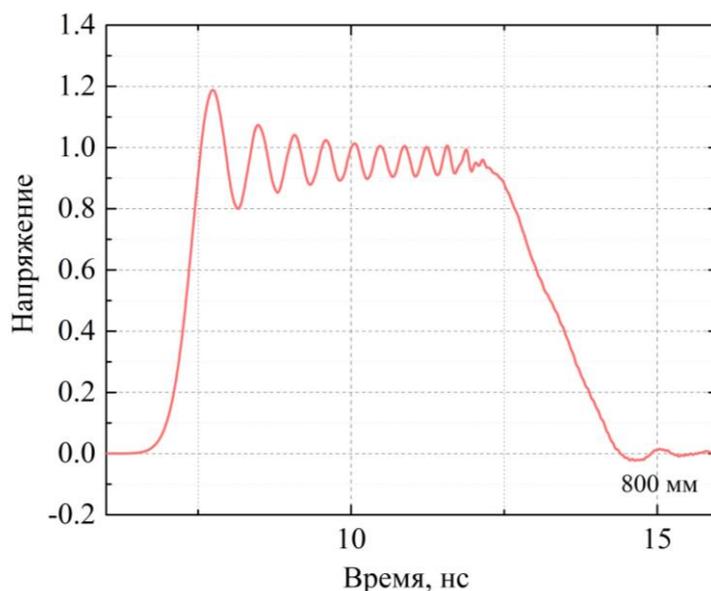


Рисунок 4.4. Безразмерный импульс напряжения на выходе двухслойной коаксиальной линии передачи с поперечными размерами, соответствующими НПЛ (геометрия 2).

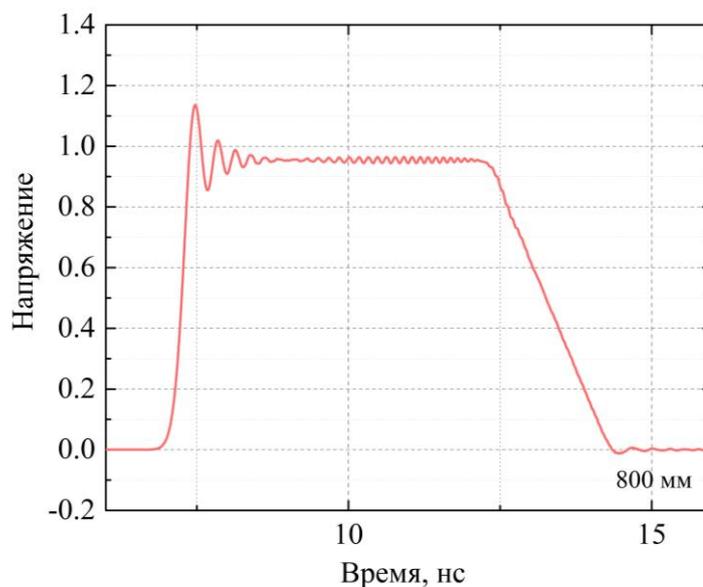


Рисунок 4.5. Безразмерный импульс напряжения на выходе двухслойной коаксиальной линии передачи с поперечными размерами, соответствующими НПЛ (геометрия 5).

Осциллограмма на выходе передающей линии, соответствующей геометрии 2 схожа с осциллограммой для линии (геометрия 1), при этом характерная частота колебаний немного выше. Осциллограмма для двухслойного коаксиала геометрии 5, поперечные размеры которого меньше, имеет особенности. За фронтом импульса напряжения, также как и в предыдущих случаях, сформировались затухающие высокочастотные колебания напряжения. После того как первая часть высокочастотных колебаний закончилась, наблюдается еще один протяженный цуг колебаний малой амплитуды.

В рамках работы были проведены расчеты трансформации импульса напряжения с субнаносекундным фронтом с использованием численного моделирования для всех геометрий НПЛ ферритовым заполнением без магнитных свойств, рассмотренных в главе 2. Ниже приведены величины периодов сформировавшихся колебаний за фронтом импульса напряжения для геометрий НПЛ 0, 2–6, а также значения максимума безразмерного импульса напряжения, соответствующая первому колебанию (U_{max}):

Геометрия 0

$$T_1 = 1.17 \text{ нс}, T_2 = 0.94 \text{ нс}, T_3 = 0.86 \text{ нс}, T_4 = 0.52 \text{ нс}; U_{max}=1.21.$$

Геометрия 2

$$T_1 = 0.74 \text{ нс}, T_2 = 0.59 \text{ нс}, T_3 = 0.51 \text{ нс}, T_4 = 0.47 \text{ нс}, T_5=0.42 \text{ нс}; U_{max}=1.188.$$

Геометрия 3

$$T_1 = 0.6 \text{ нс}, T_2 = 0.45 \text{ нс}, T_3 = 0.4 \text{ нс}, T_4 = 0.38 \text{ нс}, T_5=0.34 \text{ нс}; U_{max}=1.176.$$

Геометрия 4

$$T_1 = 0.48 \text{ нс}, T_2 = 0.38 \text{ нс}, T_3 = 0.32 \text{ нс}, T_4 = 0.31 \text{ нс}, T_5=0.26 \text{ нс}; U_{max}=1.15.$$

Геометрия 5

$$T_1 = 0.39 \text{ нс}, T_2 = 0.3 \text{ нс}, T_3 = 0.25 \text{ нс}, T_4 = 0.23 \text{ нс}; U_{max}=1.13.$$

Геометрия 6

$$T_1 = 0.3 \text{ нс}; U_{max}=1.1.$$

Таким образом, в коаксиальных передающих линиях с двухслойным заполнением диэлектриком с сильно различающимися величинами диэлектрической проницаемости различных поперечных размеров наблюдается формирование затухающего импульса высокочастотных колебаний при подаче на их вход импульса напряжения с субнаносекундным фронтом. При этом фронт импульса напряжения увеличивается в длительности. Частота возбуждаемых за фронтом колебаний растет с уменьшением поперечных размеров, при этом также уменьшается количество колебаний и их амплитуда.

4.2. Дисперсионные свойства волны E_{00} линии передачи поверхностной волны

В прикладной электродинамике линией передачи поверхностной волны (ЛПВ) называется проводящий стержень, покрытый слоем диэлектрика, диэлектрическая проницаемость которого выше, чем у окружающего его диэлектрика, которым, как правило, является воздух [86]. Также ЛПВ может представлять собой коаксиальную передающую линию, поверхность внутреннего проводника которой покрыта диэлектриком. Поскольку линия передачи имеет два слоя диэлектрика, то, если рассматривать распространение волн в ЛПВ в концепции парциальных волн, эти волны по очереди проходят границу раздела двух сред. Вследствие этого скорость волны в среде с более высокой диэлектрической проницаемостью меньше, чем в другой среде. Из-за этого волна, распространяющаяся в ЛПВ, называется замедленной. Основная часть энергии замедленной волны распространяется вблизи границы раздела диэлектрических сред параллельно ей. Поэтому замедленная волна получила название поверхностной волны.

Для ЛПВ основной модой является волна E_{00} (TM_{00}), поле которой обладает осевой симметрией. Структура поля волны E_{00} отличается от структуры волны ТЕМ коаксиальной передающей линии только наличием второй компоненты напряженности электрического поля E_z , что обусловлено граничными условиями на границе раздела двух диэлектриков. Таким образом, волна E_{00} имеет три компоненты полей: E_z , E_r и H_θ . Волна типа E_{00} не имеет ограничения по частоте снизу. В литературе волна E_{00} иногда называется квази-ТЕМ волной.

Поле внутри диэлектрика с более высокой оптической плотностью имеет две компоненты электрического поля. Внутри диэлектрика с меньшей оптической плотностью поле соответствует полю коаксиальной ТЕМ-волны. Осциллограммы полей внутри диэлектриков, полученные в моделировании для двухслойного коаксиала с размерами НПЛ (геометрия 1) представлены на рисунках 4.6 и 4.7.

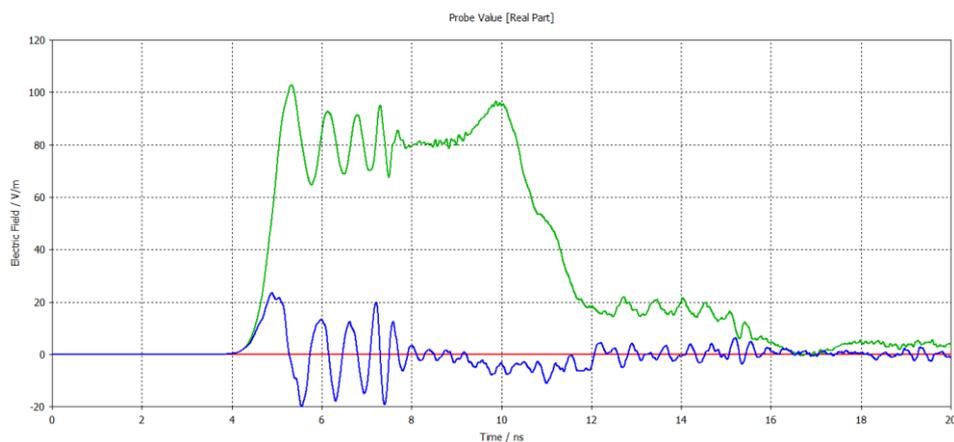


Рисунок 4.6. Осциллограммы компонент напряженности электрического поля в двухслойной линии передачи (геометрия 1) внутри диэлектрика с $\epsilon = 13$. Зеленая линия - E_r , синяя линия E_z , красная линия - E_θ .

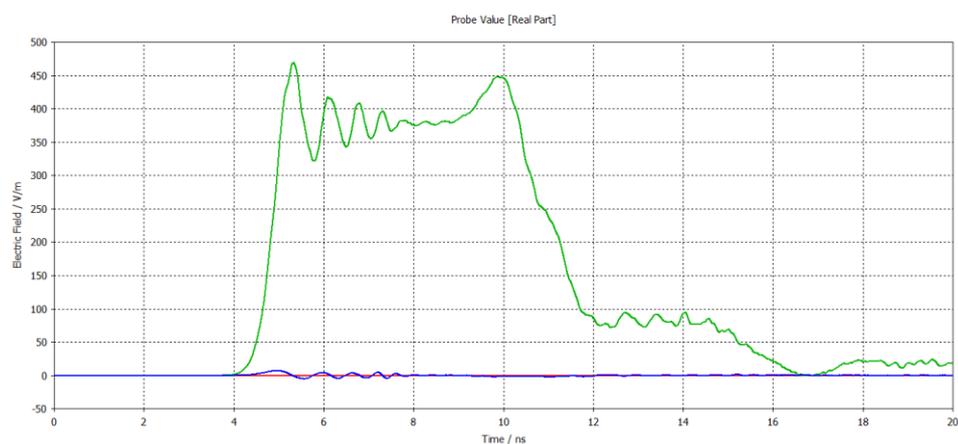


Рисунок 4.7. Осциллограммы компонент напряженности электрического поля в двухслойной линии передачи (геометрия 1) внутри диэлектрика с $\epsilon = 2.2$. Зеленая линия - E_r , синяя линия E_z , красная линия - E_θ .

В отличие от волны ТЕМ, волна E_{00} обладает частотной дисперсией. Построим дисперсионные характеристики волны E_{00} в двухслойном коаксиале. Дисперсионные характеристики для всех типов волн ЛПВ получаются из условия непрерывности тангенциальных компонент векторов напряженности электрического и магнитного полей на границе раздела двух диэлектриков [87]. В рамках данной работы вывод этих дисперсионных зависимостей приводится не будет.

Дисперсионное уравнение для волны E_{00} двухслойного коаксиала имеет вид:

$$\varepsilon_1 \frac{Q(x, c/a)}{x^2} - \varepsilon_2 \frac{Q(y, b/a)}{y^2} = 0. \quad (4.1)$$

Здесь c – радиус внутреннего проводника, a – радиус внутреннего диэлектрика, b – радиус внешнего проводника, ε_1 – диэлектрическая проницаемость внутреннего диэлектрика, ε_2 – диэлектрическая проницаемость внешнего диэлектрика;

$$x = (2\pi a / \lambda) \sqrt{\varepsilon_1 - \beta^2},$$

$$y = (2\pi a / \lambda) \sqrt{\varepsilon_2 - \beta^2}, \quad (4.2)$$

$$\beta = \beta / (2\pi / \lambda),$$

λ – длина волны, β – постоянная распространения;

$$Q(p, q) = p \frac{J_0'(p)N_0(pq) - N_0'(p)J_0(pq)}{J_0(p)N_0(pq) - N_0(p)J_0(pq)}; \quad (4.3)$$

$$p = x, \quad q = \frac{c}{a} \leq 1 \text{ для } Q(x, \frac{c}{a}),$$

$$p = y, \quad q = \frac{b}{a} \geq 1 \text{ для } Q(y, \frac{b}{a}).$$

Дисперсионные зависимости, рассчитанные из уравнения (4.1), для волны E_{00} в коаксиалах для геометрий 1 – 4 представлены на рисунке 4.8. Эти двухслойные линии передачи обладают близкими, но не равными значениями эффективной диэлектрической проницаемости, и скорость ТЕМ волны в них слегка различается: $v_1 = 1.305 \cdot 10^8$ м/с, $v_2 = 1.33 \cdot 10^8$ м/с, $v_3 = 1.34 \cdot 10^8$ м/с, $v_4 = 1.29 \cdot 10^8$ м/с. Штрихованная линия соответствует ТЕМ волне в линии геометрия 3.

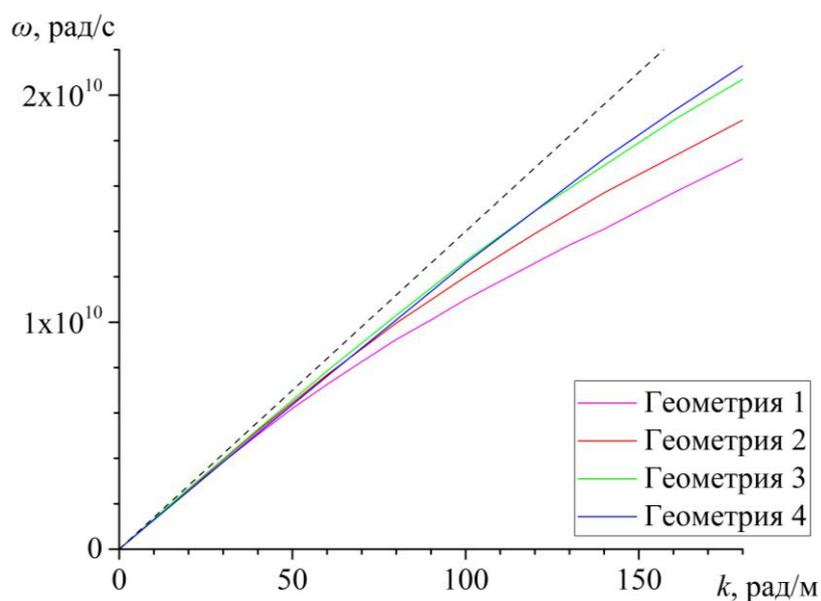


Рисунок 4.8. Дисперсионные зависимости волны E_{00} для двухслойных коаксиалов разных поперечных размеров.

Наличие значительного замедления волн на частотах в единицы гигагерц указывает на то, что возбуждение высокочастотных колебаний за фронтом импульса напряжения, который изначально имел субнаносекундный фронт, описанное в предыдущем параграфе, представляет собой дисперсионный разбег гармоник фронта волны E_{00} . Этот эффект встречается и изучается в задачах фемтосекундной лазерной техники и в различных областях электродинамики [88 – 90], и также называется дисперсионным расплыванием коротких импульсов. Дисперсионные свойства волны E_{00} находят применение в диэлектрических черенковских мазерах коаксиальной конфигурации [91].

Поскольку в низкочастотном пределе волны ТЕМ и E_{00} обладают одинаковой скоростью, то эффект расплывания фронта в рассматриваемых линиях начинает проявляться при длительности фронта импульса менее 1 нс (что соответствует гигагерцовым частотам). Увеличение частоты колебаний формируемых в двухслойном коаксиале с уменьшением их поперечных размеров становится понятным при анализе дисперсионных кривых, представленных на рисунке 4.7. В линии с большими поперечными размерами высокочастотные волны замедлены сильнее. Это приводит к тому, что энергия на частоте выше

3 ГГц сильно замедляется относительно импульса постоянного напряжения и в конечном счете расплывается за счет дисперсии. Те же высокочастотные компоненты фронта, которые не так сильно отстают от импульса постоянного напряжения, формируют за ним последовательность высокочастотных колебаний с увеличивающейся частотой. В коаксиалах меньших поперечных размеров эффект расплывания выражен не так сильно в диапазоне частот в единицы гигагерц и, соответственно, для фронтов в сотни пикосекунд за счет слабого замедления волн на этих частотах. Так, на рисунке 4.5 видно, что за фронтом импульса напряжения формируется цуг колебаний малой амплитуды, который не успевает сильно отстать от импульса постоянного напряжения. При этом за фронтом наблюдается несколько колебаний малой амплитуды.

4.3. Модель возбуждения мощных высокочастотных колебаний в коаксиальной передающей линии с насыщенным ферритом при распространении в ней импульса напряжения с субнаносекундным фронтом

Как было показано в предыдущем параграфе, коаксиал с двухслойным диэлектрическим заполнением обладает выраженными дисперсионными свойствами. Эти свойства приводят к тому, что при подаче на вход линии импульса напряжения с субнаносекундным фронтом происходит его расплывание, и за ним наблюдаются высокочастотные колебания. Расплывание приводит к увеличению длительности фронта и уменьшению частоты колебаний по мере распространения импульса по линии.

Если же внутренний диэлектрик представляет собой насыщенный феррит, то он в первую очередь обостряет фронт распространяющегося в линии импульса напряжения, что, как отмечалось ранее, приводит к формированию УЭМВ. Таким образом, в линии одновременно существует два конкурирующих процесса: первый – обострение фронта импульса напряжения, второй – его расплывание за счет дисперсии волны E_{00} . Происходит перекачка энергии из низкочастотной

составляющей импульса в высокочастотную, сконцентрированную на фронте. Затем эта высокочастотная энергия начинает оттекать от фронта, формируя за ним затухающий цуг колебаний. В результате эти два процесса уравнивают друг друга, и форма импульса напряжения на выходе линии при увеличении ее длины будет стремиться к стационарной. Это было продемонстрировано в параграфе 2.9. В НПЛ (геометрия 2) квазистационарная форма импульса наблюдалась в линии длиной свыше 100 см и практически не изменялась до длины 200 см.

Результаты моделирования, представленные в главе 2, указывают на то, что в случае конфигурации НПЛ, когда феррит граничит с внутренним проводником линии, в ней наблюдается максимальная эффективность генерации и основным дисперсионным механизмом, определяющим эффективное возбуждение колебаний, является дисперсия волны E_{00} ЛПВ. Это проявляется в зависимости частоты возбуждаемых колебаний от поперечных размеров линии, в отсутствие (или малой эффективности) колебаний в случае малой диэлектрической проницаемости феррита, а также в зависимости эффективности от коэффициента поперечного заполнения линии ферритом.

В случае, когда феррит находится в середине зазора линии, возбуждение колебаний, по-видимому, обусловлено дисперсионными свойствами, связанными с прецессией вектора намагниченности феррита. Дисперсионные свойства ЛПВ не вносят существенный вклад. Дисперсионное уравнение для ТЕМ волны, в котором учтены магнитные свойства НПЛ в виде уравнения Ландау-Лифшица без затухания, было ранее получено в работе [84]. Оно имеет вид:

$$k = \frac{\omega}{v_0} \sqrt{\frac{\omega_2^2 - \omega^2}{\omega_1^2 - \omega^2}}, \quad (4.4)$$

где v_0 – скорость ТЕМ волны в линии,

$$\omega_1 = \mu_0 \gamma \sqrt{H_\Sigma^2 + \frac{\chi H_\theta^2 M_s}{\mu_0 H_\Sigma}},$$

$$\omega_2 = \mu_0 \gamma \sqrt{H_\Sigma^2 + \frac{\chi H_\theta^2 M_s}{\mu_0 H_\Sigma} + \frac{\lambda H_z^2 M_s}{\mu_0 H_\Sigma}}.$$

Компоненты напряженности магнитного поля усреднены по поперечному сечению феррита.

На рисунке 4.8 представлены дисперсионные зависимости для волны E_{00} коаксиала (геометрия 1) и дисперсионная зависимость для НПЛ (геометрия 1) построенная по соотношению (4.4), $H_\theta = 66$ кА/м, $H_z = 40$ кА/м, $M_s = 0.314$ Тл, $v_0 = 1.31 \cdot 10^8$ м/с.

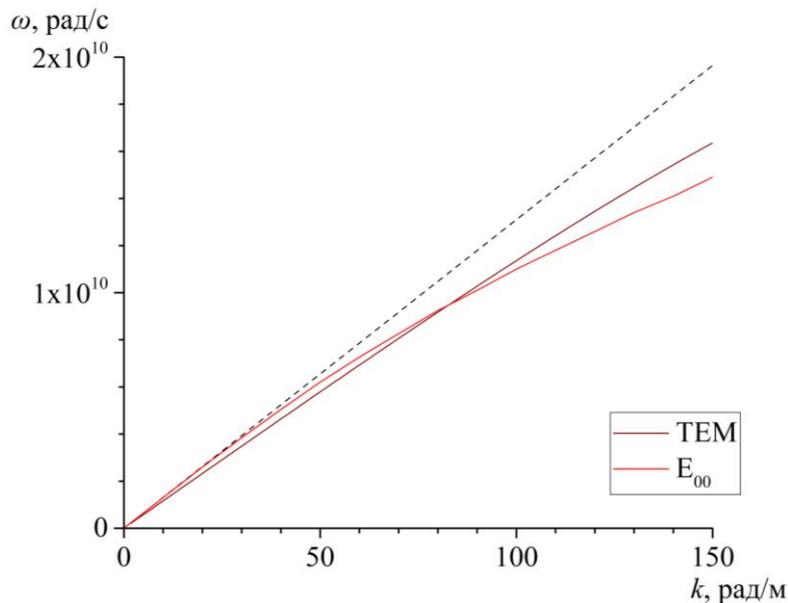


Рисунок 4.8. Дисперсионные кривые для волн E_{00} и ТЕМ волны с учетом магнитных свойств НПЛ геометрия 1. Пунктирная линия соответствует скорости

$$v_0 = 1.31 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

Видно, что в рабочем диапазоне частот НПЛ волна E_{00} замедлена сильнее, чем волна ТЕМ. Поэтому в конфигурациях НПЛ, где феррит граничит с одним из проводников линии, именно волна E_{00} определяет частоту возбуждаемых колебаний. Это демонстрируется численными экспериментами (глава 2), в которых частота изменялась при изменении поперечных размеров коаксиальной линии при фиксированных компонентах магнитного поля. Дисперсия, связанная с прецессией вектора намагниченности, в данном случае мало изменяет волновые

процессы в линии, но дает возможность перестраивать частоту в небольших пределах (несколько сотен МГц) за счет компонент магнитного поля, что и наблюдалось в экспериментах. При удалении феррита от проводников влияние дисперсии поверхностной волны уменьшается, а дисперсия, связанная с прецессией вектора намагниченности, начинает играть определяющую роль.

4.4. Основные выводы к главе 4

В нелинейной передающей линии со сплошным насыщенным ферритовым заполнением в случае, когда феррит прижат к одному из проводников линии передачи за формирование высокочастотного импульса за фронтом импульса напряжения отвечает 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 фронта. Наличие нелинейности в НПЛ поддерживает фронт импульса напряжения квазистационарным, преобразуя энергию постоянного тока в высокочастотную энергию. Таким образом в нелинейной 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} . За перестройку частоты магнитными полями ответственен механизм дисперсии, связанный с прецессией вектора намагниченности феррита.

Глава 5

Нелинейные коаксиальные передающие линии с гофрированным внутренним проводником и насыщенным ферритовым заполнением

5.1. Использование постоянных магнитов для насыщения ферритового заполнения коаксиальной передающей линии

Для насыщения ферритового заполнения НПЛ, как уже отмечалось выше, требуется создание аксиального магнитного поля величиной 20–100 кА/м. В большинстве случаев, если феррит находится во внешнем магнитном поле такой величины, то на выходе НПЛ наблюдается эффективная генерация высокочастотных колебаний. Несмотря на то, что необходимое магнитное поле значительно меньше по величине, чем поле транспортировки электронных пучков в релятивистских приборах, для его создания требуются соленоиды длиной порядка метра. Как правило, длина соленоида больше длины НПЛ на 20–30 см для обеспечения однородного насыщения ферритового заполнения на всей длине линии передачи. Для линий, работающих с частотами порядка 1 ГГц, требуется создание магнитного поля уже в довольно большом объеме, что приводит к значительному утяжелению генератора в целом. Вес таких соленоидов может достигать 50 кг.

Поскольку величина необходимого магнитного поля не так велика, существует возможность создания магнитных систем, использующих NdFeB постоянные магниты. Неодимовые постоянные магниты, которые являются доступными к приобретению по относительно малой цене в отличие от самариевых магнитов, обладают остаточной индукцией на уровне 1–1.5 Тл. Известны работы, в которых за счет набора постоянных неодимовых магнитов, расположенных снаружи НПЛ, создавалось магнитное поле с конфигурацией похожей на соленоидальное [49,61]. Несмотря на то, что системы получаются компактными, серьезных результатов они не показали по причине неоднородной конфигурации магнитного поля из-за сложности его создания на длине в десятки сантиметров.

Альтернативным подходом является создание магнитной системы трубчатой формы, с однородным продольным магнитным полем в десятки кА/м. В работе [92] удалось создать такую магнитную систему, на оси которой индукция магнитного поля составляет 0.18 Тл. Схема и внешний вид магнитной системы представлены на рисунке 5.1. Длина системы составляет около 30 см, диаметр равен 27 см. Вес системы 180 кг.

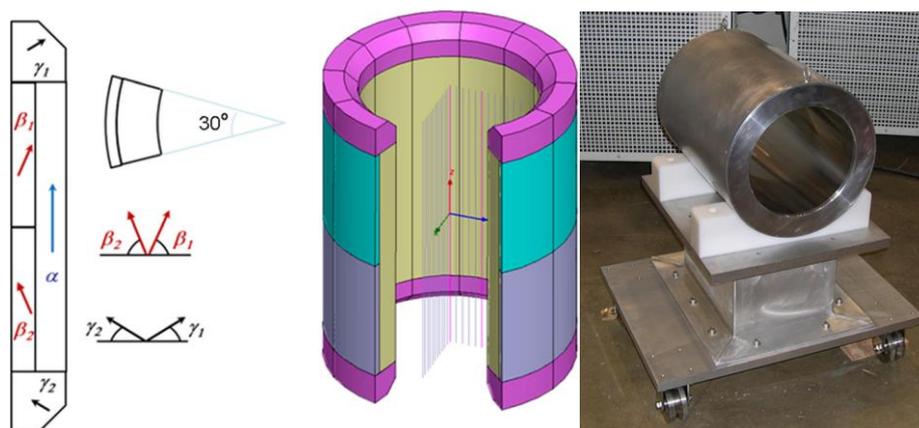


Рисунок 5.1. Схема магнитной системы и ее внешний вид из работы [92]. На схеме стрелками указано направление намагничивания магнитов.

Таким образом, можно сделать вывод, что создание магнитной системы, внутрь которой помещается нелинейная передающая линия с ферритом, не может являться альтернативой соленоиду для насыщения заполнения линии.

В данной работе развит подход к разработке НПЛ для генерации наносекундных импульсов высокочастотных колебаний, при котором используются аксиально намагниченные кольца из неодимовых магнитов, размеры которых сравнимы с размерами ферритовых колец. Картина магнитного поля такого магнитного кольца, рассчитанная с помощью CST Studio, с остаточной индукцией 1 Тл, поперечными размерами 46x28 мм и толщиной 2 мм представлена на рисунке 5.2. Если расположить два таких кольца на небольшом расстоянии друг от друга, то между ними можно получить близкое к однородному магнитное поле.

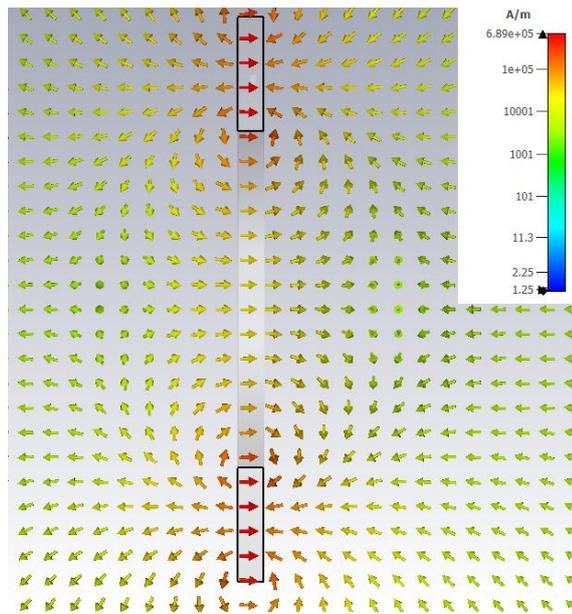


Рисунок 5.2. Поле аксиально намагниченного кольца из неодимового магнита в поперечном разрезе.

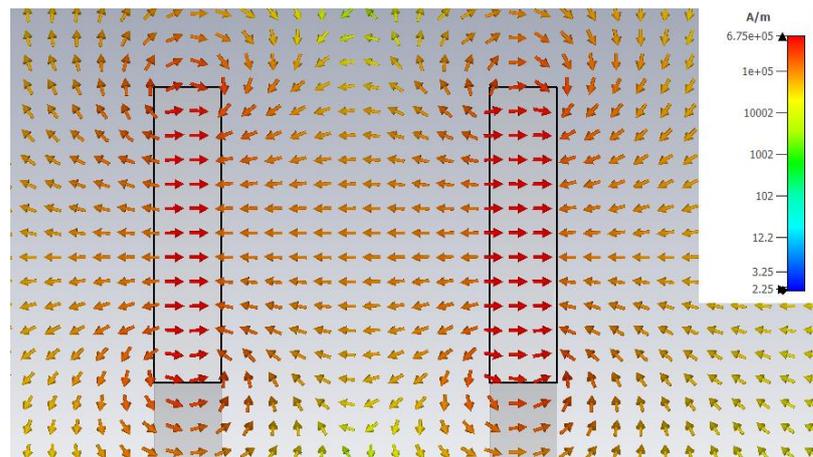


Рисунок 5.3. Поле двух неодимовых колец. Расстояние между кольцами 10 мм.

Если поместить ферритовое кольцо между двумя кольцевыми магнитами, то феррит окажется насыщенным в продольном направлении. В случае намагничивания отдельного кольца толщина которого составляет до 10 мм, существенным фактором, определяющим напряженность магнитного внутри феррита, является размагничивающее поле малого по размеру магнетика, возникающее в следствие закона сохранения магнитного потока. Размагничивающее поле может быть определено через размагничивающий фактор N следующим образом: $\mu_0 H_d = -NM$, здесь H_d – размагничивающее поле,

M – величина намагниченности ферромагнетика. Размагничивающий фактор N может принимать значения от 0 до 1. Физический смысл размагничивающего поля – величина, на которую будет уменьшена напряженность магнитного поля внутри ферромагнетика малых размеров, находящегося во внешнем поле. Типичное значение размагничивающего фактора в продольном направлении для ферритовых колец, используемых в НПЛ, находится в интервале 0.3–0.5 [93]. Картина магнитного поля внутри феррита и распределение его аксиальной компоненты вдоль толщины ферритового кольца на среднем радиусе представлены на рисунках 5.4 и 5.5. В расчете учтены паспортные характеристики NiZn ферритовых колец марки ВНП. Размеры ферритового кольца 32x20x6 мм.

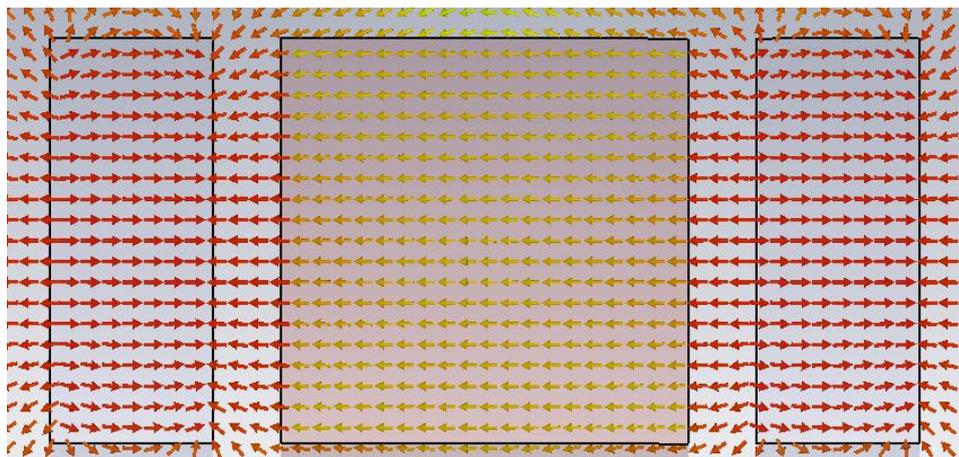


Рисунок 5.4. Картина магнитного поля внутри NiZn ферритового кольца, намагничиваемого в поле между двух колец из постоянных неодимовых магнитов.

Как видно из рисунка 5.5, с помощью предложенной схемы из постоянных магнитов можно получить квазиоднородное намагничивание феррита в аксиальном направлении с небольшим усилением магнитного поля к краям феррита. Величины магнитного поля, получаемые таким способом, соответствуют полям, обеспечивающим насыщение ферритового кольца с учетом размагничивающего фактора, а также являются оптимальными для возбуждения колебаний в НПЛ с однородным ферритовым заполнением.

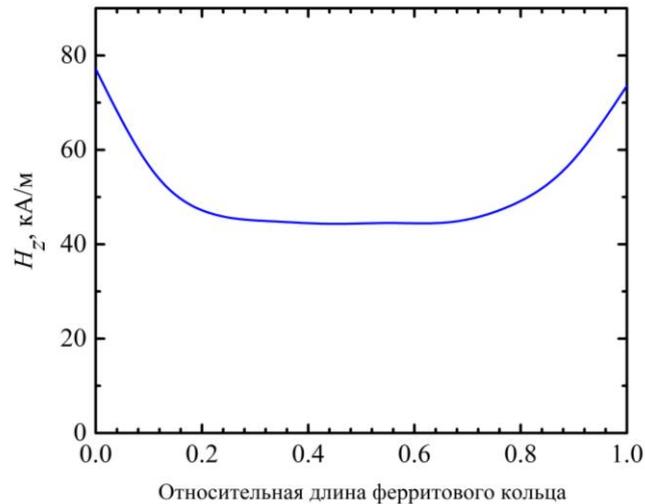


Рисунок 5.5. Распределение аксиальной компоненты напряженности магнитного поля в феррите по его длине.

5.2. Коаксиальная передающая линия с гофрированным внутренним проводником и периодическим расположением колец из постоянных магнитов и насыщенного феррита

Реализация коаксиальной линии передачи, в которой между проводниками в продольном направлении чередуются ферритовые кольца и постоянные магниты является невозможной. Более удобным является использование коаксиальной геометрии с гофрированным внутренним проводником внутри которого расположены постоянные магниты. Схема гофрированной геометрии НПЛ представлена на рисунке 5.6. Для повышения электрической прочности свободное пространство между проводниками линии передачи заполнено вакуумным маслом с диэлектрической проницаемостью равной 2.2.

В данной главе представлены результаты численного моделирования процесса возбуждения высокочастотных колебаний в гофрированных нелинейных передающих линиях (ГНПЛ). В основном представлены результаты моделирования, получение которых в эксперименте являются затруднительными

в силу различных сложностей в проведении подобных экспериментов. Результаты экспериментального исследования ГНПЛ будут представлены в следующей главе.

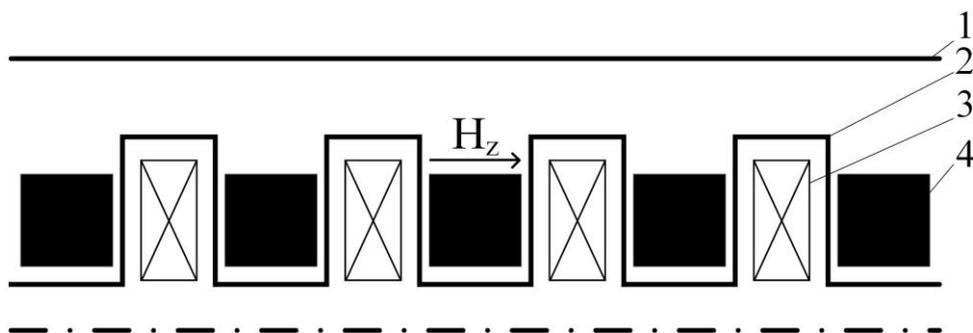


Рисунок 5.6. Схема НПЛ с гофрированным внутренним проводником и чередующимися ферритовыми и магнитными кольцами. 1 – внешний проводник, 2 – внутренний гофрированный проводник, 3 – постоянный кольцевой неодимовый магнит, 4 – ферритовое кольцо.

Использование численного моделирования для расчета конфигурации ГНПЛ, ее оптимизации и исследований физических процессов в линии передачи является более удобным. Построение аналитической модели для такой конфигурации НПЛ является еще более сложной задачей по сравнению с линиями с однородным ферритовым заполнением из-за особенности конструкции внутреннего проводника, представляющего собой электродинамическую структуру с добавлением нелинейных элементов. Анализ ГНПЛ при помощи построения дисперсионных характеристик также усложнен в силу того, что для этого нужно строить электрическую схему замещения линии передачи и учитывать нелинейные свойства феррита. Тем не менее, анализу дисперсионных характеристик ГНПЛ будет посвящен отдельный раздел в рамках данной главы.

В моделировании рассматривались две геометрии ГНПЛ, работающие при разных напряжениях падающего импульса и с различающейся частотой генерации. На рисунке 5.7 на схеме ГНПЛ представлены обозначения характерных размеров. Для рассматриваемых линий $R_i = R_{fi}$.

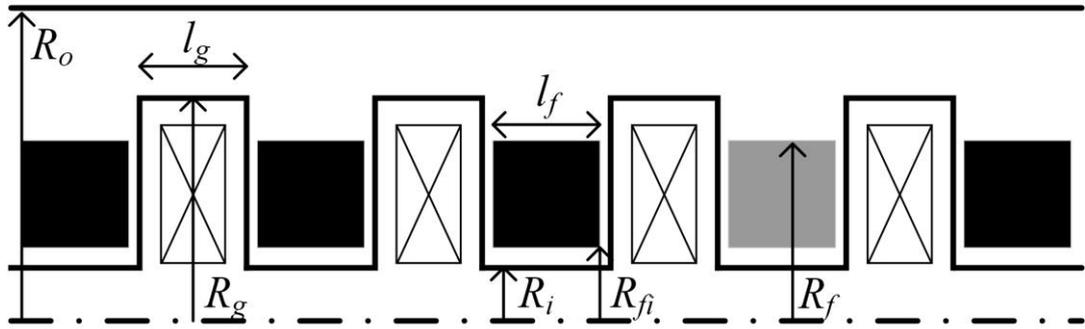


Рисунок 5.7. Геометрия ГНПЛ и обозначения ее характерных размеров.

Гофрированная нелинейная передающей линия №1 (ГНПЛ1):

$$R_{fi} = 14 \text{ мм}, R_f = 22.5 \text{ мм}.$$

Гофрированная нелинейная передающей линия №2 (ГНПЛ2):

$$R_{fi} = 3 \text{ мм}, R_f = 6 \text{ мм}.$$

При моделировании с использованием кода KARAT не представляется возможным задать неоднородное распределение магнитного поля внутри феррита. Начальные условия для феррита представляли собой то, что феррит находится в состоянии насыщения с величиной намагниченности насыщения 0.314 Тл и находится во внешнем однородном магнитном поле величиной 40 кА/м. В численных экспериментах, где внешнее магнитное поле менялось это будет указываться дополнительно. Максимальное рабочее напряжение падающей волны для ГНПЛ1 составляет 300 кВ, а ее импеданс линии 24 Ома, для ГНПЛ2 100 кВ и 22 Ома. Величина максимального напряжения определяется величиной пробивного электрического поля для масла в коаксиальной линии передачи, по которой импульс напряжения поступает в ГНПЛ.

5.3. Динамика возбуждения высокочастотных колебаний при распространении высоковольтного импульса в нелинейной передающей линии с гофрированным внутренним проводником

Рассмотрим с использованием численного моделирования динамику возбуждения высокочастотных колебаний в гофрированной нелинейной передающей линии в зависимости от ее продольных размеров. В случае гофрированной линии под длиной удобнее понимать количество ячеек (или периодов) линии. Под одной ячейкой линии будем понимать ту часть гофрированного проводника, которая содержит одно ферритовое кольцо и один металлический элемент гофрировки.

Рассмотрим динамику импульса амплитудой 300 кВ при его распространении в ГНПЛ1 в зависимости от числа пройденных ячеек линии. Форма падающего импульса напряжения соответствует импульсу, изображенному на рисунке 2.2. Осциллограммы для этого случая представлены на рисунке 5.8. Видно, что динамика возбуждения колебаний гофрированной геометрии соответствует динамике возбуждения колебаний в НПЛ с однородным ферритовым заполнением. В начале на небольшом отрезке линии начинает формироваться ударный фронт (резкий перепад напряжения субнаносекундной длительности), за ним происходит возбуждение высокочастотных колебаний и нарастание их мощности. Результаты моделирования показывают, что процесс нарастания мощности колебаний в проведенных расчетах, в том числе и пиковой мощности, соответствующей первому колебанию, не переходит в стадию насыщения. Зависимость амплитуды первого колебания U_1 от количества ячеек в линии для ГНПЛ1 представлена на рисунке 5.9.

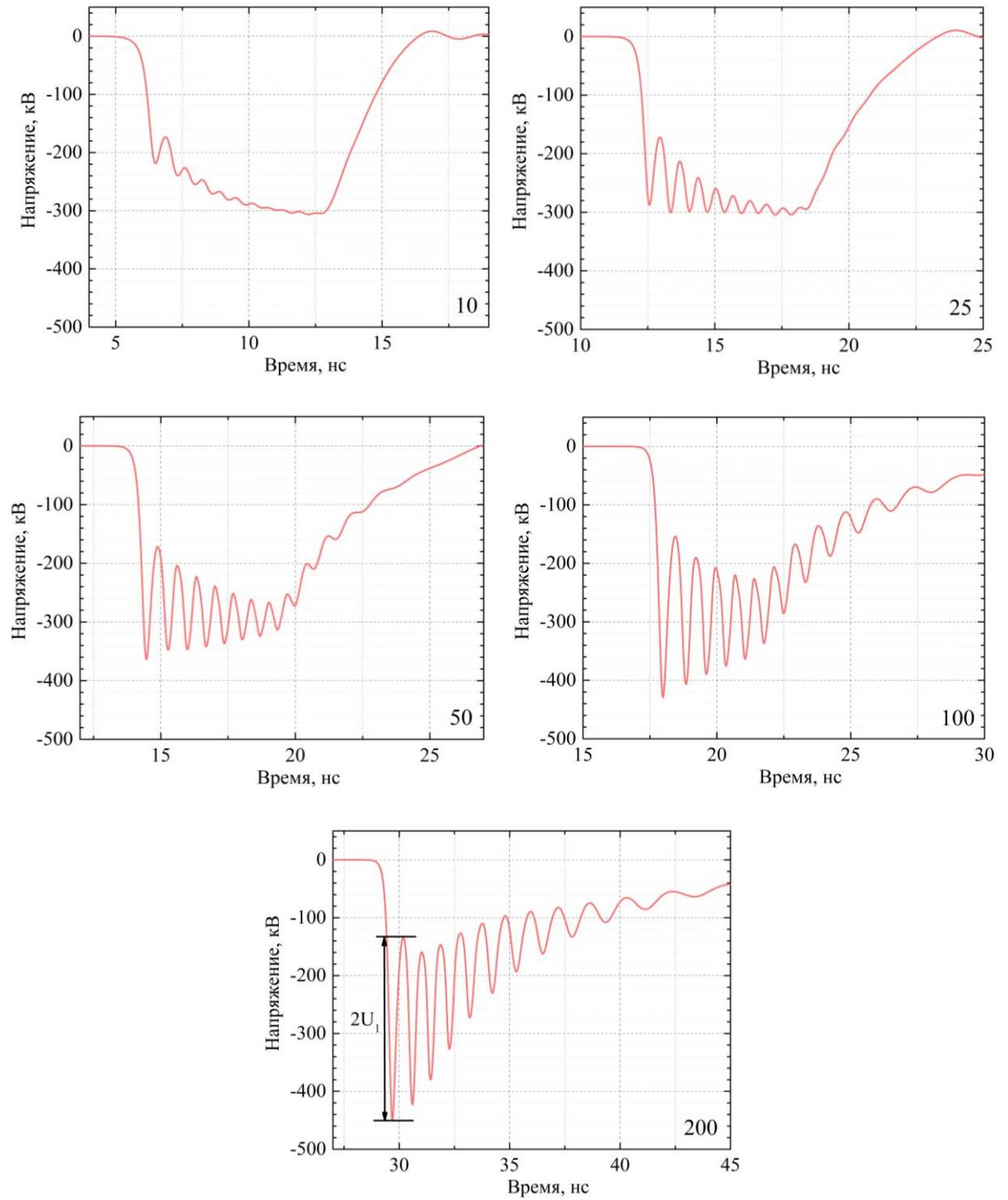


Рисунок 5.8. Динамика высоковольтного импульса при его распространении в ГПЛ 1 (10, 25, 50, 100, 200 ячеек).

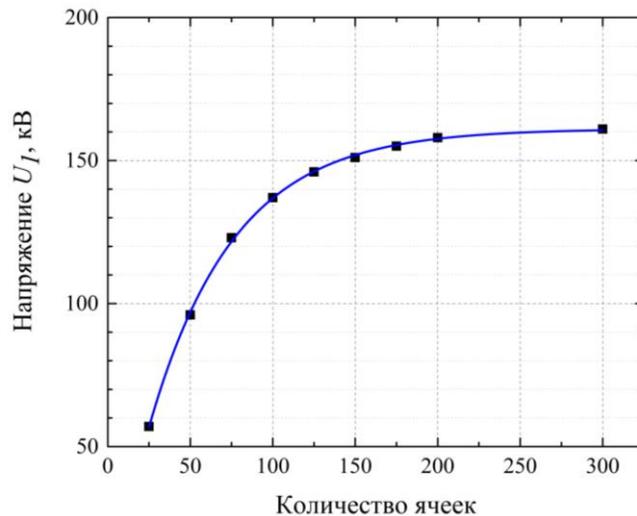


Рисунок 5.9. Зависимость амплитуды первого колебания U_1 от количества ячеек ГНПЛ1.

Как показывают результаты моделирования, начиная со 100 ячеек в ГНПЛ1 амплитуда первого колебания хоть и увеличивается, но медленно. За последние 100 ячеек с 158 до 161 кВ. При этом амплитуда второго и последующих колебаний продолжает расти. В моделировании не был найден предел роста мощности по длине линии в силу ограничения длины расчетной области. Что касается эксперимента, то поскольку в NiZn ферритовых кольцах, используемых в экспериментах, присутствуют диэлектрические потери, насыщение пиковой мощности в ГНПЛ1 должно наблюдаться в интервале от 100 до 200 ячеек линии, поскольку в этом интервале прирост энергии в первом колебании замедляется.

Непрерывный рост мощности высокочастотного импульса может быть обусловлен тем, что в гофрированной линии дисперсионное расплывание импульса слабее, чем в НПЛ с однородным ферритовым заполнением (рисунок 2.22).

Между гофрированной линией и НПЛ с однородным ферритовым заполнением в моделировании наблюдается существенная разница в длительности генерируемого высокочастотного импульса. Ниже представлены осциллограммы импульсов на выходе ГНПЛ1 и НПЛ геометрия 2 при подаче на их вход импульса напряжения длительностью 15 нс по полувысоте. Их сравнение

оправдано, поскольку поперечные размеры линий близки, а также в них используются ферритовые кольца одинаковых поперечных размеров. Осциллограммы соответствуют длине НПЛ (геометрия 2) 80 см и ГНПЛ1 из 100 ячеек. Амплитуда падающего импульса напряжения 300 кВ, напряженность аксиального магнитного поля в феррите 40 кА/м. Суммарная длина ферритового заполнения в ГНПЛ1 из 100 ячеек также составляет 80 см.

Длительность высокочастотного импульса в случае НПЛ с однородным ферритовым заполнением составляет 7 нс, в случае ГНПЛ – 13 нс. В линии передачи с однородным заполнением ферритом высокочастотный импульс достигает длительности более 10 нс при длине линии более 200 см. При этом амплитуда первого колебания уменьшается с 187 кВ до 155 кВ.

Данная особенность динамики возбуждения колебаний в НПЛ с гофрированным внутренним проводником указывает на их перспективность для генерации СВЧ-импульсов длительностью более 10 нс, что представляется затруднительным при использовании НПЛ с однородным ферритовым заполнением.

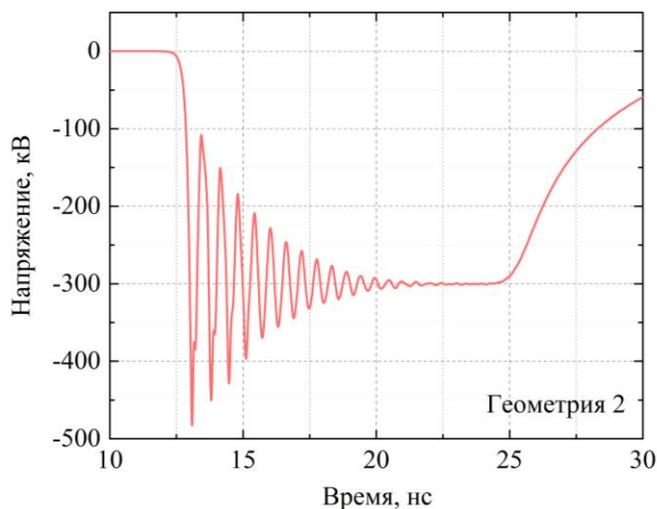


Рисунок 5.10. Осциллограмма импульса напряжения на выходе НПЛ (геометрия 2). Длительность падающего импульса на полувысоте 15 нс.

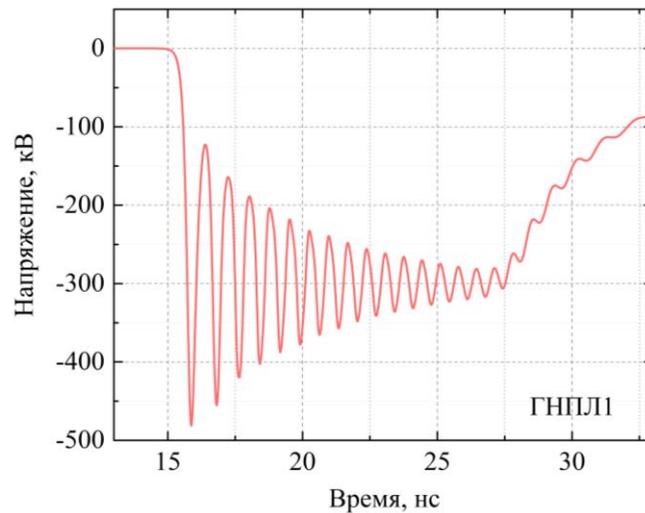


Рисунок 5.11. Осциллограмма импульса напряжения на выходе ГНПЛ1.

Длительность падающего импульса на полувысоте 15 нс.

Динамика возбуждения высокочастотных колебаний для ГНПЛ2 представлена на рисунке 5.12. Осциллограммы, полученные в численном моделировании для ГНПЛ2, качественно соответствуют динамике в ГНПЛ1. На малой длине линии образуется участок быстрого нарастания напряжения субнаносекундной длительности, затем за ним начинают возбуждаться высокочастотные колебания. Как и в предыдущем случае, амплитуда первого колебания в ГНПЛ2 с увеличением длины линии не выходит на насыщение. Зависимость амплитуды первого колебания от количества ячеек в линии представлена на рисунке 5.13. Дополнительно следует отметить то, что длительность импульса на выходе ГНПЛ2 длиной в 100 ячеек составляет 8 нс при центральной частоте импульса выше 3 ГГц. Из литературы и накопленного опыта численных экспериментов известно, что для НПЛ с однородным ферритовым заполнением, позволяющих генерировать СВЧ-импульсы с центральной частотой выше 3 ГГц, длительность импульса не превышает 10 периодов колебаний.

Таким образом, результаты численного моделирования указывают на то, что использование НПЛ с гофрированным внутренним проводником может позволить повысить длительность генерируемых СВЧ-импульсов в нелинейных

передающих линиях с насыщенным ферритом по сравнению с линиями передачи с однородным заполнением при сохранении их мощностных характеристик.

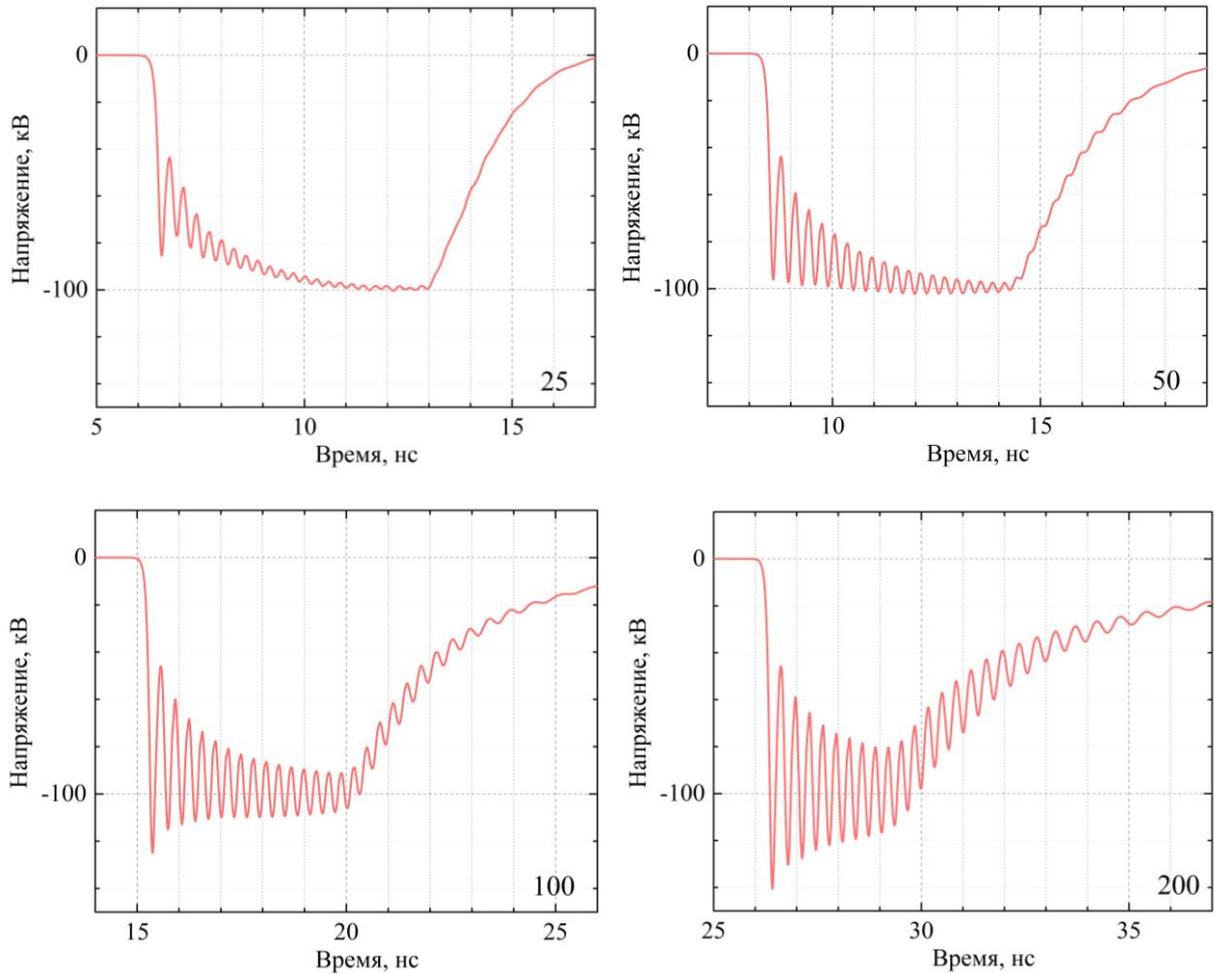


Рисунок 5.12. Динамика высоковольтного импульса при его распространении в ГНПЛ 2 (25, 50, 100, 200 ячеек).

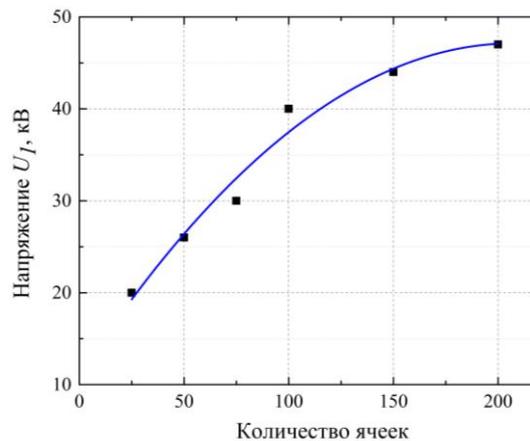


Рисунок 5.13. Зависимость амплитуды первого колебания U_1 от количества ячеек ГНПЛ2.

5.4. Спектральные характеристики импульсов высокочастотных колебаний, генерируемых в гофрированных линиях передачи с насыщенным ферритом

Рассмотрение спектральных характеристик импульсов, генерируемых в ГНПЛ, следует начать с изменения спектральных характеристик импульсов по мере их распространения в гофрированной линии передачи (раздел 5.2). Анализ спектральных характеристик импульсов будет проводиться на основе спектра, полученного с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье (FFT), примененного к осциллограмме импульса напряжения на выходе ГНПЛ.

Из спектральных характеристик наиболее важными представляются две: центральная частота импульса f_c и ширина спектральной полосы по уровню -10 дБ δf . Применение этих характеристик для высокочастотных импульсов справедливо только для излученных импульсов, однако в рамках данного раздела будут рассматриваться спектральные характеристики импульсов в линии в предположении бесконечно широкой полосы излучающей антенной системы.

На рисунках 5.14 и 5.15 представлены спектры импульсов на выходе ГНПЛ1 длиной в 100 и 200 ячеек.

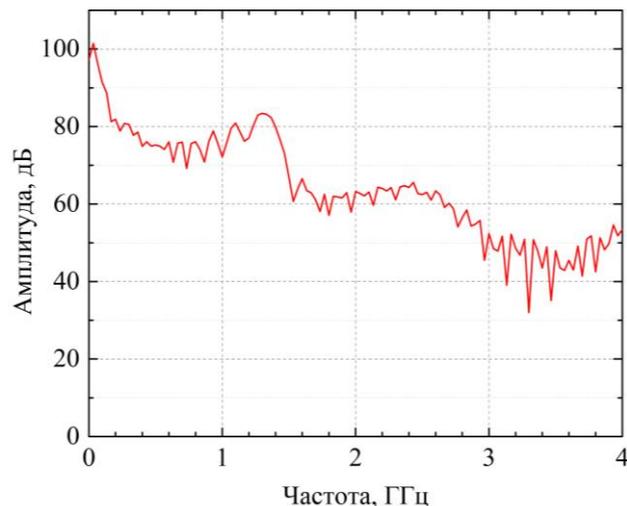


Рисунок 5.14. Спектр импульса напряжения на выходе ГНПЛ1 длиной в 100 ячеек.

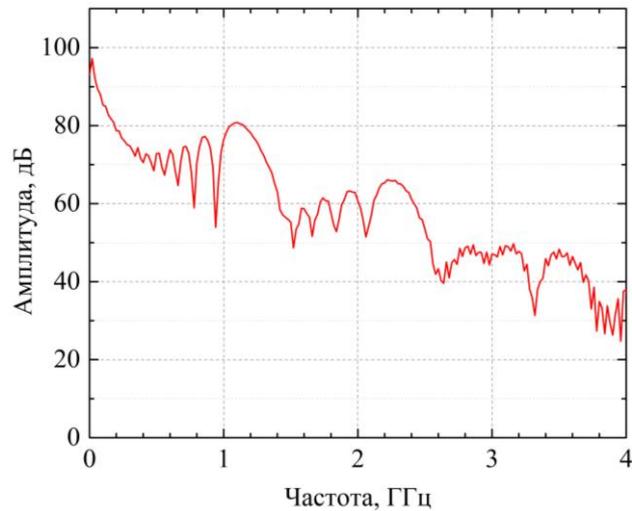


Рисунок 5.15. Спектр импульса напряжения на выходе ГНПЛ1 длиной в 200 ячеек.

Для классификации спектров необходимо ввести еще одну характеристику – парциальную ширину спектра, которая определяется как [94]

$$\eta = \frac{\delta f}{f_c}. \quad (5.1)$$

Центральная частота импульса на выходе ГНПЛ1 длиной 100 ячеек составляет 1.3 ГГц. Что касается парциальной ширины спектра, то здесь следует заметить, что в области низких частот по уровню -10 дБ спектр импульса уширяется. С учетом этого уширения ширина спектра составляет 0.45 ГГц. Для линии из 200 ячеек центральная частота составляет 1.1 ГГц, а ширина 0.35 ГГц. Можно сделать вывод, что при увеличении длины ГНПЛ спектр генерируемого импульса сужается. Парциальная ширина спектра для линии длиной 100 ячеек составляет 0.35, для линии из 200 ячеек – 0.32. Согласно классификации Федеральной комиссии связи США (FCC) [95] под сверхширокополосными импульсами понимают импульсы с $\eta \geq 20\%$. Таким образом, при использовании широкополосной антенны, источник излучения на основе ГНПЛ будет представлять собой источник сверхширокополосного излучения.

Зависимости центральной частоты колебаний от количества ячеек в линии для ГНПЛ1 и ГНПЛ2 представлены на рисунках 5.16 и 5.17. С увеличением длины

пробега по линии центральная частота падает; это, по всей видимости, как и в случае НПЛ со сплошным ферритовым заполнением, может быть вызвано дисперсионным расплыванием импульса.

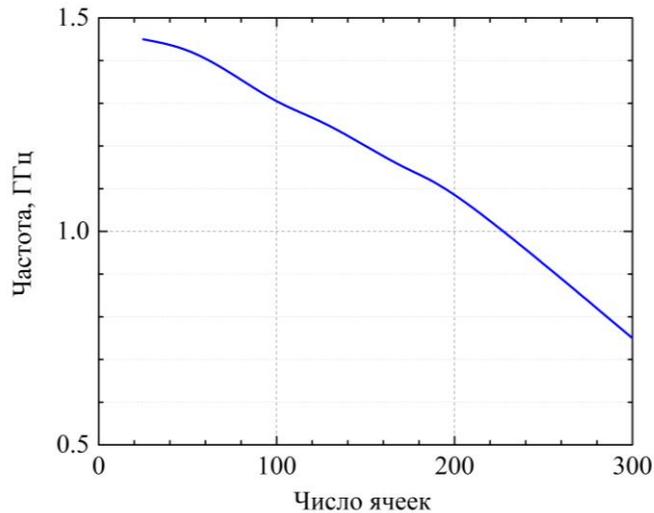


Рисунок 5.16. Зависимость центральной частоты колебаний от длины ГНПЛ1.

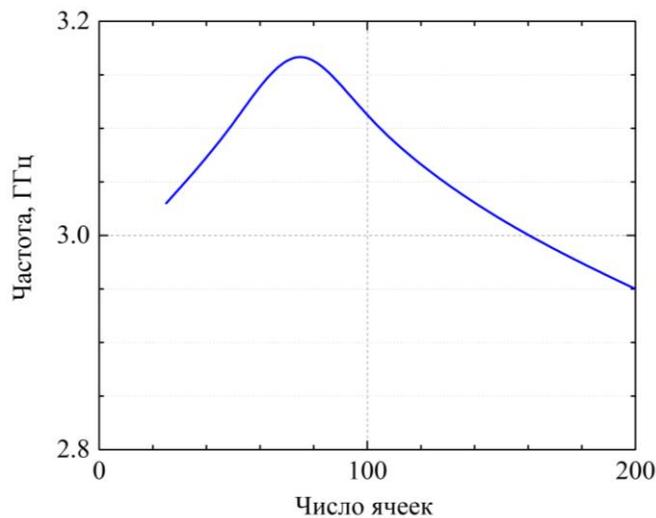


Рисунок 5.17. Зависимость центральной частоты колебаний от длины ГНПЛ2.

Зависимости центральной частоты генерируемых в ГНПЛ импульсов от амплитуды падающего напряжения представлены на рисунках 5.18 и 5.19. Полученные зависимости указывают на то, что начиная с определенной величины напряжения рост частоты колебаний замедляется, что нехарактерно для НПЛ с однородным ферритовым заполнением. При этом следует заметить, что в НПЛ с

гофрированным внутренним проводником частота колебаний ниже, чем в линии с однородным ферритовым заполнением тех же поперечных размеров.

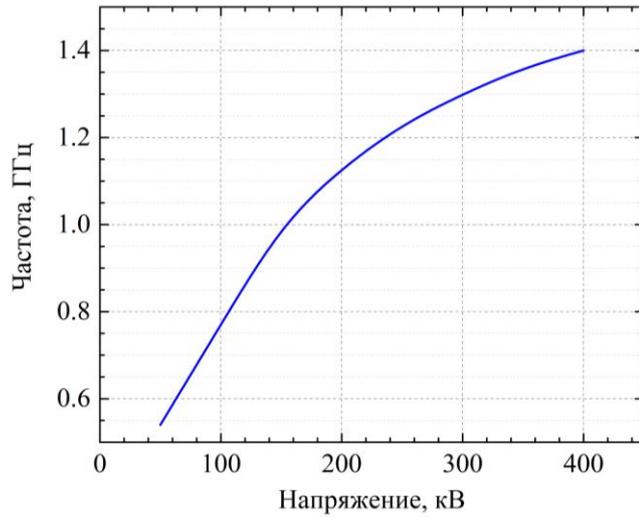


Рисунок 5.18. Зависимость центральной частоты колебаний от амплитуды падающего импульса напряжения в ГНПЛ1.

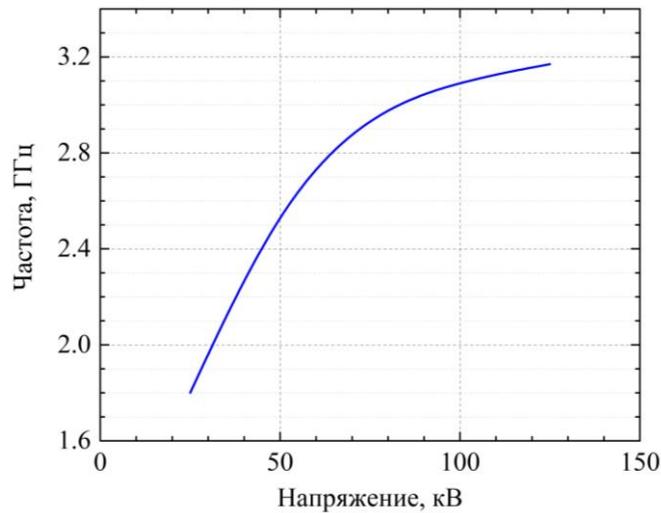


Рисунок 5.19. Зависимость центральной частоты колебаний от амплитуды падающего импульса напряжения в ГНПЛ2.

Зависимости центральной частоты от аксиального поля подмагничивания H_z представлены на рисунках 5.20 и 5.21.

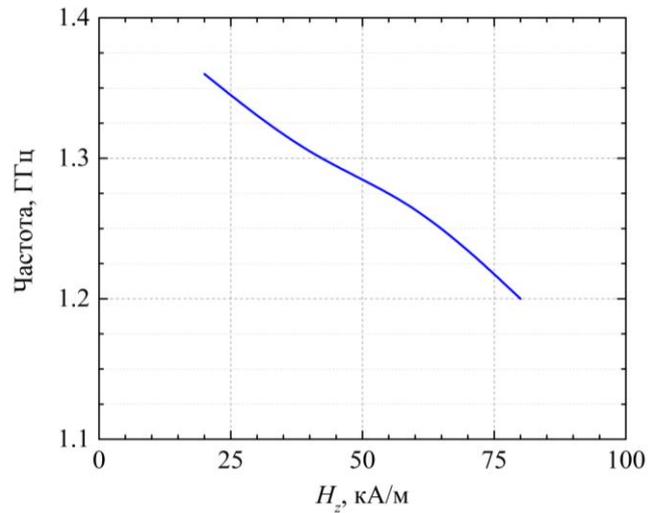


Рисунок 5.20. Зависимость центральной частоты колебаний от величины аксиального поля внутри феррита H_z в ГНПЛ1.

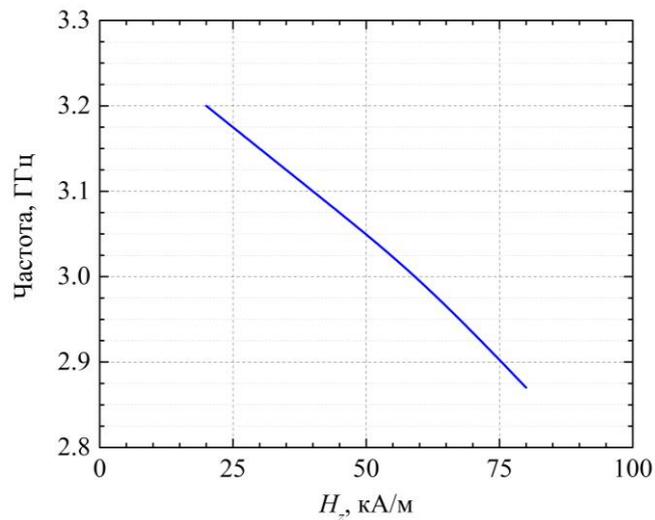


Рисунок 5.21. Зависимость центральной частоты колебаний от величины аксиального поля внутри феррита H_z в ГНПЛ2.

С увеличением аксиального магнитного поля внутри феррита наблюдается небольшое уменьшение частоты возбуждаемых колебаний, характерное и для НПЛ с однородным ферритовым заполнением. Особенностью линий передачи с гофрированным внутренним проводником является то, что с изменением аксиального поля внутри феррита амплитуда первого колебаний и, как следствие, мощность высокочастотного импульса практически не изменяется. В передающих линиях с однородным ферритовым заполнением уменьшение амплитуды первого

колебания с ростом аксиального поля может достигать двух и более раз. Для ГНПЛ1 с увеличением магнитного поля амплитуда первого колебаний изменяется менее чем на 10%, в ГНПЛ2 уменьшение амплитуды составляет менее 5% для диапазона полей 20–80 кА/м. Также из результатов численного моделирования можно сделать вывод, что оптимальным аксиальным магнитным полем H_z для генерирования мощных импульсов СВЧ-излучения являются поле 40–50 кА/м.

5.5. Механизм дисперсии в коаксиальной передающей линии с гофрированным внутренним проводником

Для того, чтобы понять механизм дисперсии в линии передачи с гофрированным внутренним проводником, необходимо перейти к ее схеме замещения. Схема замещения гофрированной линии представлена на рисунке 5.22, она представляет собой дискретную линию передачи с емкостной связью между соседними ячейками линии.

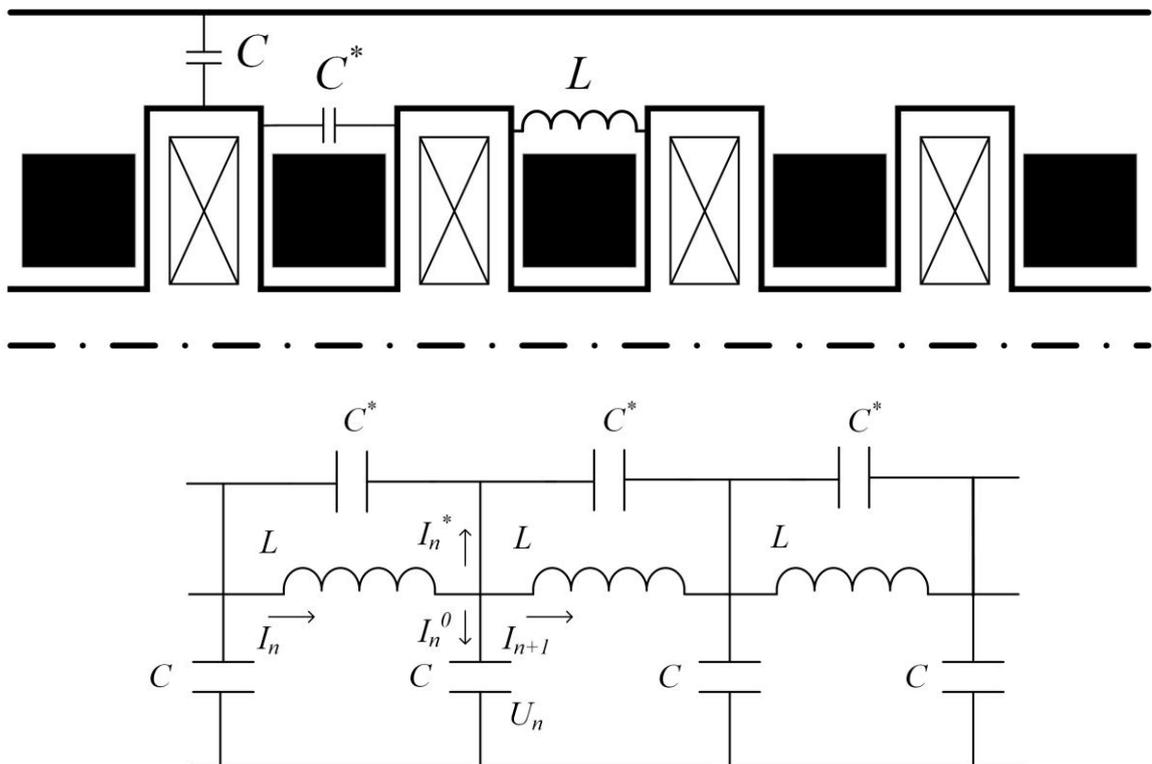


Рисунок 5.22. Схема замещения гофрированной коаксиальной передающей линии.

Найдем дисперсионную зависимость для данной схемы замещения. Уравнения Кирхгофа для n -ой ячейки линии имеют вид

$$I_n = I_n^0 + I_n^* + I_{n+1}, \quad (5.2)$$

$$L \frac{dI_n}{dt} = U_{n-1} + U_n. \quad (5.3)$$

Связь тока I_n^0 с напряжением U_n дается выражением

$$C \frac{dU_n}{dt} = I_n^0. \quad (5.4)$$

Используя первое уравнение Кирхгофа и уравнение (5.4), запишем:

$$C \frac{dU_n}{dt} = I_n - I_n^* - I_{n+1}. \quad (5.5)$$

Ток I_n^* определяется из величин напряжения на емкостях C^* , C_n , C_{n-1} , C_{n+1} . Опустим вывод соотношения для тока и сразу перепишем (5.5) с учетом конечного результата

$$C \frac{dU_n}{dt} = I_n - I_{n+1} + C^* \frac{d}{dt} (U_{n-1} - 2U_n + U_{n+1}). \quad (5.6)$$

Продифференцируем по времени уравнение (5.6) и подставим величины токов, используя второе уравнение Кирхгофа (5.3) для того, чтобы уравнения содержало только напряжение

$$\frac{d^2 U_n}{dt^2} = \frac{1}{LC} (U_{n-1} - 2U_n + U_{n+1}) + \frac{C^*}{C} \frac{d^2}{dt^2} (U_{n-1} - 2U_n + U_{n+1}). \quad (5.7)$$

Введем обозначения $\omega_0^2 = 1/LC$ и $\gamma = C^*/C$. Представим бегущую в линии волну напряжения в виде

$$U_n = A_n e^{i(\omega t - kz)}, \quad (5.8)$$

при этом величины напряжения в разных ячейках сдвинуты по фазе:

$$U_{n+1} = U_n e^{-i\varphi}. \quad (5.9)$$

Подставляя (5.8) в (5.7) и учитывая (5.9), получим дисперсионное соотношение для волн в дискретной передающей линии с емкостными связями между соседними ячейками:

$$\omega^2 = \frac{4\omega_0^2 \sin^2(\varphi/2)}{1 + 4\gamma \sin^2(\varphi/2)}. \quad (5.10)$$

Если емкостная связь между ячейками отсутствует $\gamma=0$, то это соотношение переходит в соотношение для дискретной линии передачи

$$\omega^2 = 4\omega_0^2 \sin^2(\varphi/2). \quad (5.11)$$

Связь волнового числа k со сдвигом фазы дается выражением $\varphi=kd$, где d пространственная длина одной ячейки.

Рассмотрим дисперсионную зависимость гофрированной линии на примере ГНПЛ2. Используем формулу (5.10), необходимо вычислить значение емкости связи между ячейками C^* . Трудность при этом заключается в том, что вычисление значения этой емкости в статическом приближении не представляется возможным, поскольку фактически обкладки данного «плоского» конденсатора в виде колец закорочены с одной стороны и по определению электрической емкости величина C^* должна равняться нулю. С другой стороны, при распространении наносекундных импульсов по гофрированной линии передачи наличием емкостной связи между соседними ячейками линии пренебречь нельзя, особенно для высокочастотных волн. Это связано с тем, что при распространении волн по гофрированному коаксиалу в феррите присутствует аксиальная компонента электрического поля, наличие которой можно привести в соответствие некоторое значение электрической емкости.

Для определения величины емкости C^* можно воспользоваться численным моделированием. С использованием программного обеспечения CST Studio возможно рассчитать дисперсионную характеристику передающей линии при численном решении уравнений Максвелла в частотной области. На основе полученной в моделировании дисперсионной характеристики, используя выражение (5.10), можно определить величину емкости связи между звеньями.

Дисперсионная кривая для ГНПЛ2 в приближении полностью насыщенного феррита (магнитная проницаемость $\mu = 1$) представлена на рисунке 5.23. Диэлектрическая проницаемость ферритовых колец равна 13. Анализ данной дисперсионной кривой с использованием соотношений (5.10) и (5.11) показал, что в ГНПЛ2 величина емкости C^* пренебрежимо мала и составляет не более $\gamma = 0.01$, и дисперсионная кривая соответствует дисперсии дискретной линии передачи (5.11), она также представлена на рисунке 5.23. Наличие емкостной связи соответствующей $\gamma = 0.05$, приводит к сильному отклонению от дисперсионной кривой, полученной в моделировании. Эта дисперсионная кривая показана на рисунке 5.23 пунктирной линией. Емкостная связь между ячейками линии в ГНПЛ2 начинает проявляться при увеличении диэлектрической проницаемости ферритовых колец выше 20. В этом случае для расчета дисперсии ГНПЛ2 необходимо пользоваться соотношением (5.10).

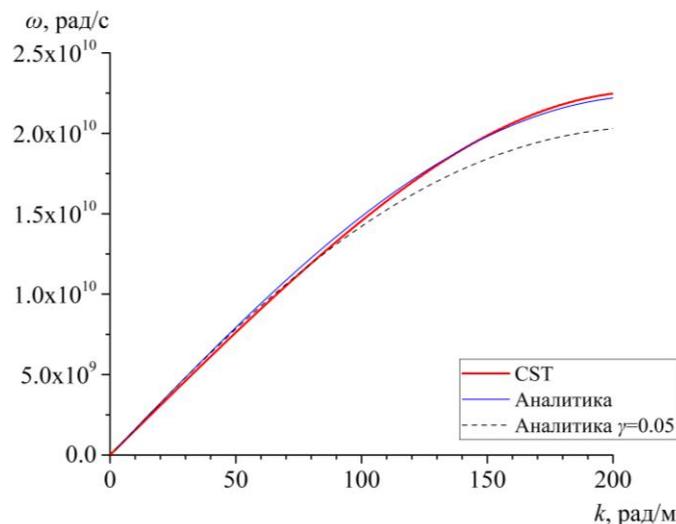


Рисунок 5.23. Дисперсионные кривые для ГНПЛ2.

Частота генерации в гофрированных нелинейных передающих линиях, также как и в линиях передачи с однородным ферритовым заполнением, определяется в первую очередь поперечными размерами линии. При переходе к большим поперечным размерам емкостная связь между ячейками начинает оказывать влияния на дисперсионные свойства линии передачи, поскольку емкость перекрестной связи начинает расти.

Рассмотрим гофрированную НПЛ с поперечными размерами большими, чем у ГНПЛ2, с ферритовыми кольцами 32x20x6мм и рабочим напряжением в 300 кВ. Эта ГНПЛ также будет рассматриваться в следующей главе.

Гофрированная нелинейная передающей линия №3 (ГНПЛ3):

$$R_{fi} = 10 \text{ мм}, R_f = 16 \text{ мм}.$$

У данной ГНПЛ коэффициент емкостной связи, полученный с использованием моделирования в CST Studio, составляет $\gamma = 0.235$. На рисунке 5.24 представлены дисперсионные кривые для ГНПЛ3, полученные в моделировании и рассчитанные по формуле (5.10).

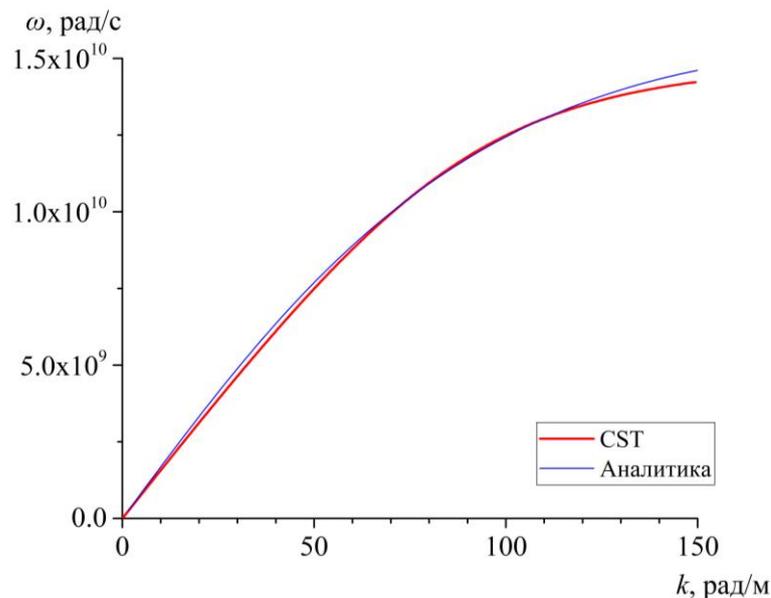


Рисунок 5.24. Дисперсионные кривые для ГНПЛ3.

При рассмотрении дисперсионных кривых для ГНПЛ2 и ГНПЛ3 видно, что в случае линии передачи большего поперечного размера замедленными являются

волны более низких частот, как и в случае линий с однородным ферритовым заполнением. Таким образом, частота генерации в линии с гофрированным внутренним проводником также растет с уменьшением поперечных размеров линии. В гофрированных НПЛ также как и в НПЛ с однородным заполнением ферритом имеет место дисперсионное расплывание импульса напряжения при его распространении в линии передачи с дисперсией.

5.6. Основные выводы к главе 5

Представлена конфигурация коаксиальной нелинейной передающей линии с насыщенным ферритом в поле колец из постоянных магнитов и гофрированным внутренним проводником. 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. 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 дискретной линии передачи. Уменьшение поперечных размеров ГНПЛ приводит к росту частоты генерации, в следствие изменения дисперсионных свойств линии.

Глава 6

Экспериментальное исследование генерирования наносекундных импульсов высокочастотных колебаний в гофрированных нелинейных передающих линиях с насыщенным ферритом

6.1. Конфигурации гофрированных нелинейных передающих линий

В данной главе представлены результаты экспериментального исследования генерации импульсов высокочастотных колебаний в ГНПЛ шести различных геометрий. Три из них совпадают с геометриями ГНПЛ, рассмотренными в предыдущей главе с использованием численного моделирования. Ниже представлены размеры гофрированных линий и их параметры (аксиальное поле внутри феррита, импеданс, длина), расшифровка обозначений представлена на рисунке 5.8.

Таблица 6.1. 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

В экспериментах использовались ферриты марки 200ВНП, начальная магнитная проницаемость которых составляет 200, максимальная магнитная проницаемость 850 при 80 А/м, коэрцитивная сила 80 А/м, намагниченность насыщения 0.4 Тл. Все ГНПЛ были заполнены вакуумным маслом для повышения их электрической прочности. Диэлектрическая проницаемость вакуумного масла составляет 2.2.

Схема проведения экспериментов описана в приложении 2. Измерения проводились при помощи цифрового осциллографа Tektronix TDS6604 с аналоговой полосой пропускания 6 ГГц и частотой дискретизации 20 ГВыб/с. От измерительного датчика до осциллографа сигнал поступал по радиочастотному измерительному тракту, состоящему из кабелей и аттенуаторов с рабочей полосой до 8 ГГц.

6.2. Генерирование высокочастотных импульсов в гофрированных нелинейных линиях передачи. Зависимость мощности колебаний от напряжения падающей волны

В данном параграфе приведены типичные осциллограммы импульсов напряжения на выходе шести различных конфигураций ГНПЛ, а также зависимости амплитуды первого колебания от напряжения падающего импульса.

Гофрированная нелинейная передающая линия №1

Эксперименты с ГНПЛ1 проводились по схеме проведения эксперимента №2 (приложение 2), в экспериментах использовался генератор СИНУС-200, позволявший получать на согласованной нагрузке импульс напряжения амплитудой от 100 до 320 кВ. На рисунке 6.1 приведена осциллограмма падающего импульса напряжения амплитудой 310 кВ. Длительность фронта составляет 3 нс по уровню 0.1–0.9.

Форма импульса напряжения на выходе ГНПЛ1 представлена на рисунке 6.2. Также на рисунке 6.3 представлена осциллограммам импульса напряжения на выходе НПЛ геометрия 2 на вход которой подавался тот же импульс напряжения, при оптимальном поле подмагничивания, которое составляло 42 кА/м. Сравнение этих осциллограмм представляет интерес, поскольку эти две линии обладают одинаковым поперечными размерами, различием является лишь способ насыщения ферритового заполнения.

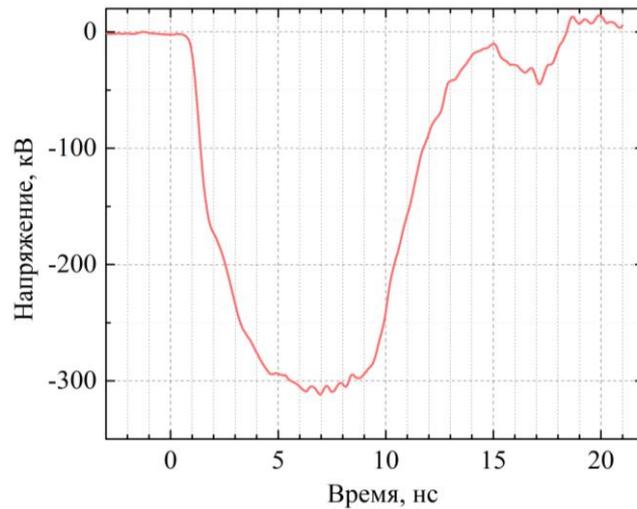


Рисунок 6.1. Форма импульса напряжения на выходе генератора СИНУС-200 в экспериментах с ГНПЛ1.

Центральная частота колебаний для ГНПЛ1 составляет 1.3 ГГц при пиковой мощности высокочастотного импульса 110 МВт. Низкая эффективность, скорее всего связана с большой длительностью фронта падающего импульса напряжения. Для НПЛ (геометрия 2) центральная частота колебаний составляет 1.7 ГГц, пиковая мощность 105 МВт. Несмотря на то, что полученная в эксперименте пиковая мощность ГНПЛ1 сравнима с мощностью нелинейной линии с однородным ферритовым заполнением, конструкция ГНПЛ1 обладает меньшей электрической прочностью (что особенно важно для импульсно-периодической работы генератора), поскольку гофрировка внутреннего проводника выполнена таким образом, что между металлическими частями внутреннего проводника и внешним проводником остается зазор менее 6 мм. Последующие геометрии ГНПЛ, представленные в данной работе, не имеют такого недостатка.

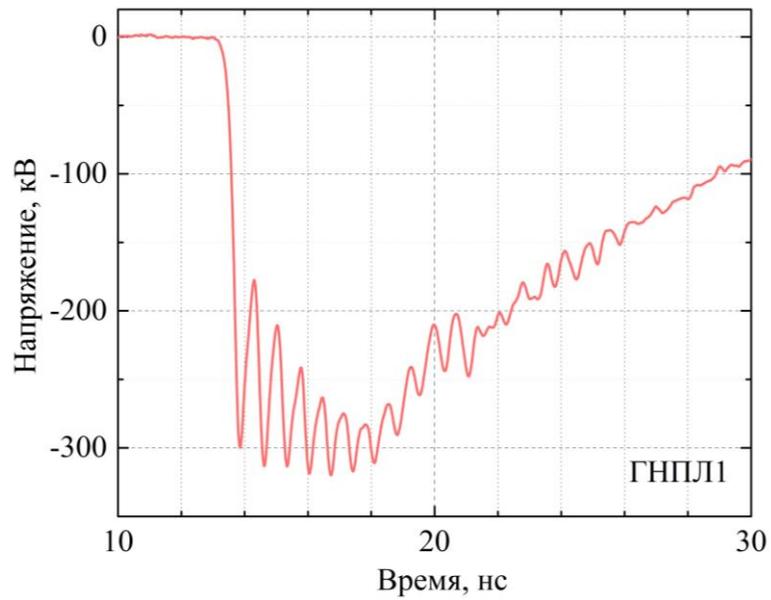


Рисунок 6.2. Осциллограмма напряжения на выходе ГНПЛ1.

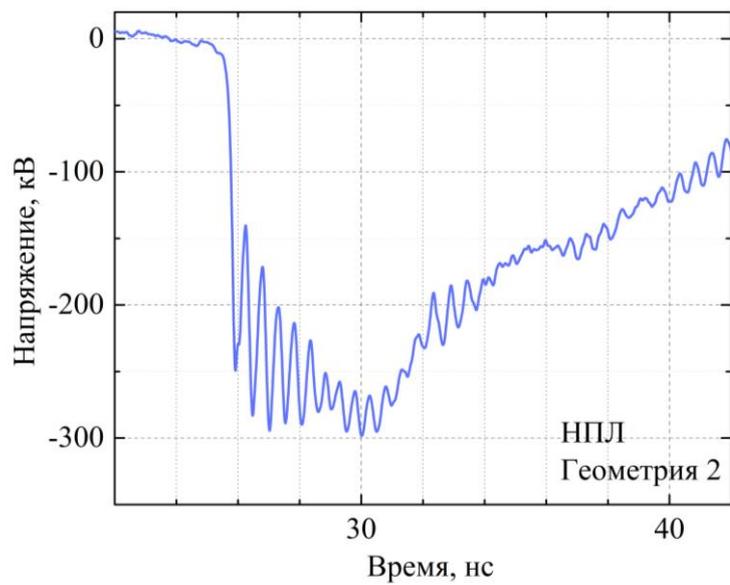


Рисунок 6.3. Осциллограмм напряжения на выходе НПЛ (геометрия 2).

Зависимость амплитуды первого колебания от напряжения падающего импульса представлена на рисунке 6.4.

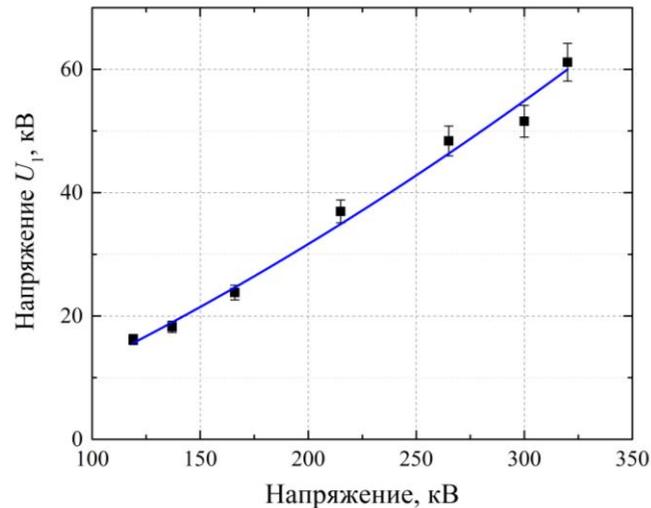


Рисунок 6.4. Зависимость амплитуды первого колебания от величины импульса падающего напряжения в ГНПЛ1.

Гофрированная нелинейная передающая линия №2

Эксперименты с ГНПЛ2 проводились по схеме проведения эксперимента №1 (приложение 2), в экспериментах использовался генератор СИНУС-160, позволявший получать в передающей линии с волновым сопротивлением 22 Ом импульсы напряжения амплитудой от 20 до 100 кВ длительностью 6 нс на полувисоте. Форма импульса напряжения типична для генераторов СИНУС и аналогична импульсу, представленному на рисунке 6.1. Длительность фронта 2.3 нс по уровню 0.1–0.9. Такой фронт является слишком длинным для возбуждения колебаний в линии на частоте выше 2 ГГц. Для обострения фронта использовалась секция обострения на основе НПЛ с ненасыщенным ферритом, которая обеспечивала участок быстрого нарастания импульса напряжения в 500 пс.

Форма импульса напряжения на выходе ГНПЛ2 для падающего импульса напряжения 90 кВ представлена на рисунке 6.5. Осциллограммы для гофрированной линии данной геометрии были получены с использованием цифрового осциллографа Tektronix MSO64 (6 GHz 25 GS/s). Центральная частота

колебаний импульса 2.7 ГГц, максимальная пиковая мощность 68 МВт. Доля энергии видеоимпульса, преобразованная в энергию СВЧ-импульса, составляет 4.5%. Длительность высокочастотного импульса 6 нс. Ранее в НПЛ с ферритом максимальная длительность генерируемого импульса на частоте выше 2 ГГц составляла не более 3 нс, как это уже отмечалось в главе 1.

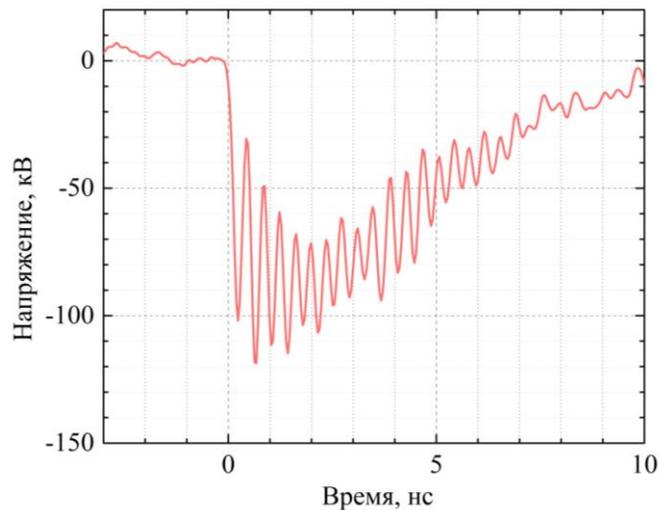


Рисунок 6.5. Импульс напряжения на выходе ГНПЛ2.

Конструкция экспериментальной установки позволяла уменьшить длину линии передачи кратно 20 ячейкам. На рисунке 6.6 представлены осциллограммы для ГНПЛ2 из 20 и 40 ячеек. Данные осциллограммы получены для одинаковой формы сигнала падающего импульса напряжения. На осциллограммах виден процесс формирования ударного фронта (обострения фронта импульса по мере распространения по ГНПЛ), и, после того как сформировался крутой перепад импульса напряжения, наблюдается процесс возбуждения высокочастотных колебаний.

Из осциллограмм видно, что обострение фронта происходит не на всей его амплитуде, как следствие высокочастотные колебания возбуждались с меньшей эффективностью, чем в случае, когда фронт импульса был бы обострен на полной амплитуде импульса напряжения. Это связано с формой импульса, формируемого на нагрузке генератором типа СИНУС. В ходе работы качество фронта, падающего на ГНПЛ, улучшить не удалось.

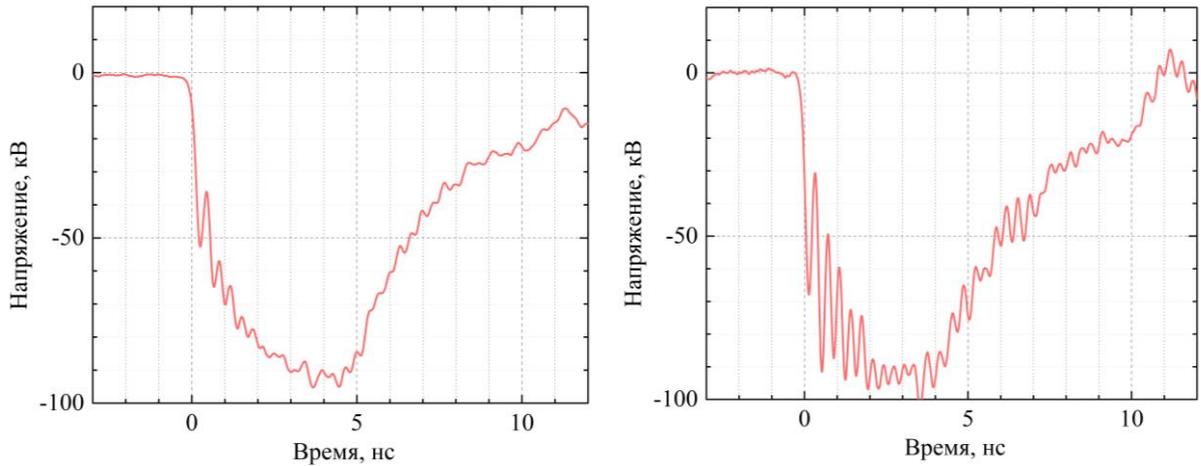


Рисунок 6.6. Осциллограммы на выходе ГНПЛ2 из 20 (слева) и 40 ячеек (справа).

Зависимость амплитуды первого колебания от величины падающего импульса напряжения представлена на рисунке 6.7.

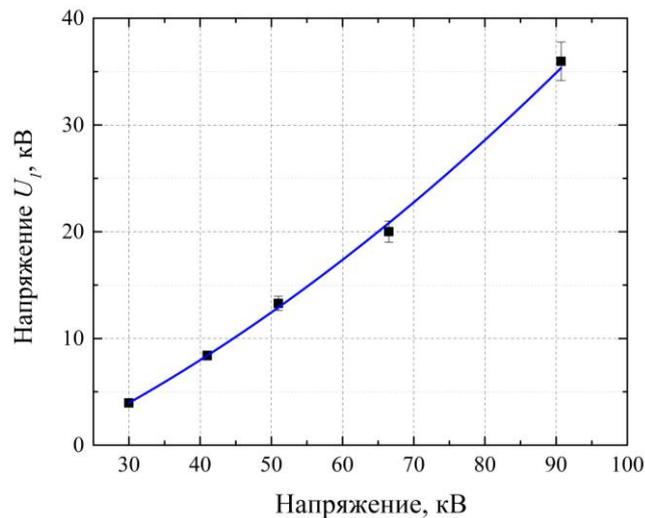


Рисунок 6.7. Зависимость амплитуды первого колебания от величины импульса падающего напряжения в ГНПЛ2.

Гофрированная нелинейная передающая линия №3

Эксперименты с ГНПЛ3 проводились по схеме проведения эксперимента №1 (приложение 2), в экспериментах использовался генератор СИНУС-300, позволявший получать на в передающей линии с волновым сопротивлением 20 Ом импульсы напряжения амплитудой от 150 до 360 кВ длительностью 13 нс

по полувысоте. Фронт импульса напряжения на выходе генератора составлял 3 нс по уровню 0.1–0.9. Для уменьшения длительности фронта импульса напряжения использовалась секция обострения на основе НПЛ с однородным заполнением ферритом с поперечными размерами 45x28 мм во внешнем аксиальном магнитном поле величиной до 12 кА/м. Секция укорачивала фронт импульса напряжения до 900 пс по уровню 0.1–0.9.

На рисунке 6.8 представлена осциллограмма импульса на выходе ГНПЛЗ при амплитуде падающего импульса 360 кВ. Длительность высокочастотного импульса составляет 12 нс с центральной частотой колебаний 1.45 ГГц и пиковой мощностью 800 МВт. Эффективность преобразования энергии импульса напряжения в энергию высокочастотных колебаний составляет 2%. Низкая величина эффективности связана с тем, что длительность импульса напряжения избыточна для данной конфигурации линии.

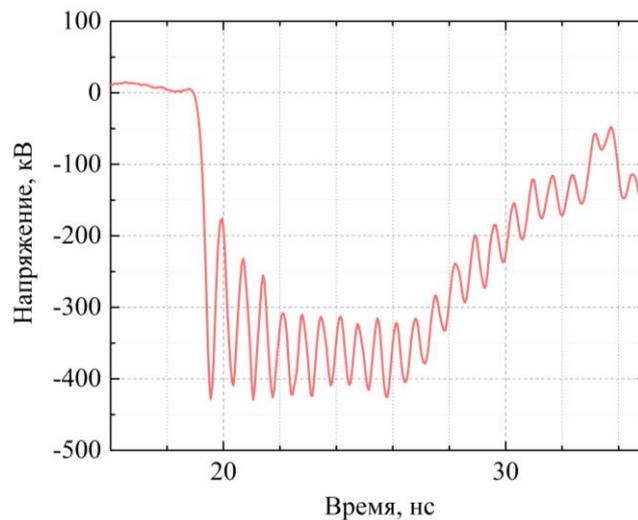


Рисунок 6.8. Импульс напряжения на выходе ГНПЛЗ.

Зависимость амплитуды первого колебания от напряжения падающего импульса представлена на рисунке 6.9.

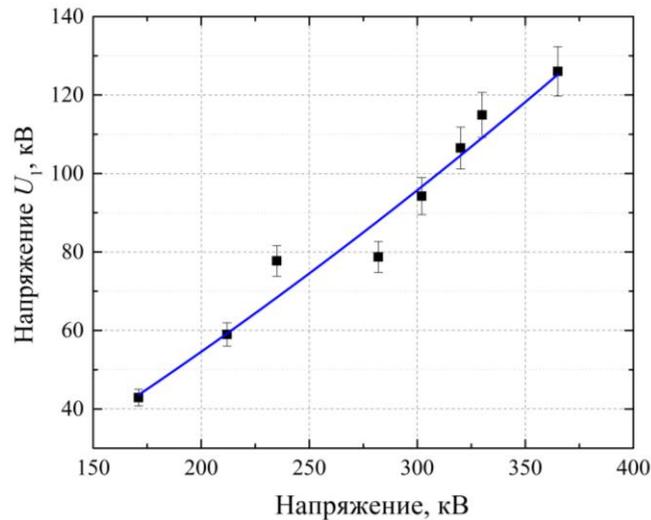


Рисунок 6.9. Зависимость амплитуды первого колебания от напряжения падающего импульса для ГНПЛЗ.

Гофрированная нелинейная передающая линия №4

Эксперименты с ГНПЛ4 проводились по схеме проведения эксперимента №1 (приложение 2). Использовался генератор СИНУС-300, позволявший получать на входе передающей линии с волновым сопротивлением 28 Ом импульсы напряжения с амплитудой от 150 до 300 кВ и длительностью 13 нс по полувысоте. Верхний предел напряжения определяется условиями электрического пробоя в линии. Фронт импульса напряжения на выходе генератора составлял 3 нс по уровню 0.1–0.9. Для обострения фронта импульса напряжения использовалась секция обострения на основе НПЛ с однородным заполнением ферритом с поперечными размерами 45x28 мм во внешнем аксиальном магнитном поле величиной до 12 кА/м, которая укорачивала фронт импульса напряжения до 900 пс по уровню 0.1–0.9.

На рисунке 6.10 представлена осциллограмма импульса напряжения на выходе ГНПЛ4 при амплитуде падающего импульса напряжения 300 кВ. Длительность высокочастотного импульса составляет 12 нс с центральной частотой колебаний 1.14 ГГц и пиковой мощностью 800 МВт. Эффективность преобразования энергии импульса напряжения в энергию высокочастотных колебаний составляет 5%. Величина эффективности для этой линии может быть увеличена при

использовании более короткого падающего импульса напряжения. Зависимость амплитуды первого колебания от величины падающего импульса напряжения представлена на рисунке 6.11.

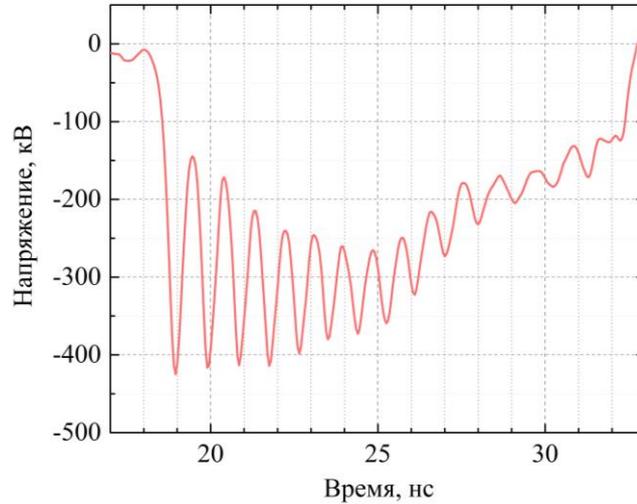


Рисунок 6.10. Импульс напряжения на выходе ГНПЛ4.

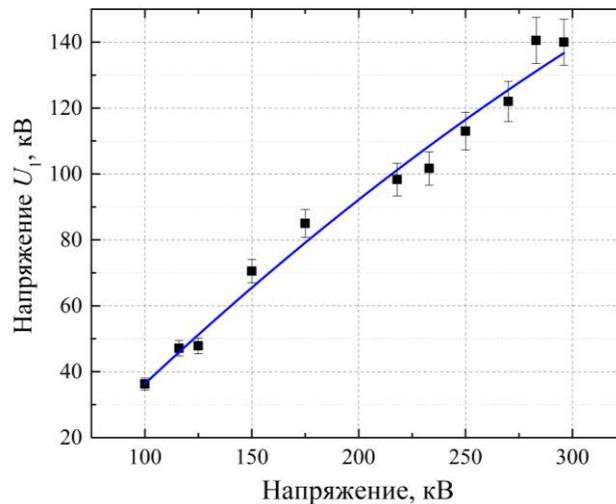


Рисунок 6.11. Зависимость амплитуды первого колебания от напряжения падающего импульса в ГНПЛ4.

Гофрированная нелинейная передающая линия №5

Эксперименты с ГНПЛ5 проводились по схеме проведения эксперимента №1 (приложение 2). Использовался генератор СИНУС-300, позволявший получать на входе передающей линии с волновым сопротивлением 28 Ом импульсы

напряжения с амплитудой от 140 до 350 кВ и длительностью 13 нс по полувысоте. Верхний предел напряжения определяется условиями электрического пробоя в линии. Фронт импульса напряжения на выходе генератора составлял 3 нс по уровню 0.1–0.9. Для обострения фронта импульса напряжения использовалась секция обострения на основе НПЛ с однородным заполнением ферритом с поперечными размерами 45x28 мм во внешнем аксиальном магнитном поле величиной до 12 кА/м, которая укорачивала фронт импульса напряжения до 900 пс по уровню 0.1–0.9.

На рисунке 6.12 представлена осциллограмма импульса напряжения на выходе ГНПЛ5 при амплитуде падающего импульса напряжения 350 кВ. Длительность высокочастотного импульса составляет 9 нс с центральной частотой колебаний 1.7 ГГц и пиковой мощностью 350 МВт. Низкая эффективность линии связана с тем, что фронт падающего импульса был слишком длинный для возбуждения колебаний на частоте 1.7 ГГц, оценочным оптимальным фронтом для максимально эффективной генерации является фронт 500 пс. Получение такого фронта при подобных величинах напряжения импульсов является нетривиальной задачей, которая не решалась в рамках данной работы. Поскольку суммарная длина феррита в линии составляла 0.6 м, значительная часть ГНПЛ работала в режиме обострения фронта импульса напряжения. Увеличение суммарной длины линии в эксперименте было затруднительно главным образом из-за габаритов экспериментальной установки. Зависимость амплитуды первого колебания от величины падающего импульса напряжения представлена на рисунке 6.13.

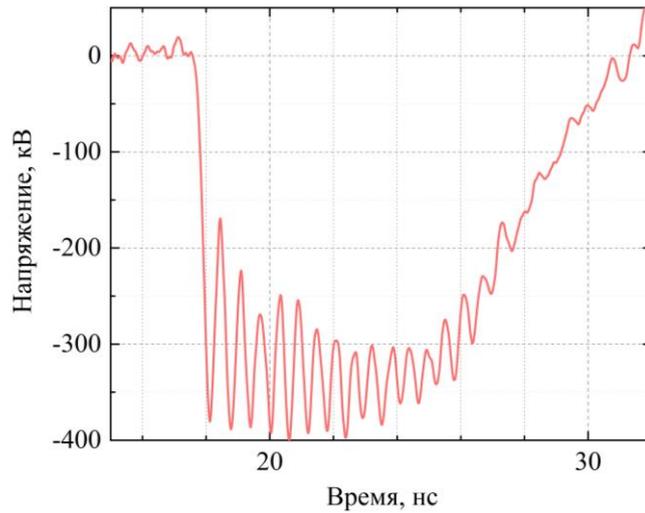


Рисунок 6.12. Импульс напряжения на выходе ГНПЛ5.

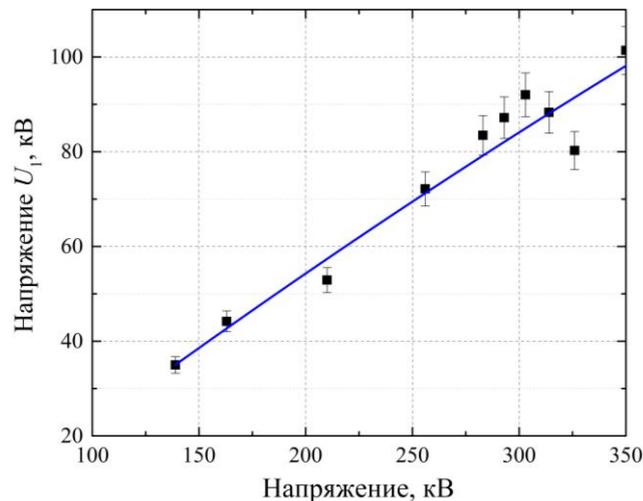


Рисунок 6.13. Зависимость амплитуды первого колебания от напряжения падающего импульса в ГНПЛ5.

Гофрированная нелинейная передающая линия №6

Эксперименты с ГНПЛ6 проводились по схеме проведения эксперимента №1 (приложение 2). Использовался генератор СИНУС-200, позволявший получать на в передающей линии с волновым сопротивлением 28 Ом импульсы напряжения с амплитудой от 60 до 190 кВ и длительностью 8.5 нс по полувысоте. Верхний предел амплитуды падающего импульса напряжения определяется условиями

электрического пробоя в линии. Фронт импульса напряжения на выходе генератора составлял 4 нс по уровню 0.1–0.9. Для обострения фронта импульса напряжения использовалась секция обострения на основе НПЛ с однородным заполнением ферритом с поперечными размерами 45x28 мм во внешнем аксиальном магнитном поле величиной до 12 кА/м, которая укорачивала фронт импульса напряжения до 1.2 пс по уровню 0.1–0.9.

На рисунке 6.14 представлена осциллограмма импульса напряжения на выходе ГНПЛ6 при амплитуде падающего импульса напряжения 188 кВ. Длительность высокочастотного импульса составляет 4 нс с центральной частотой колебаний 3.6 ГГц и пиковой мощностью 170 МВт. Низкая эффективность линии связана с тем, что фронт падающего импульса был слишком длинный для возбуждения колебаний на частоте 3.6 ГГц. Поскольку суммарная длина феррита в линии составляла 0.6 м, значительная часть ГНПЛ работала в режиме обострения фронта. Зависимость амплитуды первого колебания от величины падающего импульса напряжения представлена на рисунке 6.15.

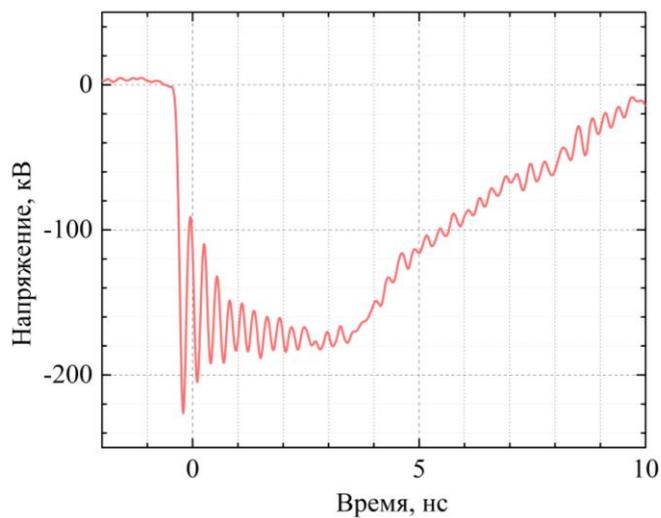


Рисунок 6.14. Импульс напряжения на выходе ГНПЛ6.

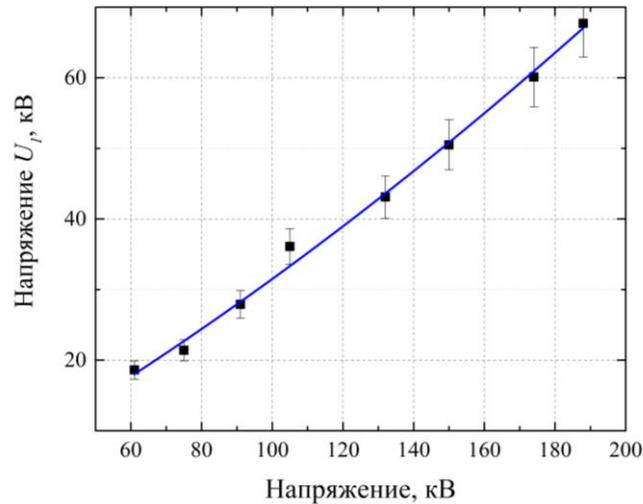


Рисунок 6.15. Зависимость амплитуды первого колебания от напряжения падающего импульса в ГНПЛ6.

6.3. Спектральные характеристики импульсов, генерируемых в нелинейных передающих линиях с гофрированным внутренним проводником

Для шести геометрий ГНПЛ в экспериментах были получены зависимости центральной частоты колебаний высокочастотных импульсов от величины падающего импульса напряжения. Частота определялась из спектра импульса напряжения на выходе НПЛ, полученного с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье.

Гофрированная нелинейная передающая линия №1

На рисунке 6.16 представлена зависимость центральной частоты колебаний в ГНПЛ1 от амплитуды падающего импульса напряжения. Видно, что начиная с 260 кВ частота колебаний растет слабо. Во всех конфигурациях линий наблюдается стремление частоты к некоторой постоянной величине при больших напряжениях. Ширина спектра высокочастотного импульса при амплитуде напряжения падающего импульса 300 кВ составляет $\delta f = 0.19$ ГГц по уровню -10 дБ.

Величина усредненного по радиусу азимутального магнитного поля внутри ферритового кольца может быть оценена как $H_\theta = 0.35U_0$, где U_0 – напряжение падающей волны в вольтах. Для падающего импульса амплитудой 300 кВ усредненное азимутальное магнитное поле в феррите составляет 106 кА/м.

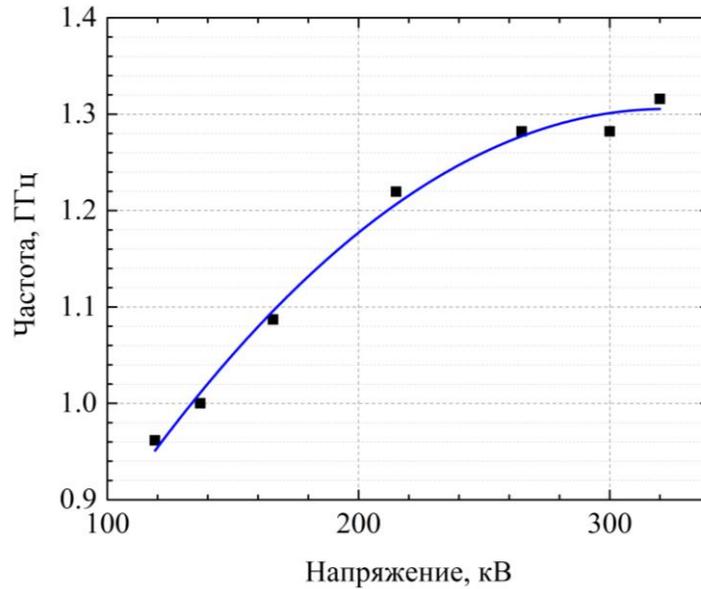


Рисунок 6.16. Зависимость центральной частоты колебаний в ГНПЛ1 от амплитуды падающего импульса напряжения.

Гофрированная нелинейная передающая линия №2

На рисунке 6.17 зависимость центральной частоты колебаний в ГНПЛ2 от амплитуды падающего импульса напряжения. Ширина спектра высокочастотного импульса при амплитуде напряжения падающего импульса 90 кВ составляет $\delta f = 0.19$ ГГц по уровню -10 дБ.

Величина азимутального магнитного поля внутри ферритового кольца на его среднем радиусе может быть оценена как $H_\theta = 1.6U_0$, где U_0 – напряжение падающей волны, выраженное в вольтах. Для падающего импульса амплитудой 90 кВ усредненное азимутальное магнитное поле в феррите составляет 160 кА/м.

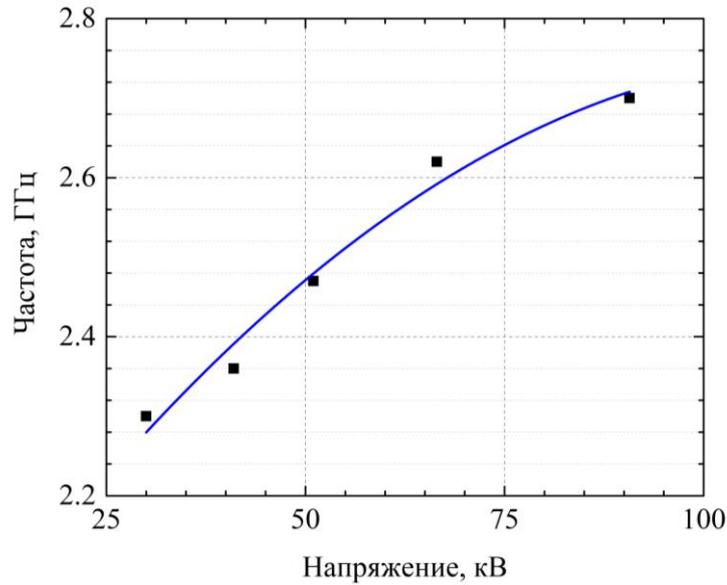


Рисунок 6.17. Зависимость центральной частоты колебаний в ГНПЛ2 от амплитуды падающего импульса напряжения.

Гофрированная нелинейная передающая линия №3

На рисунке 6.18 зависимость центральной частоты колебаний в ГНПЛ3 от амплитуды падающего импульса напряжения. Ширина спектра высокочастотного импульса при амплитуде напряжения падающего импульса 360 кВ составляет $\delta f = 0.1$ ГГц по уровню -10 дБ.

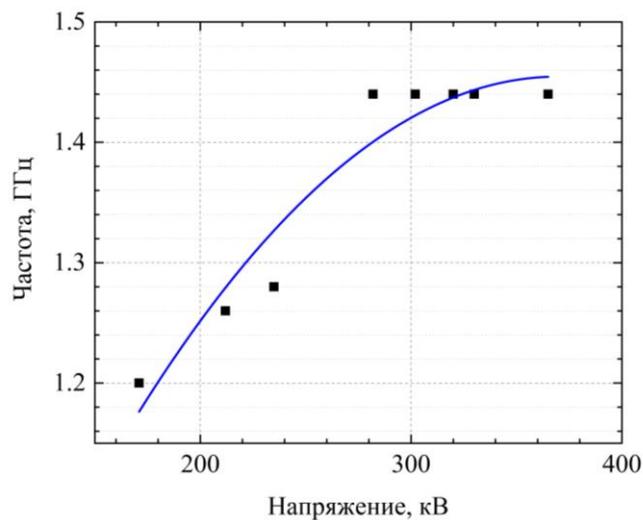


Рисунок 6.18. Зависимость центральной частоты колебаний в ГНПЛ3 от амплитуды падающего импульса напряжения.

Величина азимутального магнитного поля внутри ферритового кольца на его среднем радиусе может быть оценена как $H_\theta = 0.56U_0$, где U_0 – напряжение падающей волны, выраженное в вольтах. Для падающего импульса амплитудой 300 кВ усредненное азимутальное магнитное поле в феррите составляет 167 кА/м.

Гофрированная нелинейная передающая линия №4

На рисунке 6.19 зависимость центральной частоты колебаний в ГНПЛ4 от амплитуды падающего импульса напряжения. Ширина спектра высокочастотного импульса при амплитуде напряжения падающего импульса 296 кВ составляет $\delta f = 0.18$ ГГц по уровню -10 дБ.

Величина азимутального магнитного поля внутри ферритового кольца на его среднем радиусе может быть оценена как $H_\theta = 0.32U_0$, где U_0 – напряжение падающей волны, выраженное в вольтах. Для падающего импульса амплитудой 296 кВ усредненное азимутальное магнитное поле в феррите составляет 94.5 кА/м.

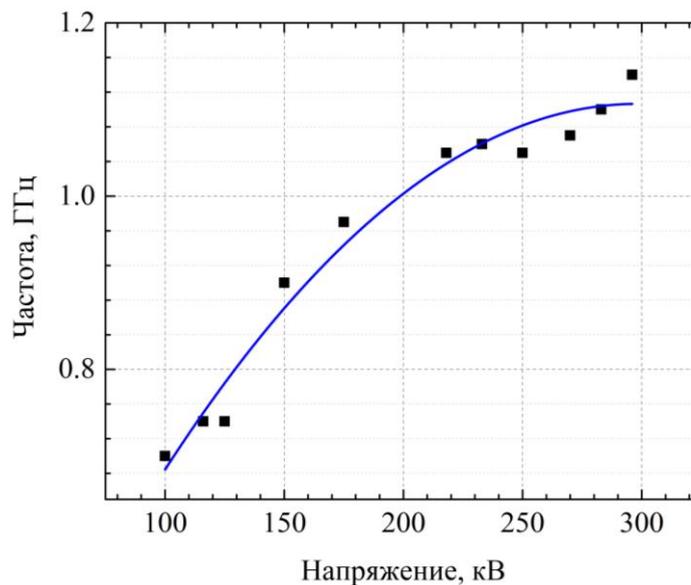


Рисунок 6.19. Зависимость центральной частоты колебаний в ГНПЛ4 от амплитуды падающего импульса напряжения.

Гофрированная нелинейная передающая линия №5

На рисунке 6.20 зависимость центральной частоты колебаний в ГНПЛ5 от амплитуды падающего импульса напряжения. Ширина спектра высокочастотного импульса при амплитуде напряжения падающего импульса 350 кВ составляет $\delta f = 0.27$ ГГц по уровню -10 дБ.

Величина азимутального магнитного поля внутри ферритового кольца на его среднем радиусе может быть оценена как $H_\theta = 0.44U_0$, где U_0 – напряжение падающей волны, выраженное в вольтах. Для падающего импульса амплитудой 350 кВ усредненное азимутальное магнитное поле в феррите составляет 153 кА/м.

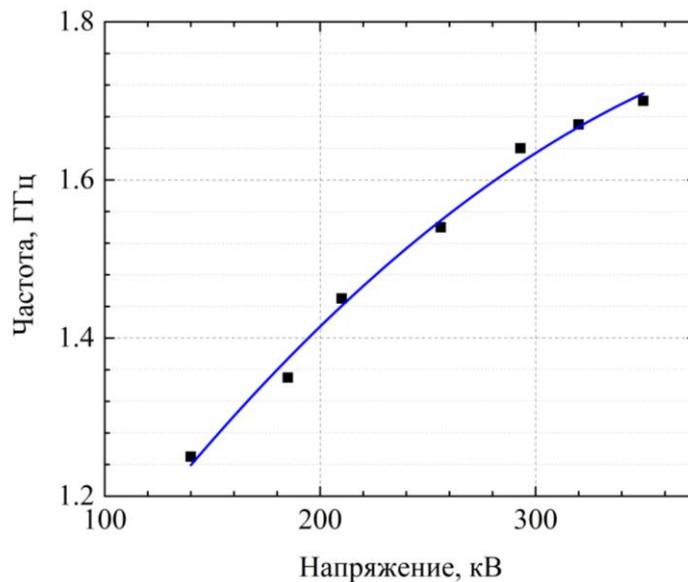


Рисунок 6.20. Зависимость центральной частоты колебаний в ГНПЛ5 от амплитуды падающего импульса напряжения.

Гофрированная нелинейная передающая линия №6

На рисунке 6.21 зависимость центральной частоты колебаний в ГНПЛ6 от амплитуды падающего импульса напряжения. Ширина спектра высокочастотного импульса при амплитуде напряжения падающего импульса 188 кВ составляет $\delta f = 0.13$ ГГц по уровню -10 дБ.

Величина азимутального магнитного поля внутри ферритового кольца на его среднем радиусе может быть оценена как $H_\theta = 1,42U_0$, где U_0 – напряжение падающей волны, выраженное в вольтах. Для падающего импульса амплитудой 188 кВ усредненное азимутальное магнитное поле в феррите составляет 260 кА/м.

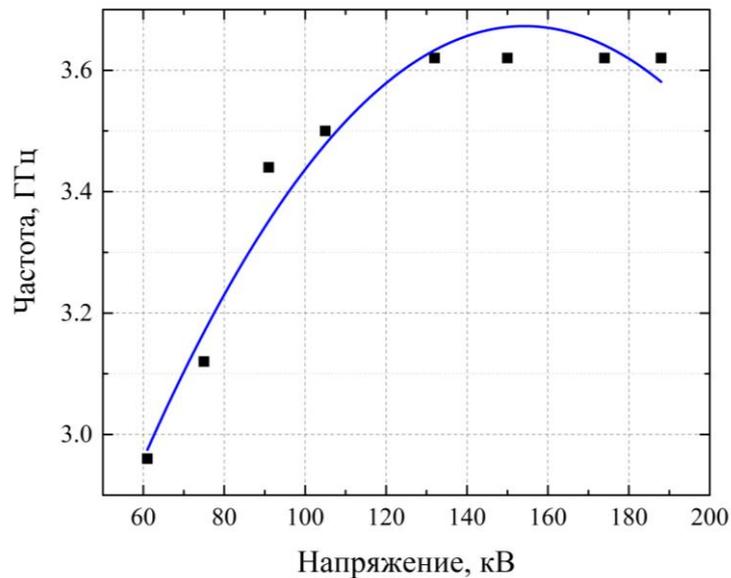


Рисунок 6.21. Зависимость центральной частоты колебаний в ГНПЛ6 от амплитуды падающего импульса напряжения.

6.4. Генерирование СВЧ-импульсов в гофрированных нелинейных передающих линиях с использованием ферритов различных марок

Для гофрированной НПЛ №2 была проведена серия экспериментов, в которой для генерации высокочастотных импульсов использовались ферриты различных марок. Марки и характеристики использованных ферритовых колец размерами 12х6х4.5 мм представлены в таблице 6.2. Феррошпинели марки 1СЧ32 предназначены для использования в СВЧ-устройствах, для них в паспорте не указываются значения начальной магнитной проницаемости и коэрцитивной силы. Для колец марки 1СЧ32 производитель указывает диэлектрическую проницаемость и тангенс угла потерь, на частоте 10 ГГц, $\epsilon = 13.5$, $tg\delta = 5 \cdot 10^{-4}$. Три другие марки ферритов, хотя и не предназначены для

использования в СВЧ-диапазоне, хорошо показали себя при использовании в НПЛ для генерации высокочастотных импульсов.

Таблица 6.2. Характеристики ферритовых колец

Марка	$\mu_{нач}$	M_s , Тл	H_c , А/м
55ВНП	55	0.35	410
200ВНП	200	0.4	80
50ВН	50	0.3	360
1СЧ32	-	0.5	-

В экспериментах наиболее эффективным оказались ферриты марок 200ВНП и 1СЧ32. Сравнение осциллограмм на выходе ГНПЛ2 для этих марок ферритов представлено на рисунке 6.22 для амплитуды падающего импульса напряжения 90 кВ. Видно, что эффективность преобразования энергии импульса напряжения выше для колец марки 1СЧ32. Сравнение энергетической эффективности для всех ферритовых колец представлено в таблице 6.3 для падающего импульса напряжения амплитудой 90 кВ.

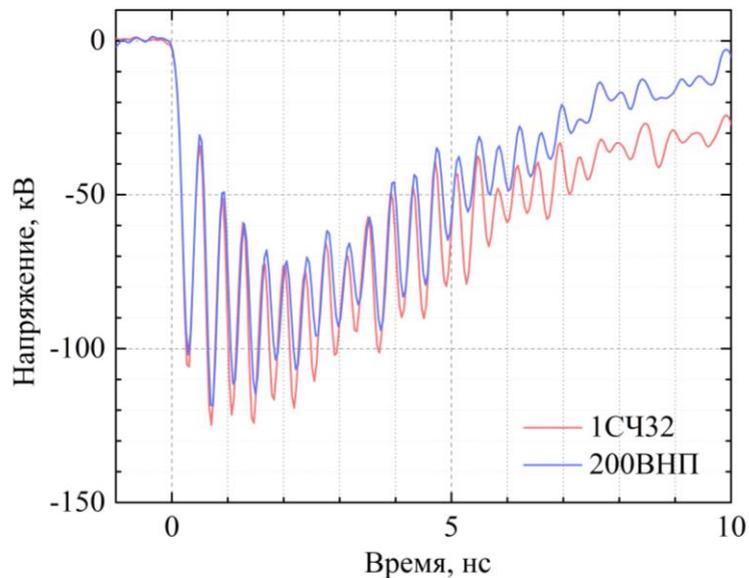


Рисунок 6.22. Осциллограммы на выходе ГНПЛ2 для марок ферритовых колец 200ВНП и 1СЧ32.

Таблица 6.3. Сравнение эффективности различных марок ферритовых колец

Марка феррита	Центральная частота колебаний, ГГц	Пиковая мощность, МВт	Энергетическая эффективность, %
55ВНП	2.8	58.5	2.5
200ВНП	2.7	68	4.5
50ВН	2.85	53.5	2
1СЧ32	2.7	70.5	6

Результаты экспериментов показали, что малые диэлектрические потери в кольцах 1СЧ32 не приводят к значительному росту пиковой мощности СВЧ-импульса, но сильно влияют на энергетическую эффективность, которая на 30% выше, чем у колец 200ВНП. При этом максимальная пиковая мощность заметно выше у ферритов с остаточной намагниченностью $M_s \geq 0.4$ Тл.

6.5. Зависимость характеристик генерируемых импульсов от аксиального магнитного поля внутри феррита

Для экспериментального исследования влияния аксиального магнитного поля на характеристики генерируемых импульсов использовалась укороченная до 75 ячеек ГНПЛЗ, которая была помещена в соленоид диаметром 80 мм и длиной 1.5 м. Рабочий диапазон тока соленоида от 0 до 6.5 А. Поле на его оси при токе 1 ампер составляет 10.4 кА/м. Представленные зависимости получены для падающего импульса напряжения амплитудой 320 кВ в схеме проведения эксперимента №1.

На рисунке 6.23 представлена зависимость амплитуды первого колебания в импульсе на выходе ГНПЛЗ от величины аксиального магнитного поля, создаваемого соленоидом. Отрицательная величина поля соответствует тому, что поле направлено противоположно полю постоянных магнитов, за счёт чего уменьшается аксиальная компонента напряженности магнитного поля внутри феррита. Как видно из зависимости, при включении поля соленоида пиковая

мощность высокочастотных колебаний начинает падать. В случае, когда поле соленоида ослабляет поле постоянных магнитов, мощность спадает заметно быстрее. Это в первую очередь связано с тем, что в этом случае феррит переходит из полностью насыщенного состояния в состояние, когда лишь часть его объема насыщена вследствие неоднородности магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами. При этом, при вычислении энергии СВЧ-импульса нужно учитывать его длительность. Зависимость длительности генерируемого импульса от аксиального магнитного поля представлена на рисунке 6.24. В случае сложения полей соленоида и постоянных магнитов длительность импульса начинает падать, и, напротив, в случае вычитания полей при поле соленоида выше 45 кА/м длительность импульса увеличивается. Данный факт согласуется с результатами, полученными в работах [53, 54], где рассматривается гофрированная НПЛ с соленоидом. В этих работах демонстрируется уменьшение длительность генерируемого импульса и одновременный рост пиковой мощности колебаний с увеличением внешнего поля подмагничивания.

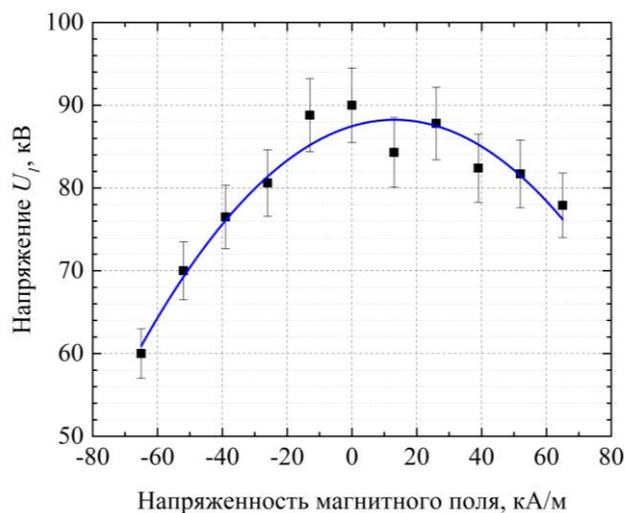


Рисунок 6.23. Зависимость амплитуды первого колебания от напряженности аксиального магнитного поля, создаваемого соленоидом.

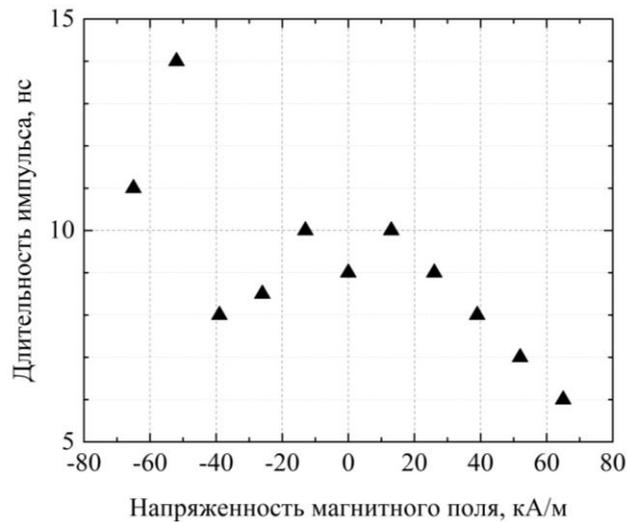


Рисунок 6.24. Зависимость длительности СВЧ-импульса от напряженности аксиального магнитного поля, создаваемого соленоидом.

Зависимость частоты генерируемых импульсов от аксиального поля, полученная в экспериментах, представлена на рисунке 6.25. Она также хорошо согласуется с данными из работ [53, 54] и результатами численного моделирования (глава 5).

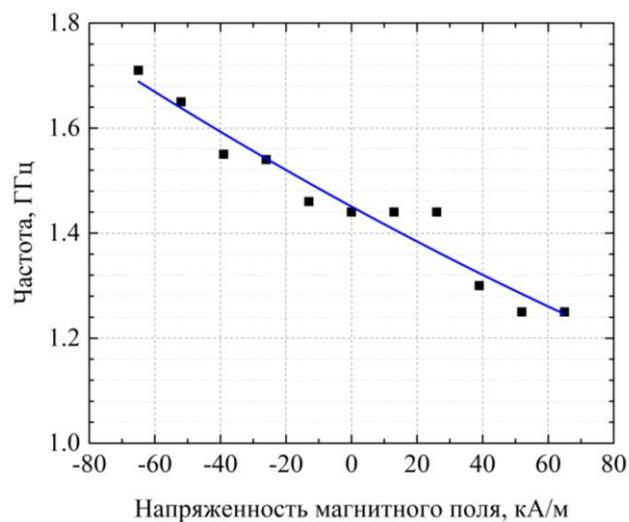


Рисунок 6.25. Зависимость центральной частоты колебаний от напряженности аксиального магнитного поля, создаваемого соленоидом.

6.6. Нелинейная передающая линия с гофрированным внутренним проводником и ферритовым кольцами, насыщаемыми полем внешнего соленоида

Было проведено экспериментальное исследование процесса возбуждения колебаний в ГНПЛ1, в которой отсутствовали постоянные магниты, а ферритовые кольца насыщались в поле соленоида. Диаметр соленоида составлял 59 мм, длина 1.2 м. Рабочий диапазон тока в соленоиде составлял от 0 до 12 А, напряженность магнитного поля на оси соленоида при токе 1 А составляет 8 кА/м.

Ниже представлены осциллограммы на выходе ГНПЛ1 для различных величин поля соленоида при амплитуде падающего импульса напряжения 295 кВ.

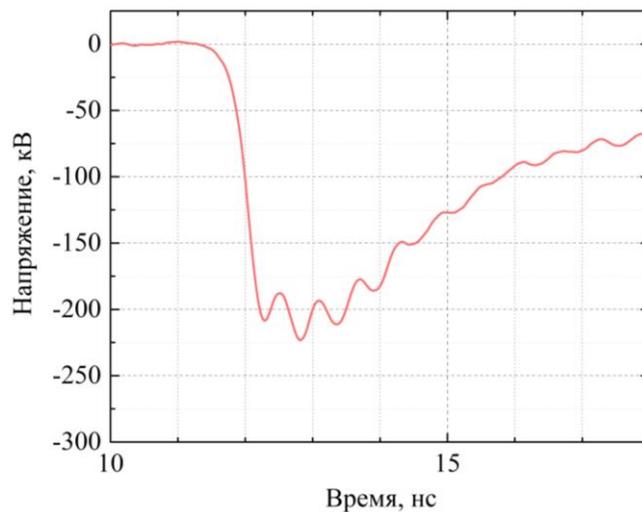


Рисунок 6.26. Осциллограмма напряжения на выходе ГНПЛ1 без поля подмагничивания.

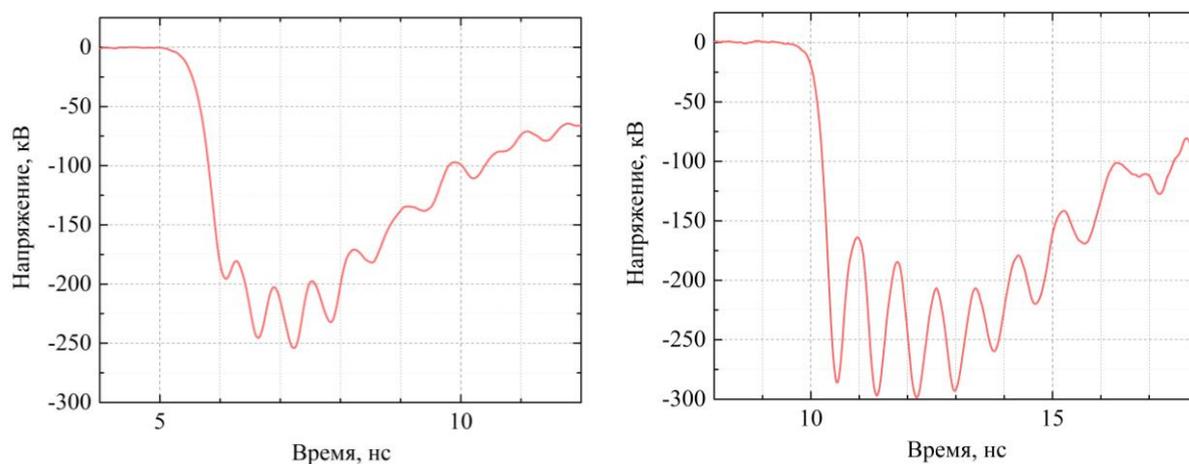


Рисунок 6.27. Осциллограмма напряжения на выходе ГНПЛ1 при поле подмагничивания 48 кА/м (слева) и 96 кА/м (справа).

Эксперимент показал, что малая высокочастотная модуляция наблюдается даже в отсутствие поля подмагничивания. При этом амплитуда постоянной составляющей выходного импульса напряжения заметно ниже, чем амплитуда падающего импульса. По мере увеличения поля подмагничивания эффективность генерации возрастает, достигая максимума при 96 кА/м. В этом случае амплитуда первого колебания составляет 61.1 кВ. Максимальная амплитуда первого колебания в ГНПЛ1 с постоянными магнитами составляет 61.3 кВ для напряжения падающего импульса 300 кВ. Центральная частота колебаний в случае насыщения ферритов соленоидом составляет 1.22 ГГц, в случае постоянных магнитов 1.32 ГГц. Разница в частоте вызвана тем, что при максимальной эффективности генерации в НПЛ с соленоидом напряженность магнитного поля в феррите выше, чем в случае использования постоянных магнитов. Зависимость центральной частоты колебаний от аксиального поля, создаваемого соленоидом, представлена на рисунке 6.28.

Для данной конфигурации гофрированного внутреннего проводника характерен рост длительности высокочастотного импульса с увеличением подмагничивающего поля. Это связано с тем, что в силу размагничивающего фактора ферритовых колец, насыщение феррита наблюдалось ближе к верхнему пределу магнитного поля в данном эксперименте.

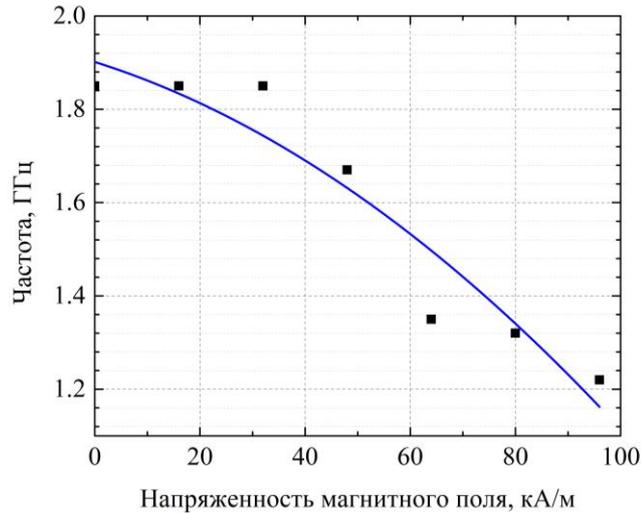


Рисунок 6.28. Зависимость центральной частоты колебаний от напряженности аксиального магнитного поля.

6.7. Основные выводы к главе 6

Представлены результаты экспериментального исследования шести конфигураций нелинейных передающих линий с гофрированным внутренним проводником и ферритом, насыщенным в поле постоянных магнитов. Конфигурации охватывают частотный диапазон генерируемых высокочастотных импульсов от 0.7 до 3.7 ГГц. Пиковая мощность СВЧ-импульсов составляет сотни мегаватт. Эффективность преобразования энергии видеоимпульса в радиоимпульс для всех линий в представленных экспериментальных условиях составляла 2-6%.

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

При увеличении аксиального магнитного поля внутри ферритового кольца наблюдается уменьшение частоты генерации и одновременное уменьшение длины генерируемого импульса. С уменьшением аксиального поля внутри феррита частота генерируемого импульса растет. В слабых магнитных полях внутри феррита наблюдается увеличение длительности генерируемого импульса.

Заключение

Представлены результаты исследования процесса генерации мощных наносекундных высокочастотных импульсов с использованием передающих линий с насыщенным ферритом. Рассмотрены две конфигурации – линии с однородным ферритовым заполнением и линии с гофрированным внутренним проводником и периодическим расположением колец из ферритов и постоянных магнитов.

Для линий с однородным ферритовым заполнением были определены особенности конструкции и условия, при которых наблюдается максимальная эффективность генерации импульсов СВЧ-излучения. Для них частота возбуждаемых колебаний имеет зависимость от поперечных размеров линии, которая обуславливается дисперсионными свойствами волны E_{00} . Формирование колебаний в линии с насыщенным ферритом происходит при одновременном обострении фронта импульса напряжения и дисперсионном разбеге гармоник фронта волны E_{00} .

Впервые была продемонстрирована возможность эффективной генерации мощных высокочастотных импульсов в линии с гофрированным проводником и ферритом, насыщенным в поле колец из постоянных магнитов. На основе шести конфигураций линий была продемонстрирована генерация импульсов СВЧ-излучения в диапазоне частот от 0.7 до 3.6 ГГц с пиковой мощностью в сотни мегаватт. Максимальная мощность, полученная в эксперименте, составляет 800 МВт. Линии с гофрированным внутренним проводником и насыщенным ферритом, также как и линии с однородным заполнением, обладают зависимостью частоты генерации от поперечных размеров. В случае гофрированного внутреннего проводника это определяется дисперсионными свойствами, аналогичными дисперсионным свойствам искусственной линии передачи с емкостной связью между соседними ячейками.

В заключении, автор выражает благодарность научному руководителю д.ф.-м.н. Илье Викторовичу Романченко за постоянное участие и поддержку. Также автор признателен сотрудникам ИСЭ СО РАН за внимание к работе и помощь при ее выполнении: И.В. Пегель, А.И. Климов, В.В. Ростов, С.Н. Мальцев, Р.К. Собянин, В.Ю. Конев, О.О. Мутылин, В.О. Кутенков, О.Б. Ковальчук, П.В. Выходцев, А.Н. Синяков.

Приложение 1

Измерение диэлектрической проницаемости ферритовых колец

Ферриты марки ВМП, традиционно используемые для генерации высокочастотных импульсов в ГНПЛ, предназначены для работы в управляемых дросселях для перестройки частоты. Диэлектрическая проницаемость ферритов марки ВМП не контролируется производителем и не указывается в их паспорте. Статическая диэлектрическая проницаемость СВЧ ферритов также не дается в паспорте изделий. Представляет интерес определение статической диэлектрической проницаемости как ВМП ферритов, так и СВЧ ферритов, использованных в диссертационной работе, для проведения более точных оценок и моделирования.

Статическая диэлектрическая проницаемость ферритов измерялась посредством измерения емкости конденсатора, диэлектрическим заполнением которого является сам феррит. Использовался цилиндрический конденсатор. Внутренняя обкладка была выполнена в виде дюралевого стержня нужного диаметра, внешняя обкладка представляла собой латунную фольгу, обернутую вокруг ферритовых колец. Пример одной из сборок цилиндрического конденсатора представлен на рисунке 7.1. Длины конденсаторов подобраны таким образом, что краевые эффекты не влияли на измерения. Из-за невысокой точности в изготовлении колец и разброса их размеров, между обкладками конденсатора и ферритом остаются воздушные зазоры (рисунок 5.2). Эти зазоры могут быть учтены, если рассматривать конденсатор с трехслойным заполнением, как три

последовательно включенных конденсатора: два с воздушным заполнением, один с заполнением из феррита. Зная все геометрические размеры и измерив емкость изготовленного конденсатора, можно вычислить диэлектрическую проницаемость феррита ε .



Рисунок 7.1. Внешний вид сборки цилиндрического конденсатора с ферритовыми кольцами.



Рисунок 7.2. Схема структуры цилиндрического конденсатора с воздушными зазорами между ферритом и обкладками.

Емкость цилиндрического конденсатора может быть вычислена по формуле

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon l}{\ln(r_2 / r_1)} \quad (7.1)$$

ε_0 – электрическая постоянная, l – длина конденсатора, r_2 – внешний радиус, r_1 – внутренний радиус.

Результаты измерений для ферритовых колец марки 200ВНП размер 32x20 мм

Диаметр внутреннего электрода конденсатора 19.85 мм, внешний диаметр 32.3 мм. Кольца марки 200ВНП имеют небольшой разброс внешнего и внутреннего диаметров. Для проведения экспериментов из одной партии колец были отобраны наиболее близкие по своим размерам. Средний внутренний диаметр кольца 19.5 мм, средний внешний диаметр кольца 32.2 мм. Разброс размеров составлял менее ± 0.05 мм. Измерения проводились измерителем RLC Актаком АМ-3125. Частота тест-сигнала 100 кГц. Результаты измерений для трех длин конденсаторов представлены в таблице 7.1.

Таблица 7.1. Результаты измерений для колец 200ВНП 32x20мм

Длина (мм)	Емкость (нФ)	Диэлектрическая проницаемость ϵ
304	0.363	13.52
229	0.264	12.91
155	0.186	13.61

Усреднение результатов измерений для разных длин дает величину диэлектрической проницаемости $\epsilon=13.35$.

Результаты измерений для колец марок 200ВНП и 1СЧ размером 12x6 мм

Диаметр внутреннего электрода 5.75 мм, диаметр внешнего электрода 12 мм. Кольца марки 200ВНП имели средний внутренний диаметр 5.93 мм, средний внешний диаметр 11.90 мм. Разброс диаметров ± 0.5 мм. Кольца марки 1СЧ имели средний внутренний диаметр 6.03 мм, внешний диаметр 11.98 мм. Разброс диаметров ± 0.2 мм.

Таблица 7.2. Результаты измерений для колец 200ВНП 12х6 мм

Длина (мм)	Емкость (пФ)	Диэлектрическая проницаемость ϵ
214	123.2	12.85
152	87.3	12.8
98	55.5	12.5

Среднее значение диэлектрической проницаемости для колец 200ВНП 12х6 мм $\epsilon = 12.7$. Среднее значение диэлектрической проницаемости для колец 1СЧ 12х6 мм $\epsilon = 16.9$. Для справки: паспортная диэлектрическая проницаемость колец 1СЧ 12х6 мм $\epsilon = 13.5$ измеренная на частоте 10 ГГц.

Таблица 7.3. Результаты измерений для колец 1СЧ 12х6 мм

Длина (мм)	Емкость (пФ)	Диэлектрическая проницаемость ϵ
214	122.60	16.6
152	86.45	16.35
98	57.70	17.7

Приложение 2

Схемы и методики проведения экспериментов с нелинейными передающими линиями

Все эксперименты в данной диссертационной работе были выполнены и использованием двух схем проведения экспериментов. Их блок-схемы представлены на рисунках 7.3 и 7.4. Схема проведения эксперимента №1 представляет собой последовательное включение генератора наносекундных высоковольтных импульсов напряжения типа «СИНУС», измерительной передающей линии (ИПЛ) для измерения импульса напряжения на выходе

генератора, обостряющей нелинейной передающей линии (ОНПЛ), представляющей собой отрезок коаксиальной передающей линии с однородным заполнением ферритом длиной 30–50 см, помещенный во внешний соленоид, второй измерительной передающей линии для измерения формы импульса, в частности его фронта, после секции обострения. После второй секции измерительной линии располагается нелинейная передающая линия (НПЛ), исследуемая в данном эксперименте с соленоидом, если он был необходим. Затем располагается последняя измерительная линия и согласованная нагрузка. Схема проведения эксперимента №2 представляет собой последовательное включение генератора наносекундных высоковольтных импульсов напряжения типа «СИНУС», измерительной передающей линии (ИПЛ) для измерения импульса напряжения на выходе генератора. Далее располагается нелинейная передающая линия (НПЛ), исследуемая в данном эксперименте с соленоидом, если он был необходим. Затем располагается последняя измерительная передающая линия и согласованная нагрузка.

Все измерительные передающие линии обеспечивали достаточную временную развязку для корректной регистрации импульсов напряжения. Длина ИПЛ определялась длительностью импульса используемого генератора типа СИНУС. Волновое сопротивление всей экспериментальной схемы подбиралось из учета предполагаемого импеданса НПЛ.



Рисунок 7.3. Схема проведения эксперимента №1.

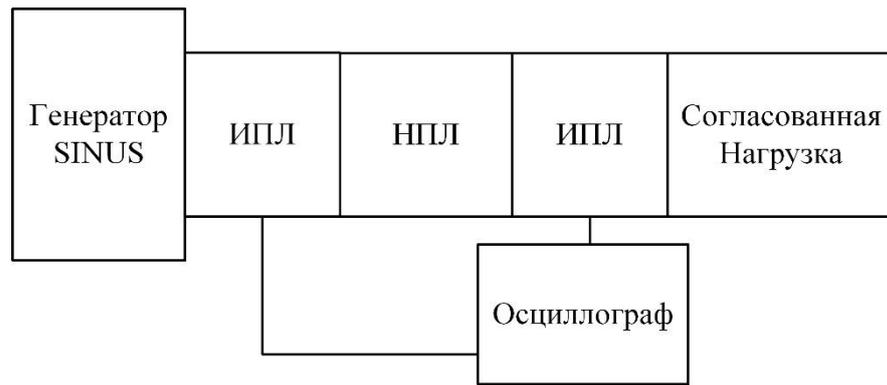


Рисунок 7.4. Схема проведения эксперимента №2.

Измерения проводились с помощью зондов (D-dot датчиков), расположенных на входе измерительных передающих линий, поскольку они позволяют корректно регистрировать быстро изменяющиеся во времени сигналы. Зонд представляет собой обрыв коаксиала измерительного тракта. Также зонд может рассматриваться как емкостный делитель напряжения, обладающий малой величиной емкости, по порядку величины 10 пФ. Сигнал на выходе зонда представляет собой производную высоковольтного сигнала, распространяющегося по измерительной линии передачи в соответствии с уравнением:

$$U_{\text{зонд}} = \rho C \frac{dU_{\text{ИПЛ}}}{dt}. \quad (7.2)$$

$U_{\text{зонд}}$ – сигнал, измеренный на зонде, $U_{\text{ИПЛ}}$ – сигнал, распространяющийся по измерительной передающей линии, ρ – волновое сопротивление тракта зонда равное 50 Ом, C – емкость между внутренними проводниками измерительной передающей линии и тракта зонда. Восстановление измеряемого сигнала происходит с помощью интегрирования сигнала зонда по следующей формуле:

$$U_{\text{ИПЛ}}(t) = \frac{1}{\rho C} \int_0^t U_{\text{зонд}}(t') dt'. \quad (7.3)$$

Постоянная интегрирования $\frac{1}{\rho C}$ может быть определена с использованием частотного анализатора цепей и, как правило, порядок ее величины составляет 10^{12} 1/с. В данной работе постоянная интегрирования определялась с использованием емкостных делителей напряжения, расположенных в одном поперечном сечении измерительной передающей линии с зондом. Для определения постоянной интегрирования проводилась одновременная регистрация импульса, распространяющегося по измерительной передающей линии зондом и предварительно откалиброванным делителем напряжения. Регистрируемый сигнал представлял собой видеоимпульс с длительностью фронта в 2–4 нс, что позволяло корректно проводить его измерение с использованием емкостных делителей. С использованием емкостного делителя определялась амплитуда импульса напряжения, распространяющегося по измерительной передающей линии. Постоянная интегрирования определялась как отношение амплитуды распространяющегося по ИПЛ импульса к амплитуде импульса, зарегистрированного зондом.

Список литературы

1. Benford, J. High power microwaves / J. Benford, J.A. Swegle, E. Schamiloglu. – CRC Press, 2015, -446.
2. Krile, J. Energy efficiency of high power microwave systems / J. Krile, M. Kristiansen // 2011 IEEE Pulsed Power Conference. – IEEE, 2011. DOI: 10.1109/PPC.2011.6191562.
3. Ashby, S. High peak and average power with an L-band relativistic magnetron on CLIA / S. Ashby [et al.] // IEEE Trans. Plasma Sci. – 1992. – Vol. 20, no. 3. – P. 344350. DOI: 10.1109/27.142835.
4. Dolan, J.E. Shock front development in ferrite-loaded coaxial lines with axial bias / J.E. Dolan, H.R. Bolton // IEE Proceedings – Science, Measurement and Technology. – 2000. – Vol. 147, Iss. 5. – P. 237-242. DOI: 10.1049/ip-smt:20000447.
5. Wilson, C.R. Pulse Sharpening in a Uniform LC Ladder Network Containing Nonlinear Ferroelectric Capacitors / C.R. Wilson, M.M. Turner, P.W. Smith // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1991. – Vol. 38, Iss. 4. – P. 767-771. DOI: 0.1109/16.75203.
6. Ikezi, H. Soliton generation at 10 MW level in the very high frequency band / H. Ikezi, J.S. DeGrassie, J. Drake // Appl. Phys. Lett. – 1991. – Vol.58, Iss. 9. – P. 986-987. DOI: 10.1063/1.104464.
7. French, D.M. Dielectric Nonlinear Transmission Line / D.M. French [et al.] // 2011 IEEE Pulsed Power Conference. – IEEE 2011. DOI: 10.1109/PPC.2011.6191441.
8. Губанов, В.П. Эффективная трансформация энергии высоковольтных импульсов в высокочастотные колебания на основе передающей линии с насыщенным ферритом / В.П. Губанов [и др.] // Письма ЖТФ. – 2009. – Т. 35, №. 13. – С. 81-87.
9. Silva Neto, L.P. High power RF generation in nonlinear lumped transmission lines using commercial ceramic capacitor as nonlinear elements / L.P. Silva Neto, J. Rossi, J.J. Barroso // 2015 IEEE Pulsed Power Conference (PPC). – IEEE 2015. DOI: 10.1109/PPC.2015.7296906.

10. Darling, J. High power pulsed RF generation by soliton type oscillation on nonlinear lumped element transmission lines. Ph.D. Dissertation. Sci. Dept., Oxford Univ., Oxford, U.K., 2009.
11. Белянцев, А.М. Генерация радиоимпульсов ударной электромагнитной волной в линии передачи с ферритом / А.М. Белянцев [и др.] // ЖТФ. – 1995. – Т. 65, № 8. – С.132-142.
12. Seddon, N. RF Pulse Formation in Nonlinear Transmission Lines / N. Seddon, J.E. Dolan, C.R. Spikings // 2007 IEEE 34th International Conference on Plasma Science (ICOPS). – IEEE 2007. DOI: 10.1109/PPPS.2007.4345786.
13. Belyantsev, A.M. Generation of High-Frequency Oscillations by Electromagnetic Shock Wave at It's Synchronism with Backward Harmonic of Periodic Transmission Line Based on Multilayer Heterostructure / A.M. Belyantsev, A.B. Kozyrev // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. – 1998. – Vol. 19, no. 11. – P. 1571-1586.
14. Romanchenko, I.V. A nonlinear transmission line based on periodically placed silicon high voltage switches / I.V. Romanchenko [et al.] // AIP Advances. – 2020. – Vol. 10, no. 12. – P. 125020. DOI: 10.1063/5.0034106.
15. Rostov, V.V. Generation of Subgigawatt RF Pulses in Nonlinear Transmission Lines / V.V. Rostov [et al.] // IEEE Trans. Plas. Sci. – 2010. – Vol. 38, no. 10. – P. 2681-2685. DOI: 10.1109/TPS.2010.2048722.
16. Ulmaskulov, M.R. Microwave generation modes of ferrite nonlinear transmission lines up to 20 GHz / M.R. Ulmaskulov, S.A. Shunailov // Jour. App. Phys. – 2021. – Vol. 130, no. 23. – P. 234905. DOI: 10.1063/5.0072352.
17. Петров, В.А. Высоковольтный магнитный генератор наносекундных импульсов / В.А. Петров, У. Эберль // ПТЭ. – 1979. – №1. – С. 90-92.
18. Weiner, M. Pulse sharpening effects in ferrites / M. Weiner, L. Silber // IEEE Trans. Magnetics. – 1981. – Vol. 17, no. 4. – P. 1472-1477. DOI: 10.1109/TMAG.1981.1061243.

19. Seddon, N. A high-voltage short rise-time pulse generator based on a ferrite pulse sharpener / N. Seddon, E. Thornton // *Rev. Sci. Instrum.* – 1988. – Vol. 59, no. 11. – P. 2497-2498. DOI: 10.1063/1.1139937.
20. Dolan, J.E. Simulation of ferrite-loaded coaxial lines / J.E. Dolan // *Electronics Lett.* – 1993. – Vol.29, no. 9. – P. 762-763. DOI: 10.1049/el:19930510.
21. Dolan, J.E. Magnetic pulse compression in nonlinear transmission lines / J.E. Dolan // *Electronics Lett.* – 1999. – Vol. 35, no. 14. – P. 1168-1169. DOI: 10.1049/el:19990806.
22. Dolan, J.E. Development of 60ps rise time ferrite-loaded coaxial line / J.E. Dolan, H.R. Bolton, A.J. Shapland // *Electronics Lett.* – 1997. – Vo. 33, no. 24. – P. 2049-2050. DOI: 10.1049/el:19971395.
23. Brooker, C. 90kV 1800A 85ps rise time electromagnetic shock line for UWB applications / C. Brooker [et al.] // *Electronics Lett.* – 1999. Vol. 35, no. 25. – P. 2210-2212. DOI: 10.1049/el:19991493.
24. Tie, W. Optimized analysis of sharpening characteristics of a compact RF pulse source based on a gyro-magnetic nonlinear transmission line for ultrawideband electromagnetic pulse application / W. Tie [et al.] // *Plas. Sci. and Tech.* – 2019. – Vol.21, no. 9. – P. 095503. DOI: 10.1088/2058-6272/ab2626.
25. Fairbanks, A.J. Nonlinear transmission line implemented as a combined pulse forming line and high-power microwave source / A.J. Fairbanks, T.D. Crawford, A.L. Garner // *Rev. Sci. Instr.* – 2021. Vol. 92, no. 10. – P. 104702. DOI: 10.1063/5.0055916.
26. Gusev A. I. A 30 GW subnanosecond solid-state pulsed power system based on generator with semiconductor opening switch and gyromagnetic nonlinear transmission lines / A.I. Gusev [et al.] // *Rev. Sci. Instr.* – 2018. – Vol. 89, no 9. – P. 094703. DOI: 10.1063/1.5048111.
27. Gusev A.I. A 6 GW nanosecond solid-state generator based on semiconductor opening switch / A.I. Gusev [et al.] // *Rev. Sci. Instr.* – 2015. – Vol. 86, no. 11. – P. 114706. DOI: 10.1063/1.4936295.

28. Гапонов, А.В. Об ударных электромагнитных волнах в ферритах / А.В. Гапонов, Г.И. Фрейдман // ЖЭТФ. – 1959. – Т. 36. – С. 957-958.
29. Белянцев, А. М. О структуре фронта ударных электромагнитных волн в линиях передачи с нелинейными параметрами / А. М. Белянцев, А. В. Гапонов, Г. И. Фрейдман // ЖТФ. – 1965. – Т. 35. – С. 677-389.
30. Гапонов, А.В. К теории ударных электромагнитных волн в нелинейных средах / А.В. Гапонов, Г.И. Фрейдман // Изв. Вузов. Радиофизика. – 1960. – Т.3. – С.79-88.
31. Landauer, R. Shock waves in nonlinear transmission lines and their effect on parametric amplification / R. Landauer // IBM J. Res. Develop. – 1960. – Vol. 4, no. 4. – P. 391–401. DOI: 10.1147/rd.44.0391.
32. Гапонов, А. В. Ударные электромагнитные волны (обзор) / А. В. Гапонов, Л. А. Островский, Г. И. Фрейдман // Изв. Вузов. Радиофизика. – 1967. – Т. 10. – С. 1376–1413.
33. Фрейдман, Г.И. Ударные электромагнитные волны в плоском волноводе / Г.И. Фрейдман // Изв. Вузов. Радиофизика. – 1960. – Т. 3. – С. 276-284.
34. Elliott, B.J. Pulsed Ferrimagnetic Microwave Generator / B.J. Elliott, T. Schaug-pettersen, H.J. Shaw // Jour. App. Phys. – 1960. – Vol. 31, no. 5. – P. 400-401. DOI: 10.1063/1.1984763.
35. Shaw, H.J. Microwave Generation in Pulsed Ferrites / H.J. Shaw [et al.] // Jour. Appl. Phys. – 1966. – Vol. 37, no. 3. – P. 1060-1066. DOI: 10.1063/1.1708335.
36. Pound, R.V. Microwave pulse generator U.S. Patent No. 2 873 370. 1959.
37. Stohr, J. Magnetism / J. Stohr. - Springer Berlin Heidelberg, 2006. –838.
38. Ландау, Л.Д. Собрание трудов в 2 т. Под ред. Е. М. Лифшица. / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – Москва, Наука, 1969.
39. Белянцев, А.М. Генерация радиоимпульсов ударной электромагнитной волной в линии передачи с ферритом / А.М. Белянцев [и др.] // ЖТФ. – 1995. – Т. 65. – С. 132-142.

40. Белянцев, А.М. Влияние локальной дисперсии на переходные процессы при генерации высокочастотного излучения ударной электромагнитной волной / А.М. Белянцев, А.Б. Козырев // ЖТФ. – 1998. – Т. 68. – С. 89-95.
41. Белянцев, А.М. Особенности генерации высокочастотных колебаний ударной электромагнитной волной при ее синхронизме с обратной волной / А.М. Белянцев, А.Б. Козырев // ЖТФ. – 2000. Т. 70. – С. 78-83.
42. Белянцев, А.М. Генерация высокочастотных колебаний фронтом ударной электромагнитной волны в связанных линиях передачи с аномальной и нормальной дисперсией / А.М. Белянцев, А.Б. Козырев // ЖТФ. – 2001. – Т. 71. – С. 79-82.
43. Козырев, А.Б. Об особенностях формирования структуры ударной электромагнитной волны при ее одновременном синхронизме с несколькими волнами в связанных линиях передачи с разными типами дисперсии / А.Б. Козырев // ЖТФ. – 2002. – Т. 72. – С. 134-136.
44. Seddon, N. RF Pulse Formation in Nonlinear Transmission Lines / N. Seddon, J.E. Dolan, C.R. Spikings // 2007 16th IEEE International Pulsed Power Conference. – IEEE 2007. DOI: 10.1109/PPPS.2007.4651931.
45. Coleman, P.D. Characterization of a synchronous wave nonlinear transmission line / P.D. Coleman [et al.] // 2011 IEEE Pulsed Power Conference. – IEEE 2011. DOI: 10.1109/PPC.2011.6191409.
46. Афанасьев, К.В. Формирование субнаносекундного фронта высоковольтных импульсов в коаксиальной линии с ненасыщенным ферритом / К.В. Афанасьев // ПТЭ. – 2008. - № 3. – С. 86-90.
47. Romanchenko, I.V. Repetitive sub-gigawatt rf source based on gyromagnetic nonlinear transmission line / I.V. Romanchenko [et al.] // Rev. Sci. Instr. – 2012. – Vol. 83, no. 7. – P. 074705. DOI: 10.1063/1.4738641.
48. Chadwick, S.J.F. A Novel Solid-State HPM Source based on a Gyromagnetic NLTL and SOS-based Pulse Generator / S.J.F. Chadwick, N. Seddon, S. Rukin // 2011 IEEE Pulsed Power Conference. – IEEE 2011. DOI: 10.1109/PPC.2011.6191410.

49. Bragg, J. Magnetic biasing of ferrite filled nonlinear transmission lines / J. Bragg, J. Dickens, A. Neuber // 2010 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference. – IEEE 2010. DOI:10.1109/IPMHVC.2010.5958430.
50. Bragg, J. Ferrimagnetic Nonlinear Transmission Lines as High-Power Microwave Sources / J. Bragg, J. Dickens, A. Neuber // IEEE Trans. Pl. Sci. – 2012. – Vol. 41, no. 1. – P. 232-237. DOI: 10.1109/TPS.2012.2226169.
51. Bragg, J. Material selection considerations for coaxial, ferrimagnetic-based nonlinear transmission lines / J. Bragg, J. Dickens, A. Neuber // J. App. Phys. – 2013. – Vol. 113, no. 6. – P. 064904. DOI: 10.1063/1.4792214.
52. Raele, D.V. Investigation of a stripline transmission line structure for gyromagnetic nonlinear transmission line high power microwave sources / D.V. Raele [et al.] // Rev. Sci. Instr. – 2016. – Vol. 87, no. 3. – P. 034706. DOI: 10.1063/1.4942246.
53. French, D.M. Spatially Dispersive Ferrite Nonlinear Transmission Line with Axial Bias / D.M. French, B.W. Hoff // IEEE Trans. Pl. Sci. – 2014. – Vol. 42, no. 10. – P. 3387-3390. DOI: 10.1109/TPS.2014.2348492.
54. Schrock, J.A. Spatially Dispersive Nonlinear Transmission Line Experimental Performance Analysis / J.A. Schrock [et al.] // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2019. – Vol. 26, no. 2. – P. 412-415. DOI: 10.1109/TDEI.2019.007731.
55. Ulmaskulov, M.R. Multistage converter of high-voltage subnanosecond pulses based on nonlinear transmission lines / M.R. Ulmaskulov [et al.] // J. App. Phys. – 2019. – Vol. 126, no 8. – P. 084504. DOI: 10.1063/1.5110438.
56. Ulmaskulov, M.R. High-Voltage Microwave Systems Based on Ferrite Gyromagnetic Nonlinear Transmission Lines / M.R. Ulmaskulov, K.A. Sharypov, S.A. Shunailov // IEEE Trans. Pl. Sci. – 2022. – Vol. 50, no. 9. – P. 3148-3154. DOI: 10.1109/TPS.2022.3191407.
57. Deng, G.J. Verification of spinwave excitation in coaxial gyromagnetic nonlinear transmission lines / G.J. Deng, D.H. Wang // Rev. Sci. Instr. – 2023. – Vol. 94, no. 9. – P. 094704. DOI: 10.1063/5.0155923.

58. Johnson, J.M. Material selection of a ferrimagnetic loaded coaxial delay line for phasing gyromagnetic nonlinear transmission lines / J.M. Johnson [et al.] // *Rev. Sci. Instr.* – 2015. – Vol. 86, no. 8. – P. 084702. DOI: 10.1063/1.4927719.
59. Ahn, J.W. Exciting high frequency oscillations in a coaxial transmission line with a magnetized ferrite / J.W. Ahn [et al.] // *Journal of Magnetism*. – 2015. – Vol. 100, no. 6. – P. 68-72. DOI: 10.4283/JMAG.2015.20.4.460.
60. Karelin, S.Y. FDTD analysis of nonlinear magnetized ferrites: Simulation of oscillation forming in coaxial line with ferrite / S.Y. Karelin // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2017. – Vol. 76, no. 10. – P. 873-882. DOI: 10.15407/rej2017.01.051.
61. Rossi, J. RF generation using a compact bench gyromagnetic line / J. Rossi [et al.] // *Rev. Sci. Instr.* – 2022. – Vol. 93, no. 2. – P. 024704. DOI: 10.1063/5.0067931.
62. French, D.M. High current nonlinear transmission line based electron beam driver / D.M. French [et al.] // *Rev. Sci. Instr.* – 2012. – Vol. 83, no. 12. – P. 123302. DOI: 10.1063/1.4770331.
63. Romanchenko, I.V. Gyromagnetic RF source for interdisciplinary research / I.V. Romanchenko [et al.] // *Rev. Sci. Instr.* – 2017. – Vol. 88, no. 2. – P. 024703. DOI: 10.1063/1.4975182.
64. Romanchenko, I.V. High power microwave beam steering based on gyromagnetic nonlinear transmission lines / I.V. Romanchenko [et al.] // *J. App. Phys.* – 2015. – Vol. 117, no. 21. – P. 214907. DOI: 10.1063/1.4922280.
65. Romanchenko, I.V. Four channel high power rf source with beam steering based on gyromagnetic nonlinear transmission lines / I.V. Romanchenko [et al.] // *Rev. Sci. Instr.* – 2017. – Vol. 88, no. 5. – P. 054703. DOI: 10.1063/1.4983803.
66. Johnson, J.M. Characteristics of a four element gyromagnetic nonlinear transmission line array high power microwave source / J.M. Johnson [et al.] // *Rev. Sci. Instr.* – 2016. – Vol. 87, no. 5. – P. 054704. DOI: 10.1063/1.4947230.
67. Ulmaskulov, M.R. Coherent Summation of Radiation From Four-Channel Shock-Excited RF Source Operating at 4 GHz and a Repetition Rate of 1000 Hz /

- M.R. Ulmaskulov [et al.] // IEEE Trans. Pl. Sci. – 2017. – Vol. 45, no. 10. – P. 2623-2628. DOI: 10.1109/TPS.2017.2704618.
68. Ulmaskulov, M.R. Four-channel generator of 8-GHz radiation based on gyromagnetic non-linear transmitting lines / M.R. Ulmaskulov [et al.] // Rev. Sci. Instr. – 2019. – Vol. 90, no. 6. – P. 064703. DOI: 10.1063/1.5091075.
69. Gilbert, T.L. A phenomenological theory of damping in ferromagnetic materials / T.L. Gilbert // IEEE Trans. Magn. – 2004. – Vol. 40, no. 6. – P. 3443-3449. DOI: 10.1109/TMAG.2004.836740.
70. Rossi, J. Operation analysis of a novel concept of RF source known as gyromagnetic line / J. Rossi [et al.] // 2017 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC). – IEEE 2017. DOI: 10.1109/IMOC.2017.8121122.
71. Романченко, И.В. Энергетические уровни колебаний в нелинейной передающей линии с насыщенным ферритом / И.В. Романченко, В.В. Ростов // ЖТФ. – 2010. – Т.80, №7. – С. 111-114.
72. Dolan, J. Simulation of shock waves in ferrite-loaded coaxial transmission lines with axial bias / J. Dolan // Journal of Physics D: Applied Physics. – 1999. – Vol. 32. – P. 1826. DOI: 10.1088/0022-3727/32/15/310.
73. Yamasaki, F.S. Simulation Studies of Distributed Nonlinear Gyromagnetic Lines Based on LC Lumped Model / F.S. Yamasaki [et al.] // IEEE Trans. Pl. Sci. – 2016. – Vol. 44, no. 10. – P. 2232-2239. DOI: 10.1109/TPS.2016.2556320.
74. Cui, Y. Operation analysis of the wideband high-power microwave sources based on the gyromagnetic nonlinear transmission lines / Y. Cui [et al.] // Rev. Sci. Instr. – 2021. – Vol. 92, no. 3. – P. 034702. DOI: 10.1063/5.0040323.
75. Yee, K. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media / K. Yee // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1966. – Vol. 14, no. 3. – P. 302-307. DOI: 10.1109/TAP.1966.1138693.

76. Pereda, J.A. A treatment of magnetized ferrites using the FDTD method / J.A. Pereda [et al.] // IEEE Microwave and Guided Wave Letters. – 1993. – Vol. 3, no. 5. – P. 136-138. DOI: 10.1109/75.217207.
77. Pereda, J.A. FDTD analysis of magnetized ferrites: an approach based on the rotated Richtmyer difference scheme / J.A. Pereda [et al.] // IEEE Microwave and Guided Wave Letters. – 1993. – Vol. 3, no. 9. – P. 322-324. DOI: 10.1109/75.244866.
78. Karelin, S. FDTD analysis of nonlinear magnetized ferrites: application to modeling of oscillation forming in coaxial line with ferrite / S. Karelin // RADIOFIZIKA I ELEKTRONIKA. – 2017. – Vol. 8, no. 22. – P. 51-56. DOI: 10.15407/rej2017.01.051.
79. Karelin, S. Improving rf generation conditions in a ferrite-filled transmission line / S. Karelin [et al.] // Problems of Atomic Science and Technology. – 2018. – Vol. 116, no. 4. – P. 273-276.
80. Karelin, S. Radio Frequency Oscillations in Gyrotropic Nonlinear Transmission Lines / S. Karelin [et al.] // Plasma. – 2019. – Vol. 2, no. 2. – P. 258-271. DOI: 10.3390/plasma2020018.
81. Huang, L. Field-Line Coupling Method for the Simulation of Gyromagnetic Nonlinear Transmission Line Based on the Maxwell-LLG System / L. Huang [et al.] // IEEE Trans. Pl. Sci. – 2020. – Vol. 48, no. 11. – P. 3847-3853. DOI: 10.1109/TPS.2020.3029524.
82. Patrakov, V. Computer simulation of multi-gigawatt magnetic compression lines / V. Patrakov, S. R. Rukin // Proceedings of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2022) Tomsk, Russia. – 2022. DOI: 10.56761/EFRE2022.S6-P-017001.
83. Тараканов, В.П. Универсальный электромагнитный код KARAT / В.П. Тараканов // Математическое моделирование. Проблемы и результаты. – М.: Наука. – 2003. – С. 456-476.

84. Романченко, И.В. Генерирование мощных наносекундных импульсов электромагнитного излучения на основе линий с ферритом. / И.В. Романченко. – Дис. д. ф.-м. наук: 01.04.04.
85. CST Computer Simulation Technology. CSTU Studio Suite. – (<https://www.cst.com>).
86. Семенов, Н.А. Техническая электродинамика / Н.А. Семенов. – М: Связь, 1973, - 480 с.
87. Илларионов, Ю.А. Расчет гофрированных и частично заполненных волноводов / Ю.А. Илларионов, С.Б. Раевский, В.Я. Сморгонский. – М: Советское радио, 1980, - 200 с.
88. Askaryan, G.A. Cherenkov radiation and transition radiation from electromagnetic waves / G.A. Askaryan // Soviet Physics JETP. – 1962. – Vol. 15, no. 5. – P. 1360-1364.
89. Машкович, Е.А. Дисперсионное расплывание ультракороткого импульса со скошенным фронтом интенсивности / Е.А. Машкович, М.И. Бакунов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. - №5(3). – С. 75-79.
90. Беспалов, В.Г. Фемтосекундная оптика и фемтотехнологии / В.Г. Беспалов [и др.]. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2018, – 138 с.
91. Шлапаковский, А.С. Сверхширокополосное усиление в диэлектрическом черенковском лазере коаксиальной конфигурации / А.С. Шлапаковский // ЖТФ. – 1997. – Т. 67, №5. – С. 66-72.
92. Hoff, V.W. Wide aperture permanent magnet solenoid / V.W. Hoff [et al.] // J. Appl. Phys. – 2012. – Vol. 111, no. 7. – P. 07A711. DOI: 10.1063/1.3673808.
93. Лаптева, К.А. Расчет размагничивающего фактора при продольном намагничивании в магнитопорошковой дефектоскопии / К.А. Лаптева, И.И. Толмачев // Известия Томского политехнического университета. - 2012. – Т.321, №2. – С. 140-144.
94. Taylor, J.D. Introduction to ultra-wideband radar systems. / J.D. Taylor. – CRC Press, 1995, – 200 с.

95. Federal Communications Commission. Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems., 2002.

Список публикаций автора по теме диссертации

96. Priputnev, P. 2-D And 3-D Numerical Simulation of Ferrite Loaded Coaxial Transmission Lines / P. Priputnev, 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.
97. Priputnev, P.V. Nonlinear gyromagnetic transmission line design optimization for increasing radiopulse generation efficiency / P.V. Priputnev [et al.] // J. Phys.: Conf. Ser. – 2021. – Vol. 2094. – P. 022070. DOI: 10.1088/1742-6596/2094/2/022070.
98. Priputnev, P.V. RF Pulse Generation in a Gyromagnetic Nonlinear Transmission Line With Periodically Placed Ferrites and Permanent Magnets / P.V. Priputnev [et al.] // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2022. – Vol. 32, No. 5. – P. 471-474. DOI: 10.1109/LMWC.2021.3138964.
99. 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.
100. 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.
101. 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.
102. 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.

103. 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.
104. 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.
105. 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.
106. 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.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2753420

СПОСОБ ГЕНЕРАЦИИ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ
СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ НАНОСЕКУНДНОЙ
ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН) (RU)*

Авторы: *Романченко Илья Викторович (RU), Конев Владимир Юрьевич (RU), Припутнев Павел Владимирович (RU)*

Заявка № 2021106419

Приоритет изобретения 12 марта 2021 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 16 августа 2021 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 12 марта 2041 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 0x02A5CFBC00B1AC5F59440A2F08092E9A118
Владелец **Ивлиев Григорий Петрович**
Действителен с 15.01.2021 по 15.01.2035

Г.П. Ивлиев

