

Минобрнауки России  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук  
(ИСЭ СО РАН)  
Отдел образовательной деятельности

## НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах  
научно-квалификационной работы на тему:

**Процессы взаимодействия импульсных электромагнитных полей с  
нелинейными и дисперсными средами и структурами, их применение для  
генерации высокочастотных колебаний и влияние на измерения  
характеристик наносекундных импульсов СВЧ-излучения**

Направление подготовки: 03.06.01 Физика и астрономия

Профиль подготовки (специальность):

01.04.04 – физическая электроника

Аспирант



(подпись)

Припутнев Павел Владимирович

Научный руководитель:  
Романченко Илья Викторович,  
кандидат физ.-мат. наук,  
зав. лабораторией нелинейных  
электродинамических систем  
ИСЭ СО РАН

## Актуальность работы

За последние десятилетия СВЧ генераторы на основе нелинейных передающих линий активно развивались и достигли энергетических параметров, сравнимых с вакуумными СВЧ приборами в длинноволновом диапазоне. Возбуждение колебаний в нелинейных линиях происходит при взаимодействии крутого фронта высоковольтного импульса с диспергирующими средами (средами с пространственной или временной дисперсией) [1]. Генераторы на основе нелинейных линий имеют ряд преимуществ перед вакуумными СВЧ приборами, использующими электронный пучок для генерации колебаний. Для генерации СВЧ импульсов в нелинейных линиях не требуется электронный пучок, следовательно, такие устройства не требуют вакуума, для них не требуется сильнооточный катод, имеющей относительно небольшой ресурс, и самое главное не требуется защита от сопутствующего рентгеновского излучения. Поскольку на вакуумные приборы накладываются дополнительные требования к размерам, связанные с времяпролетным характером возбуждения колебаний, в диапазоне частот в единицы ГГц нелинейные линии являются хорошей альтернативой. Нелинейные линии условно можно разделить на 2 группы – это линии с сосредоточенными параметрами и линии с однородным заполнением. Линии с сосредоточенными параметрами могут быть выполнены с использованием нелинейных емкостей, нелинейных индуктивностей и их комбинацией [2,3]. К линиям с однородным заполнением относятся ферритовые линии, в которых генерация высокочастотных колебаний происходит при возбуждении гиромагнитной прецессии фронтом высоковольтного импульса [4]. Перспективным направлением дальнейшего развития нелинейных линий является их компактизация. Одним из подходов к уменьшению размера генератора может стать метод, в котором происходит возбуждение гиромагнитной прецессии в феррите малого по сравнению с длиной волны размера. Этот способ уже предлагался еще в 60-ых годах, но не получил дальнейшего развития из-за низкой связи между колебаниями вектора намагниченности и ВЧ колебаниями в выходном тракте генератора [5]. Другим подходом может стать использование линий с пространственной дисперсией, в которой возможно полное преобразование видеоимпульса в радиоимпульс [6].

Важными характеристиками любых СВЧ генераторов являются их энергетические характеристики. Для измерения энергии СВЧ импульсов, в основном, активно используются два метода: метод калориметрических измерений [7] и метод

интегрирования излученной плотности потока мощности. Для калориметрических измерений, разработка методик одновременной регистрации формы огибающей сигнала и одновременного измерения энергии импульса является актуальной задачей для диагностики параметров СВЧ импульсов электроники больших мощностей.

### **Цель научного исследования**

Целью настоящей работы является рассмотрение вопросов взаимодействия электромагнитных импульсов с нелинейными и дисперсными средами и их распространения в таких средах для разработки новых схем возбуждения высокочастотных колебаний и усовершенствования методов измерения параметров СВЧ импульсов высокой мощности.

### **Основные задачи научного исследования**

1. Разработка конструкции импульсного одновиткового трансформатора в коаксиальной геометрии, обеспечивающей минимальное искажение фронта передаваемого импульса.

2. Экспериментальное исследование режимов работы импульсного трансформатора. Эксперименты по возбуждению гиромагнитной прецессии в схеме одновиткового коаксиального импульсного трансформатора.

3. Численное моделирование процесса генерации высокочастотных колебаний в нелинейной искусственной передающей линии с газовыми разрядниками и пространственной дисперсией.

4. Разработка численной модели нелинейной передающей линии с перекрестными связями и обостряющими полупроводниковыми диодами для генерации высокочастотных колебаний.

5. Экспериментальное исследование обострения наносекундного фронта импульса в линии с нелинейными емкостями, обладающей частотой отсечки более 500 МГц.

6. Аналитическое и численное исследование искажения формы наносекундных СВЧ импульсов в этиловом спирте вследствие частотно-зависимого затухания.

## Содержание научного исследования

### Раздел 1. Исследование трансформации и компрессии энергии высоковольтных импульсов в схеме, представляющей собой одновитковый импульсный трансформатор.

В первой части данной работы рассматривается схема возбуждения электромагнитных колебаний гиромагнитной прецессией вектора намагниченности в феррите малого размера предварительно насыщенном внешним магнитным полем, представляющая собой низкоиндуктивный одновитковый импульсный трансформатор (по одному витку в первичной и вторичной обмотке). Витками трансформатора являются две короткозамкнутые коаксиальные линии. В выбранной конструкции короткозамыкающий контакт первичного коаксиала пройдет через специальные отверстия в проводниках вторичного коаксиала. Для обеспечения высоковольтной изоляции оба коаксиала заполнены вакуумным маслом. Ферритовые кольца, играющие роль магнитопровода трансформатора, помещены в коаксиал вторичной обмотки и находятся во внешнем аксиальном магнитном поле (направленном вдоль оси симметрии коаксиала), созданным внешним соленоидом, обеспечивающим насыщение феррита. Изображение 3D модели устройства представлено на рисунке 1.

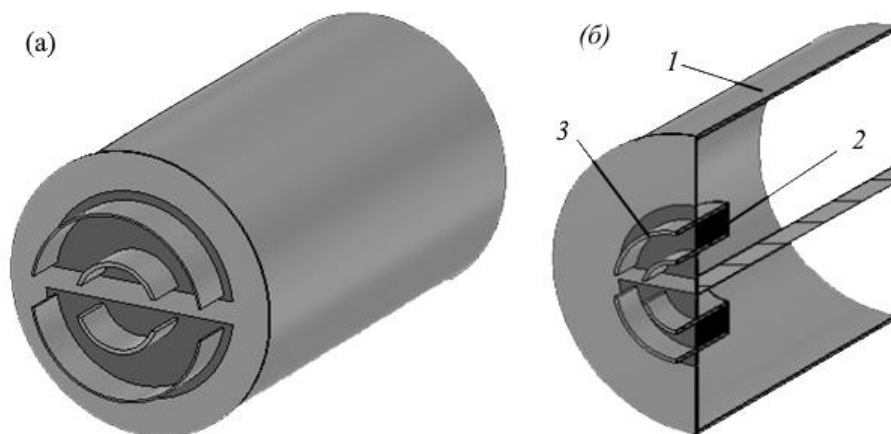


Рисунок 1. Модель одновиткового импульсного трансформатора. (а) – внешний вид, (б) – вид в разрезе (1 – коаксиал первичной обмотки, 2 – ферритовый магнитопровод (ферритовые кольца), 3 – коаксиал вторичной обмотки).

Предполагаемый принцип работы такого устройства основан на том, что импульс тока с субнаносекундным фронтом от генератора высоковольтных импульсов проходя по первому коаксиалу (в первичной обмотке) создает азимутальное магнитное поле, которое в результате импульсного перемагничивания насыщенного феррита возбуждает гиромагнитную прецессию вектора намагниченности. ЭДС, создаваемая прецессией, формирует электромагнитный импульс, который передается по второму коаксиалу (вторичной обмотке) в нагрузку. Для аналитических оценок и для численного моделирования геометрии были выбраны следующие размеры ферритовых колец  $40 \times 65$  мм общей толщиной  $h=6$  мм.

В процессе разработки такого устройства рассматривались следующие важные задачи: формирование субнаносекундного фронта азимутальной компоненты напряженности магнитного поля в феррите, возбуждение гиромагнитной прецессии в феррите и оценка ЭДС созданной магнитным потоком прецессирующего вектора намагниченности, вывод сигнала в нагрузку через второй коаксиал. Дальнейшие оценки, представленные в работе и экспериментальный макет устройства, соответствуют размерам коаксиалов  $R_{o1}=60$  мм,  $R_{i1}=5$  мм,  $R_{o2}=36$  мм,  $R_{i2}=20$  мм.

Поскольку в схеме замещения импульсного трансформатора присутствуют паразитные элементы (индуктивность рассеяния и динамическая емкость), даже при подаче на первичную обмотку бесконечного крутого перепада, импульс на нагрузке будет иметь конечное время нарастания. Можно оценить форму импульса на нагрузке для заданных размеров коаксиалов и ферритов. Форма нормированного напряжения на нагрузке представлена на рисунке 2 (а). На рисунке 2 (б) представлены результаты численного моделирования передачи импульса трансформатором из первичного коаксиала во вторичный в Ansys HFSS.

Из анализа схемы замещения трансформатора и численного моделирования геометрии можно заключить, что ожидаемое увеличение времени нарастания передаваемого импульса не превышает нескольких сотен пикосекунд и практически не влияет на фронт передаваемого импульса, формируемый на нагрузке.

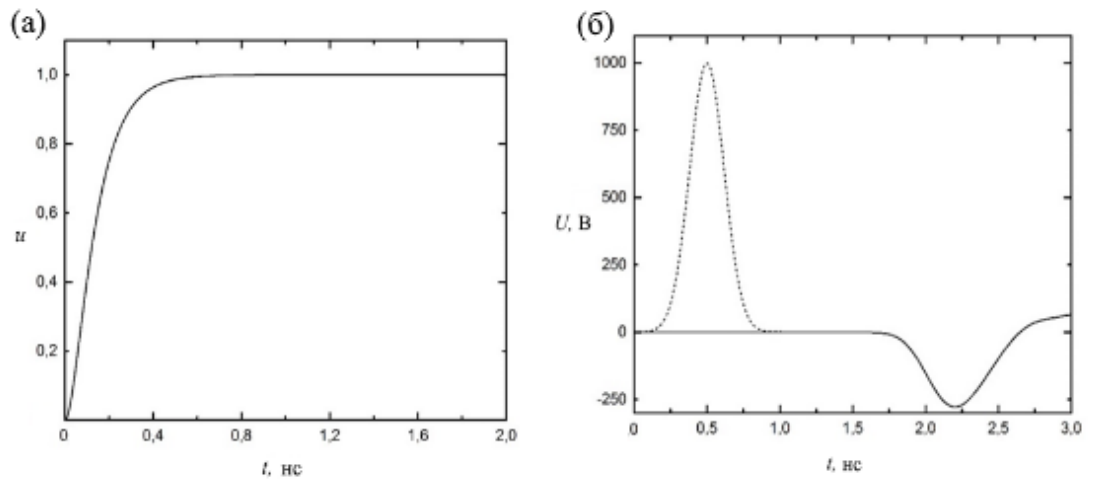


Рисунок 2. Форма импульса нормированного напряжения на нагрузке импульсного трансформатора (а). Передача импульса трансформатором (б). Пунктир – сигнал на входе, сплошная – сигнал на выходе.

Из численного решение уравнения Ландау-Лифшица для процесса перемагничивания феррита можно оценить частоту и амплитуду колебаний, возбуждаемых прецессией вектора намагниченности феррита.

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = -\gamma \mu_0 [\vec{M}, \vec{H}] - \frac{\alpha \gamma \mu}{M_s} [\vec{M}, [\vec{M}, \vec{H}]] \quad (1.1)$$

Для типичных условий эксперимента:  $\alpha=0.07$ ,  $M_s=0.35$  Тл,  $\tau_r=0.5$  нс,  $H_{\phi 0}=30$  кА/м,  $H_z=22$  кА/м, изменение во времени азимутальной компоненты вектора намагниченности и ЭДС, возбуждаемая прецессией вектора намагниченности феррита, представлены на рисунке 3. Согласно расчетам, ожидаемая частота возбуждаемых колебаний близка к 1 ГГц. Конструкция короткозамыкающего контакта первичного коаксиала обеспечивает хороший коэффициент прохождения ( $S_{21}>0.9$ ) в полосе от 0 до 3 ГГц.

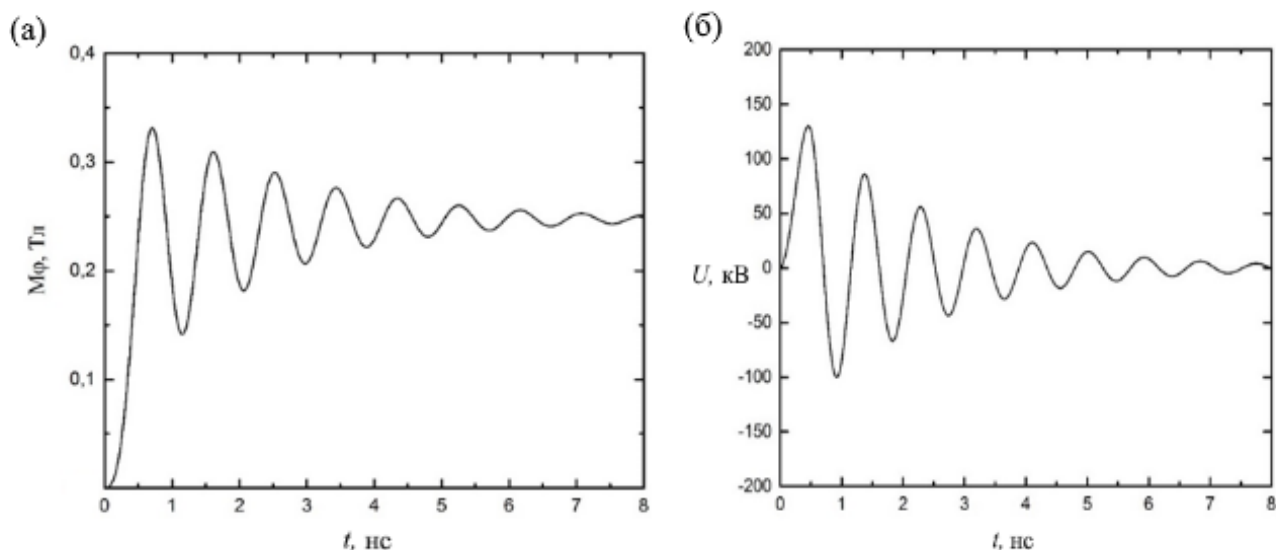


Рисунок 3. Изменение во времени азимутальной компоненты вектора намагниченности феррита (а), ЭДС, создаваемая гиромагнитной прецессией (б).

На основании расчетов был создан экспериментальный макет, описанного трансформатора. Его режимы работы изучались в схеме с генератором типа СИНУС. На рисунке 4 представлены осциллограммы напряжения в первичной и вторичном контуре для трансформатора без ферритов (без магнитопровода). На рисунке 5 представлены осциллограммы для системы с ферритом (с магнитопроводом) для случаев без подмагничивания и с максимальным полем подмагничивания 100 кА/м. Эффективность передачи энергии видеоимпульса из первичного контура во вторичный для трансформатора без подмагничивания составляет 60%, а фронт сигнала на выходе практически не изменяет своей длительности и остается субнаносекундным. В условиях эксперимента возбуждение гиромагнитной прецессии не наблюдалось даже при очень высоких полях подмагничивания. Согласно проведенным оценкам, продольный размагничивающий фактор для феррита не превышает 0.4. Таким образом, можно предположить, что отсутствие гиромагнитной прецессии в экспериментах не вызвано ослаблением продольного поля в феррите за счет размагничивания образца с малым продольным размером.

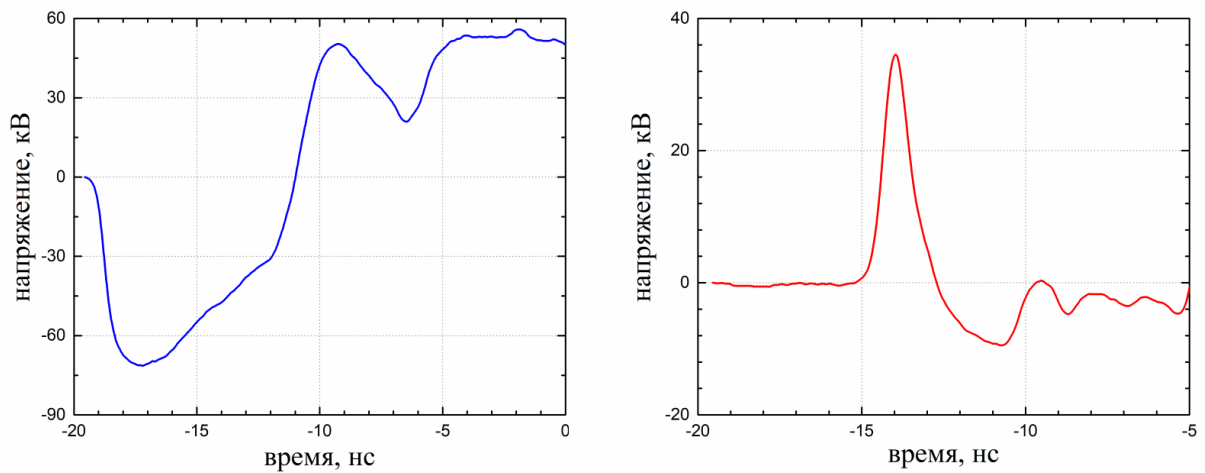


Рисунок 4. Передача сигнала трансформатором в схеме без феррита (без магнитопровода). Сигнал от генератора (слева), сигнал на нагрузке (справа).

Проведенные оценки и анализ экспериментальных данных позволяют предположить, что отсутствие колебаний гиромагнитной прецессии в эксперименте, по всей видимости, вызвано сильным ослаблением азимутальной компоненты вектора напряженности магнитного поля и его неоднородным распределением вдоль оси коаксиала в месте расположения феррита, что приводит к условиям, в которых не наблюдается импульсное перемагничивание феррита. Ослабление поля происходит за счет взаимного вычитания полей токов первичной и вторичной обмотки.

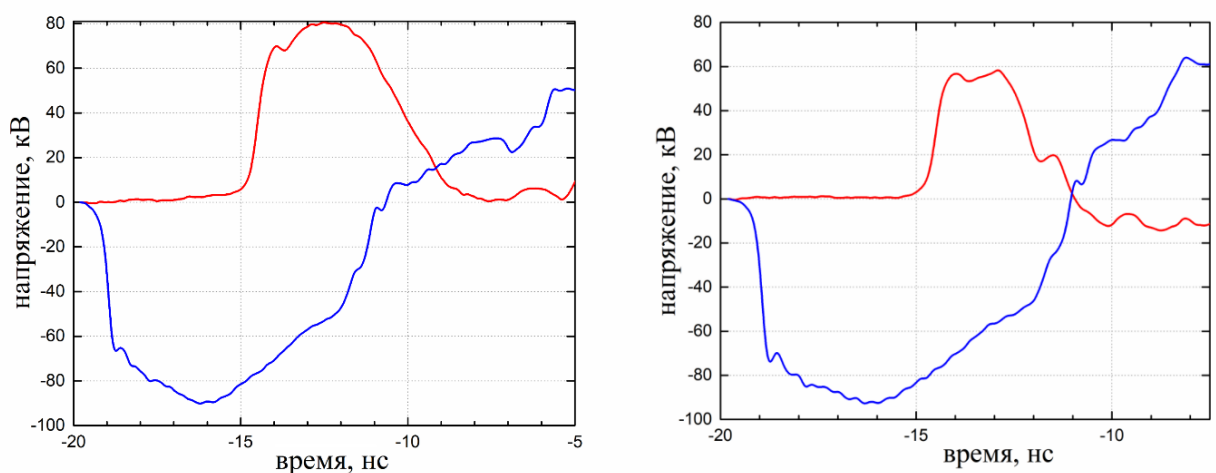


Рисунок 5. Передача сигнала трансформатором в схеме с ферритом (с магнитопроводом) без поля подмагничивания – (слева), с максимальным полем подмагничивания (справа). Сигнал от генератора – синяя линия, сигнал на нагрузке – красная линия.



## **Выводы к разделу 1**

Предложенная геометрия одновиткового импульсного трансформатора позволяет передавать высоковольтные импульсы напряжения в системе с гальванической развязкой с минимальным искажением субнаносекундного фронта импульса. Энергетический КПД трансформатора составляет не менее 60%.

Азимутальная компонента напряженности магнитного поля в феррите сильно ослаблена и имеет неоднородное распределение вдоль оси коаксиала импульсного трансформатора. Это приводит к отсутствию условий для импульсного перемагничивания феррита, при котором происходит возбуждение колебаний, созданных прецессией вектора намагниченности.

## **Раздел 2. Обострение фронта импульса и возбуждение высокочастотных колебаний в нелинейных линиях с дисперсией.**

Известно, что распространение ударных электромагнитных волн (УЭМВ) в диспергирующей среде сопровождается возбуждением за ее фронтом, а иногда и перед ним, высокочастотных осцилляций электромагнитного поля, которые обеспечивают отток энергии из области фронта [8]. Характер и форма осцилляций, очевидно, определяются нелинейностью среды и ее дисперсионными свойствами. Ударной электромагнитной волной обычно называют резкий скачок поля в импульсе, который, как правило имеет конечную, но очень малую длительность в масштабе времени переходных процессов. В пионерских работах по УЭМВ нелинейность в линии передачи имела однородный или квазиоднородный характер. Формирование фронта УЭМВ в линии с такой нелинейностью происходит на определенной длине пробега электромагнитного импульса. Однако, для образования резкого перепада поля в импульсе не обязательно требуется прохождение им определенной длины в однородной нелинейной среде. Для формирования УЭМВ в линии передачи возможно использование газовых разрядников, способных обеспечить субнаносекундные времена нарастания тока. На примере линии передачи, обладающей пространственной дисперсией и нелинейностью в виде периодически расположенных газовых разрядников, рассматривается возможность генерации высокочастотных колебаний фронтом УЭМВ.

Если рассматривать фронт УЭМВ как бегущий источник высокочастотных колебаний, распространяющийся со скоростью  $v_s$ , то очевидно, что за фронтом

эффективно будут возбуждаться те волны, фазовая скорость которых равна скорости ударного фронта, а для эффективного оттока энергии групповая скорость должна быть меньше скорости ударного фронта. В случае, когда групповая скорость намного меньше скорости УЭМВ также не стоит ожидать эффективного возбуждения волны, поскольку за счет быстрого оттока энергии от фронта в системе может перестать формироваться УЭМВ. Разность скорости УЭМВ и групповой скорости ударной волны  $v_s - v_g$ , определяет длину линии, необходимую для формирования цуга колебаний определенной длины  $N$ .

$$L = N \lambda \frac{v_s}{v_s - v_g} \quad (2.1)$$

Рассматриваемая в рамках данной работы линия с пространственной дисперсией представляет собой LC линию с перекрестной емкостной связью через звено и газовыми разрядниками в каждой ячейке линии. Ее эквивалентная схема представлена на рисунке 6. Изменением отношения емкости звена к емкости перекрестной связи  $\gamma = C^* / C$  - коэффициент перекрестной связи можно управлять дисперсионными характеристиками линии.

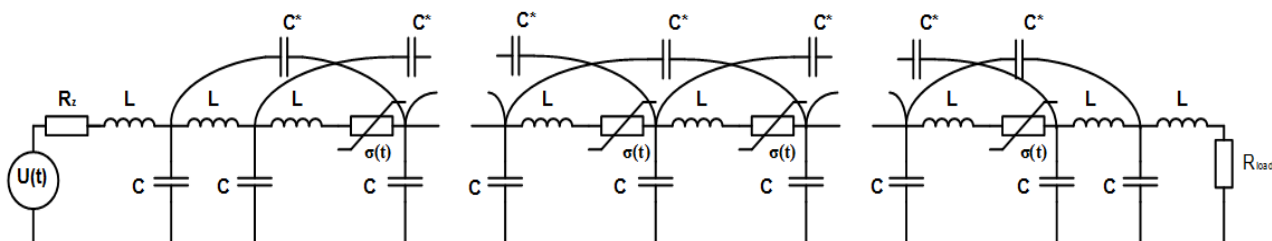


Рисунок 6. Эквивалентная схема линии с газовыми разрядниками и перекрестными емкостями.

Для линии (рисунок 6) можно записать дисперсионное соотношение в случае, когда нелинейность отсутствует (промежутки разрядника закорочены и не имеют остаточного сопротивления).

$$\sin^2 \frac{\varphi}{2} - 4\gamma \frac{\omega^2}{\omega_c^2} \sin^2 \varphi = \frac{\omega^2}{\omega_c^2} \quad (2.2)$$

Фазовая и групповая скорость могут быть записаны в виде, где  $l$  – период системы

$$v_p = \frac{\omega d}{\varphi}, \quad v_g = l \frac{d\omega}{d\varphi}. \quad (2.3)$$

На рисунке 7 представлены зависимости нормированных фазовой и групповой скорости от сдвига фазы для разных значений параметра  $\gamma$ . Наиболее эффективное возбуждение волны стационарной амплитуды и с наиболее длинным цугом колебаний происходит на частоте, когда групповая скорость возбуждаемой волны находится вблизи ее минимума.

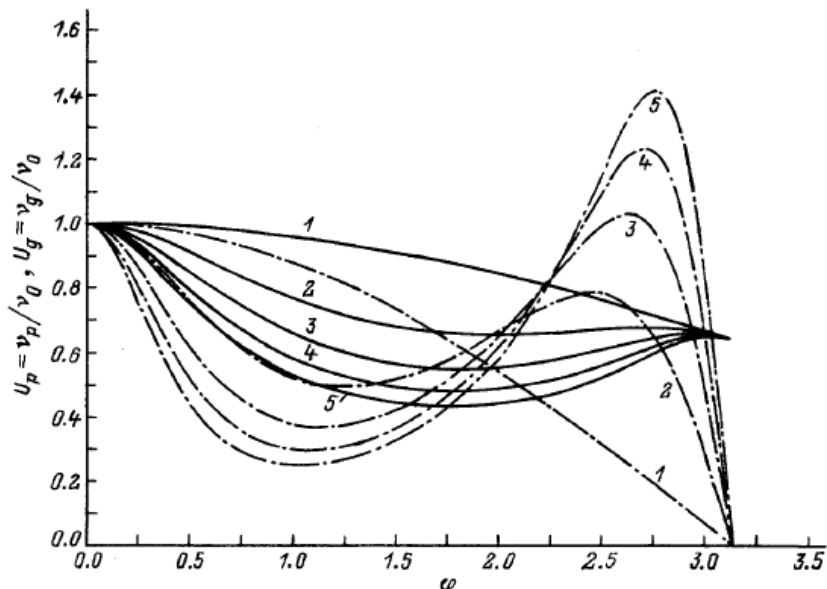


Рисунок 7. Зависимости нормированных фазовой и групповой скорости от сдвига фазы для разных значений параметра  $\gamma$  (1 – 0, 2 – 0.2, 3 – 0.4, 4 – 0.6, 5 – 0.8).

Рассмотрение процесса распространения УЭМВ в такой линии аналитически не представляется возможным. Возбуждение колебаний изучалось при численном решении уравнений Кирхгофа для каждого звена линии совместно с уравнением, описывающим нелинейные свойства разрядника. В качестве модели для описания разрядника была выбрана модель Ромпе-Вайцеля для сопротивления искрового канала [9], поскольку эта модель достаточно хорошо описывает одноискровые разрядники и часто используется в моделировании. Используя формулу Ромпе-Вайцеля можно записать дифференциальное уравнение для описания проводимости искрового канала разрядника с зазором  $d$  и давлением  $p$ . Параметр  $a$  определяет сорт газа разрядника.

$$R(i, t) = \frac{d}{\sqrt{\frac{2a}{p} \int_0^t i^2(t) dt}}, \quad \frac{d\sigma(i, t)}{dt} = \frac{a}{d^4 p} \frac{i^2(t)}{\sigma(i, t)} \quad (2.4)$$

Численно решалась система уравнений Кирхгофа вместе с уравнением для проводимости (2.4). Эти уравнения в безразмерном виде для  $n$ -ой ячейки линии имеют следующий вид:

$$\frac{di_n}{d\tau} = u_{n-1} - u_n - \frac{i_n}{\sigma_n}, \quad \frac{du_n}{d\tau} = i_n - i_{n+1} + \gamma \frac{d}{d\tau}(u_{n-2} - 2u_n + u_{n+2}), \quad \frac{d\sigma_n}{d\tau} = A \frac{i_n^2}{\sigma_n}. \quad (2.5)$$

Здесь  $A$  – безразмерный параметр, определяющий свойства газоразрядного промежутка в LC контуре. Типичные значения для параметра  $A$ , реализуемые в эксперименте, лежат в интервале от сотен до нескольких тысяч в зависимости от сорта газа. На рисунке 8 представлена типичная картина трансформации полубесконечного импульса при его распространении в линии для  $A = 1000$ . В начале импульс от генератора обостряется на разрядниках, затем из-за присутствия дисперсии в линии, когда фронт УЭМВ становится сравнимым с периодом возбуждаемой синхронной волны, происходит возбуждение высокочастотных колебаний.

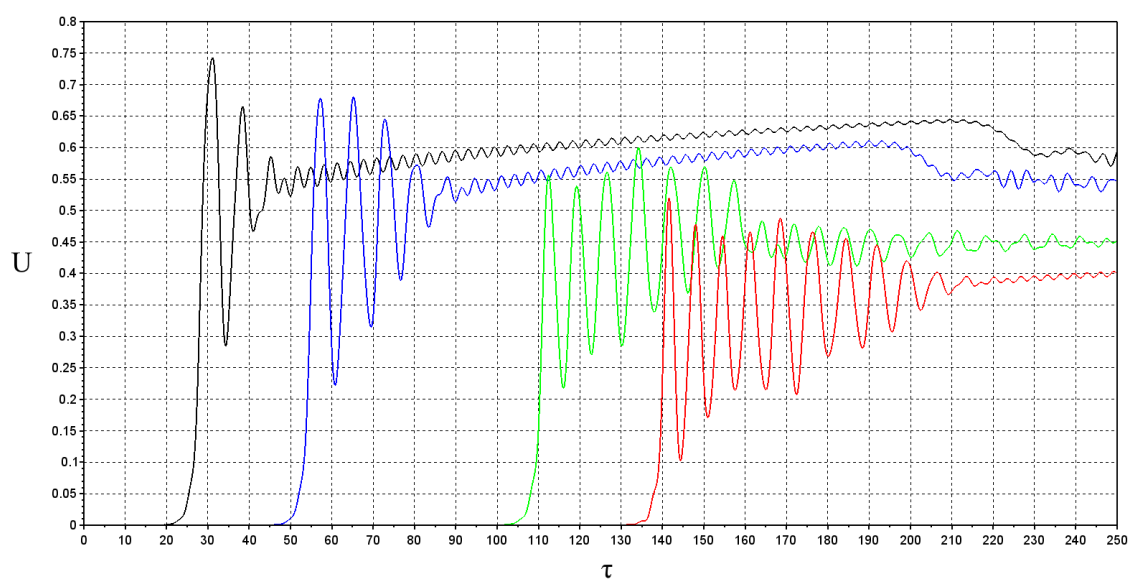


Рисунок 8. Осциллограммы напряжения в ячейках линии при распространении УЭМВ (20, 40, 80, 100 ячейки).

При варьировании параметров в расчетах не наблюдалось формирование квазистационарного цуга колебаний. Когда длина линии не слишком большая, происходит формирование нескольких осцилляций одинаковой амплитуды, но затем форма колебаний перестает носить квазистационарный характер. Это вызвано тем, что импульс распространяется в линии с потерями, поскольку разрядники обладают

остаточным сопротивлением. Из-за этого, амплитуда фронта УЭМВ (другими словами амплитуда самого импульса) уменьшается по мере его распространения в линии, следовательно, изменяется его спектральный состав, и в этом случае уже нельзя говорить о формировании квазистационарного режима генерации и синхронизме с волной определенной частоты. Можно показать, что фронт УЭМВ подчиняется следующему уравнению ( $I_s$  – амплитуда фронта УЭМВ,  $R_r$  – остаточное сопротивление разрядника,  $L$  – индуктивность звена,  $v_0$  – скорость распространения импульса в LC линии,  $\xi = (t-z/v_s)$ ).

$$\frac{\partial I_s}{\partial \xi} = \frac{R_r}{L \left( \frac{v_0^2}{v_s^2} - 1 \right)} I_s \quad (2.6)$$

Из уравнения видно, что амплитуда фронта УЭМВ будет уменьшаться при распространении в линии с потерями, что существенно усложняет описание процесса формирования колебаний в терминах скорости ударной волны.

На рисунке 9 показана зависимость частоты возбуждаемых колебаний от параметра  $\gamma$  при фиксированном  $A$ . Увеличение  $\gamma$  приводит к перестройке частоты возбуждаемых колебаний в область более низких частот. Отдельно следует отметить случай, когда  $\gamma = 0$ , который соответствует линии без перекрестных связей. В этом случае механизм возбуждения колебаний отличается от описанного выше, а частота возбуждаемых в линии колебаний близка к критической частоте линии. Это вызвано тем, что в искусственной линии передачи энергия не может распространяться с частотой выше критической частоты (частоты отсечки)  $f_{co} = 1 / \pi \sqrt{LC}$ , и импульс, фронт которого обострен до длины сравнимой с обратным значением частоты отсечки, за счет нелинейности в линии, распадается на последовательность уединенных волн солитонов. Генерация радиоимпульсов таким способом активно развивается для линий с нелинейными емкостями и для гибридных линий (линии с нелинейными емкостями и индуктивностями). При  $\gamma = 0$  возможно получение цуга колебаний малой длины с максимальной амплитудой колебаний приблизительно в 2 раза меньше, чем в линии с пространственной дисперсией. На рисунке 10 представлена осциллограмма напряжения на согласованной нагрузке в линии из 40 ячеек для  $\gamma = 0$ .

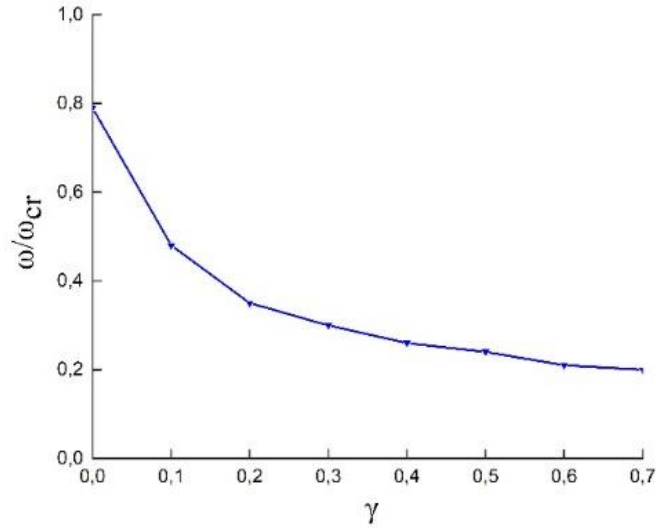


Рисунок 9. Зависимость нормированной частоты возбуждаемых колебаний от параметра  $\gamma$  при фиксированном  $A$ .

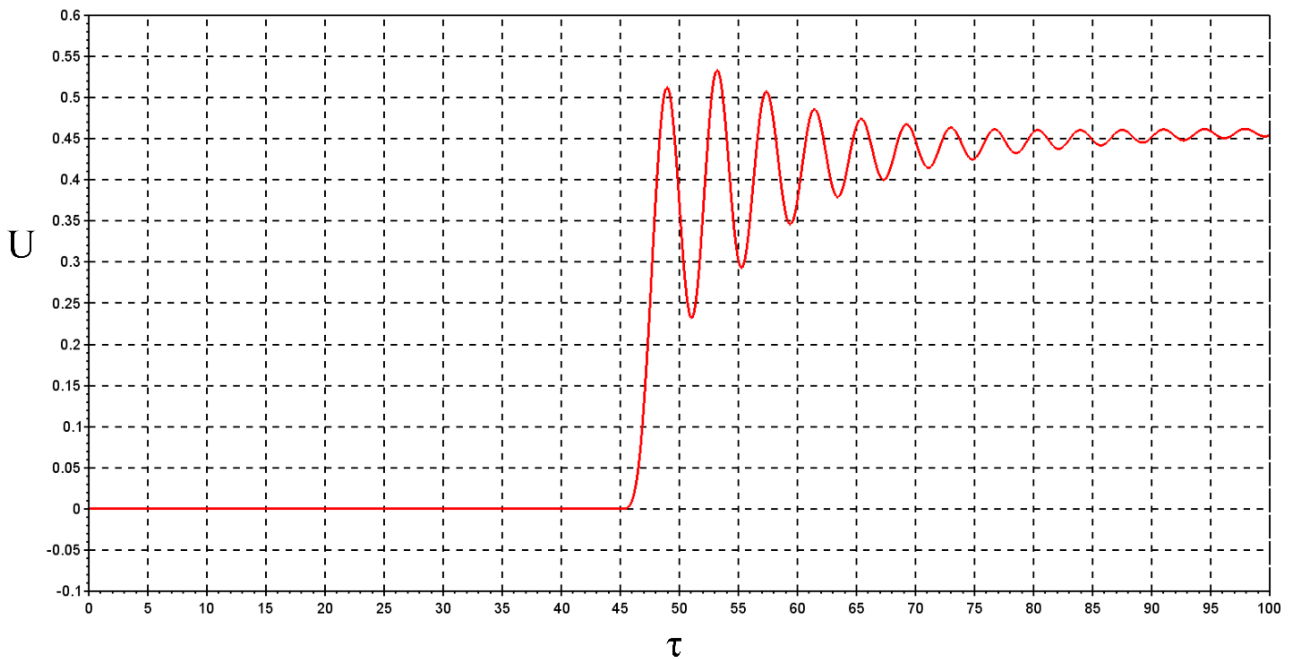


Рисунок 10. Осциллограмма напряжения на согласованной нагрузке в линии с разрядниками без перекрестных связей.

На сегодняшний день, для наносекундных импульсов существует альтернатива газовым разрядникам, позволяющая сильно уменьшить габариты устройств и, судя по некоторым публикациям, являются более эффективными в применении – это полупроводниковые коммутационные диоды (GaAs, Si) работающие на самопробое,

называемые в некоторой литературе твердотельными разрядниками [10-12]. В данной работе была разработана модель искусственной квазиполосковой линии с перекрестными связями и полупроводниковыми диодами, рисунок 11.

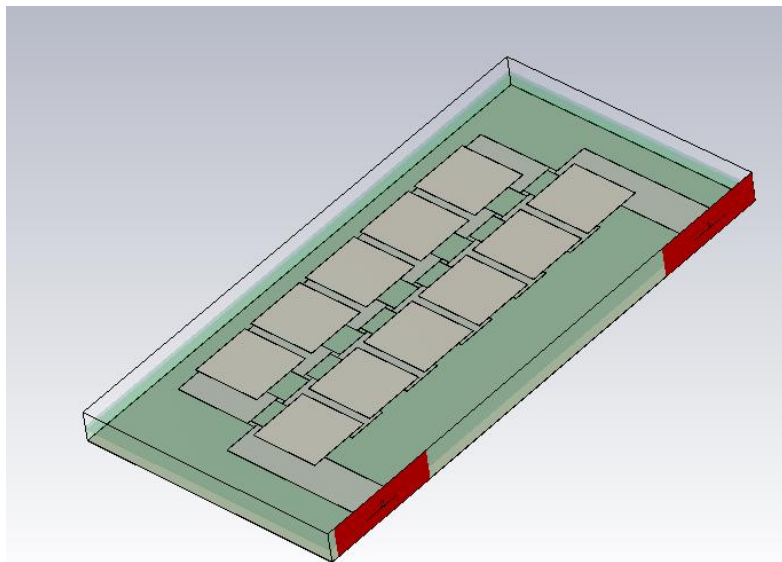


Рисунок 11. Линия с твердотельными разрядниками и перекрестными связями.

На рисунках 12 и 13 представлены осциллограммы сигналов в линии из 20 и 100 ячеек. Частота колебаний равна 1.1 ГГц для диодов с остаточным сопротивлением близким к 1 ому и временем переключения в проводящее состояние в сотни пикосекунд. В длинной линии (порядка 100 ячеек) происходит полная трансформация видеоимпульса в радиоимпульс. Максимальное КПД трансформации видеоимпульса в радиоимпульс, полученный к численному эксперименте, составлял 10%. КПД для случая линии из 100 ячеек (рисунок 13), где происходит полная трансформация импульса составляет 7%. В такой линии, в численном эксперименте, наблюдались колебания в частотном диапазоне от 500 МГц до 2 ГГц. Перестройка частоты возможна за счет изменения коэффициента перекрестной связи и изменения длительности фронта импульса, после его обострения на диоде.

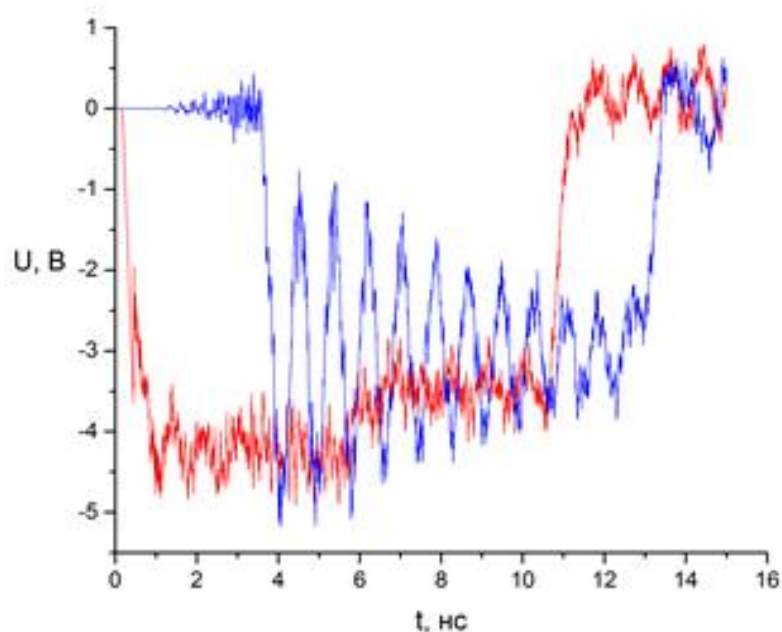


Рисунок 12. Осциллограммы напряжения на входе (красный) и на выходе (синий) линии из 10 ячеек.

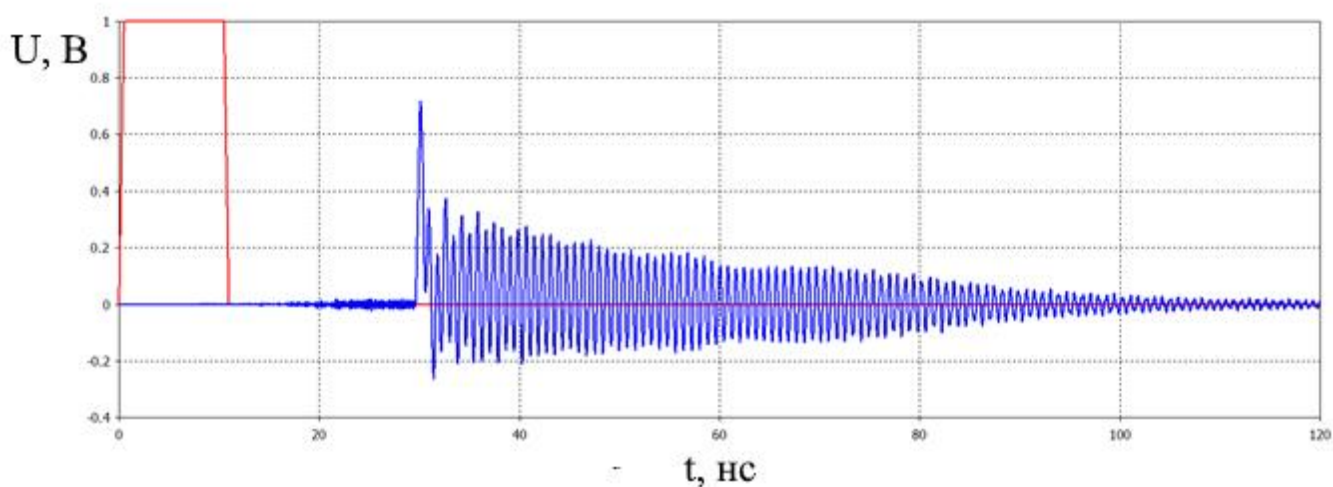


Рисунок 13. Преобразование видеоимпульса в радиоимпульс в линии из 100 ячеек. Красный – сигнал на входе, синий – сигнал на выходе.

Как уже отмечалось ранее, подход к генерации радиоимпульсов в линии с нелинейными емкостями, представляющие собой керамические конденсаторы, активно развивается в настоящее время [2]. В них диэлектрическая проницаемость керамики изменяется с увеличением значения напряженности электрического поля. Использование нелинейных емкостей в качестве обостряющего элемента в линиях с перекрестными



связями и нелинейными емкостями также представляется перспективным для формирования длинных (по сравнению с «традиционными» линиями) радиоимпульсов. Одним из ограничений такого подхода является то, что, максимальная частота, которая может распространяться в линии ограничена частотой отсечки. Для типичных экспериментов с линиями на нелинейной керамике эта частота составляет несколько МГц [1].

В линии с нелинейными емкостями длительность фронта изменяется из-за того, что в процессе нарастания фронта емкость конденсатора уменьшается, следовательно, скорость распространения электромагнитной энергии в линии увеличивается и задняя часть фронта догоняет его переднюю часть. Уменьшение времени нарастания может быть вычислено из следующего простого соотношения  $\Delta T = n(\sqrt{LC_0} - \sqrt{LC_s})$ , где  $n$  – число ячеек линии,  $C_0$  – значение емкости незаряженного конденсатора,  $C_s$  – емкость заряженного до максимального напряжения конденсатора,  $L$  – индуктивность ячейки. С целью увеличения частоты отсечки, было предложено не использовать сосредоточенные индуктивности в искусственной линии, что позволит существенно увеличить частоту отсечки, но существенно понизит волновое сопротивление линии. Для изучения обострения наносекундного фронта импульса была изготовлена линия с частотой отсечки 500 МГц ( $L=1.1$  нГн,  $C=970$  пФ в ненасыщенном состоянии и 350 пФ в насыщенном) и волновым сопротивлением 1 Ом. Результаты экспериментов по обострению наносекундного фронта представлены на рисунке 14. Для линии из 60 ячеек длительность фронта импульса была уменьшена с 124 нс до 87 нс, а для линии из 170 ячеек с 214 до 91 нс. Расчетные значения изменения фронта импульса составляют 25 и 71 нс. Расхождение в результатах, связано с более высокой индуктивностью ячейки изготовленной линии. Энергия импульса на нагрузке была меньше энергии изначального импульса примерно на 10%. Потери энергии связаны с 3 основными причинами: первое – небольшое рассогласование в линии и как следствие отражения, второе – энергия, затрачиваемая на сжатие импульса и третье – диэлектрические потери в X7R керамике.

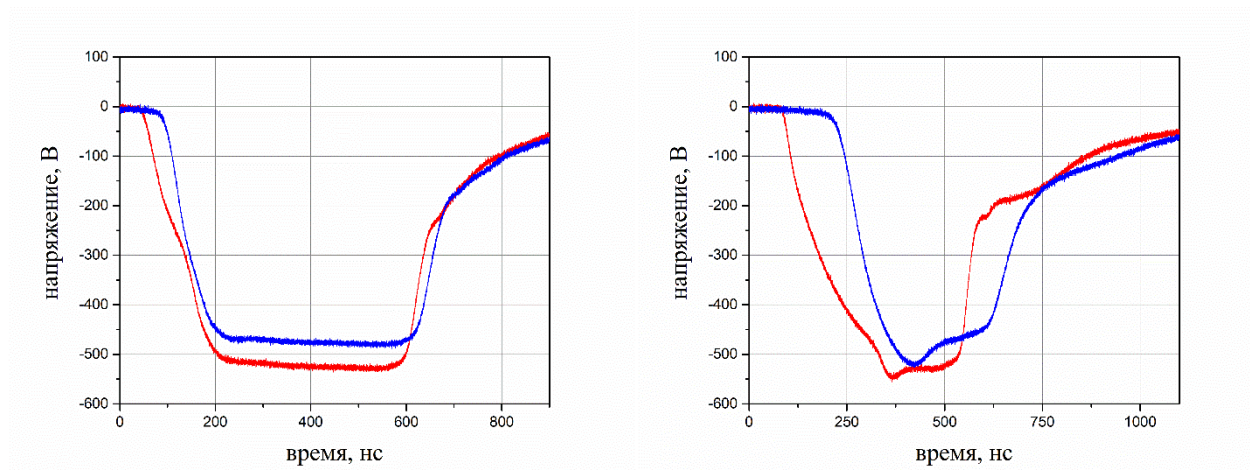


Рисунок 14. Обострение фронта в линии из 60 ячеек (слева) и в линии из 170 ячеек (справа). Красный – сигнал на входе, синий – сигнал на нагрузке.

## Выводы к разделу 2

В нелинейной передающей линии с пространственной дисперсией и газовыми разрядниками в каждой ячейке линии возможно прямое преобразование видеоимпульса в радиоимпульс. Предложенный способ представляется перспективным для возбуждения колебаний мегагерцового и гигагерцового диапазонов. Показано, что в линии с разрядниками происходит затухание фронта УЭМВ, что препятствует формированию квазистационарного цуга колебаний в линии и ограничивает его длину.

В численном моделировании показана возможность полного преобразования наносекундного видеоимпульса в радиоимпульс при его распространении в квазиполосковой линии с пространственной дисперсией и полупроводниковыми обостряющими диодами с энергетическим КПД 7%. В линии происходит возбуждение колебаний в интервале частот от 500 МГц до 2 ГГц с возможностью перестройки частоты за счет изменения коэффициента перекрестной связи.

В искусственной передающей линии с нелинейными емкостями и частотой отсечки выше 500 МГц происходит обострение наносекундного фронта импульса до значений в десятки наносекунд.

### **Раздел 3. Искажение формы СВЧ-импульса в следствии эффектов дифракции и дисперсии при калориметрических измерениях**

Калориметры с дискообразными, широкоапертурными поглощающими нагрузками, заполненные рабочей жидкостью на основе этилового спирта, успешно применяются для измерения энергии мощных импульсов СВЧ-излучения [13]. Важными характеристиками мощного СВЧ-импульса, определяемыми наиболее надёжно, именно, из измерений СВЧ-энергии являются амплитудное и пиковое значения СВЧ-мощности. В связи с этим очень важно правильно измерить форму огибающей импульса одновременно с измерением его энергии.

При измерении энергии СВЧ импульса, как правило, между излучающим рупором и поглощающей нагрузкой калориметра оставляют зазор (рисунок 15), хотя бы для того, чтобы механически отделить нагрузку от СВЧ-источника (дрожание нагрузки ведет к снижению чувствительности калориметра и уменьшению точности измерения энергии импульса). Излучение антенны, вследствие дифракции на внешнем крае нагрузки, попадает в область геометрической тени за нагрузкой, где образуется интерференционная картина. Амплитуда поля дифракции в этой области может существенно превышать амплитуду поля волны, прошедшей с ослаблением через поглощающую жидкость.

Дифракционное искажение формы импульсов, регистрируемых позади нагрузки (рисунок 15), по сравнению с падающим импульсом, объясняется тем, что формирование интерференционной картины на фронте падающего импульса и ее разрушение на спаде импульса за препятствием (нагрузкой) происходит вследствие задержки, определяемой разностью хода лучей от края препятствия до точки наблюдения. Таким образом, искажение формы импульса имеет место во внеосевых областях, где разность хода не равна нулю.

Уменьшить огибающие волны можно путем увеличения диаметра последнего (до размеров, сопоставимых с пространственной протяженностью импульса) или за счет более плотной стыковки рупора с поглощающей нагрузкой, в радикальном варианте – путем размещения калориметрической нагрузки непосредственно в выходном волноводе СВЧ-генератора без какого-либо радиального зазора, что исключает проникновение огибающих волн за нагрузку.

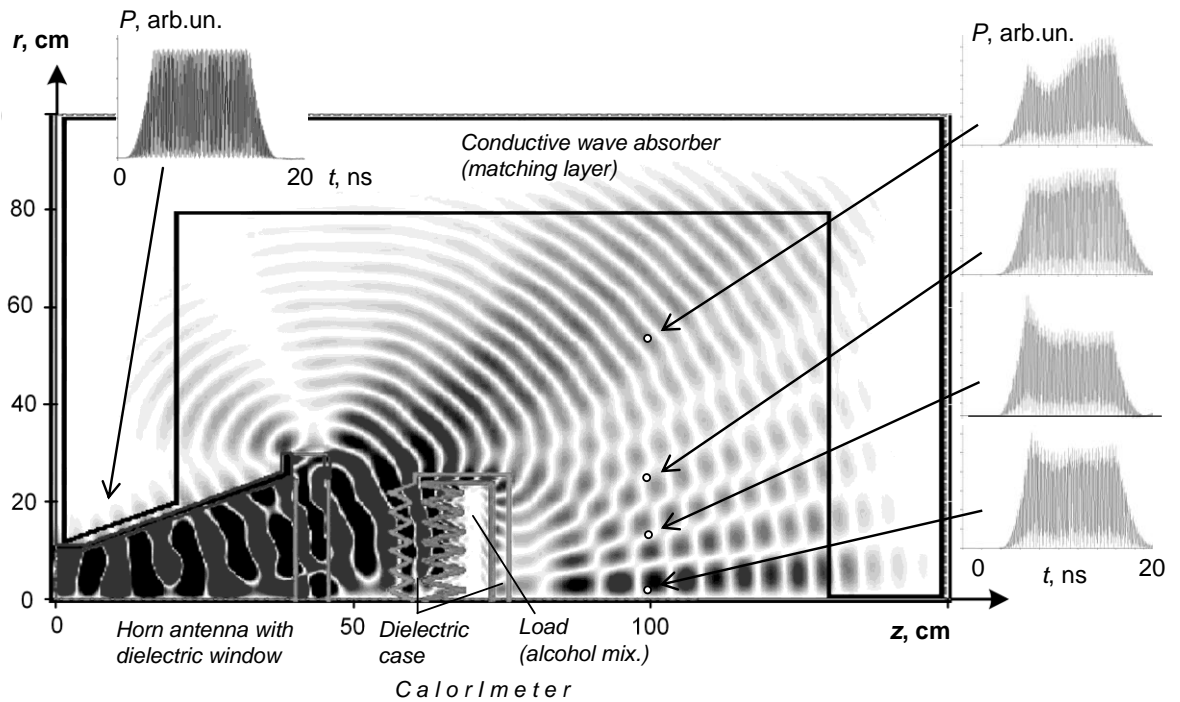


Рисунок 15. Распределение азимутальной компоненты вектора магнитной индукции для импульса с несущей частотой 3.8 ГГц, длительностью 16 нс, с фронтом и срезом 3 нс вблизи излучающего рупора и формы сигнала мощности в нескольких точках позади calorimetра.

Однако и тот ослабленный импульс, который проходит насквозь через поглощающую жидкость, может существенно отличаться по форме от падающего импульса. Это связано с зависимостью затухания волн в поглощающей смеси от частоты. Действительно, даже в приближении поглощающей среды с постоянной, не зависящей от частоты проводимостью, пространственный декремент затухания волны (толщина скин-слоя) обратно пропорционален квадратному корню из частоты. В результате, если затухание волны на основной частоте сильное (как это и происходит на практике), то в импульсе, достигшем тыльной стороны нагрузки, остаются преимущественно низкочастотные компоненты и его форма может радикально отличаться от исходной.

Вопрос искажения импульса в средах с частотнозависимым затуханием уже изучен в литературе. Однако, в литературе отсутствует информация об искажении микроволновых импульсов малой длительности, характерных для экспериментов СВЧ-электроники высоких мощностей. В данной работе изучалось искажение формы СВЧ-сигнала наносекундной длительности при его распространении в среде этилового спирта

для определения условий в которых возможна корректная регистрация формы огибающей импульса.

Распространение электромагнитной волны в среде может быть описано если известны ее диэлектрические свойства. Зависимости действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости для 95% этилового спирта брались из работы [14]. На рисунке 16 представлены зависимости действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости от частоты. Используя эти данные, можно получить зависимости коэффициента прохождения и сдвига фазы от частоты. Их роль играют мнимая и действительная части волнового вектора. Эти зависимости представлены на рисунке 16.

$$k', k'' = \pm \frac{k_0}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{(\varepsilon')^2 + (\varepsilon'')^2} \pm \varepsilon'} \quad (3.1)$$

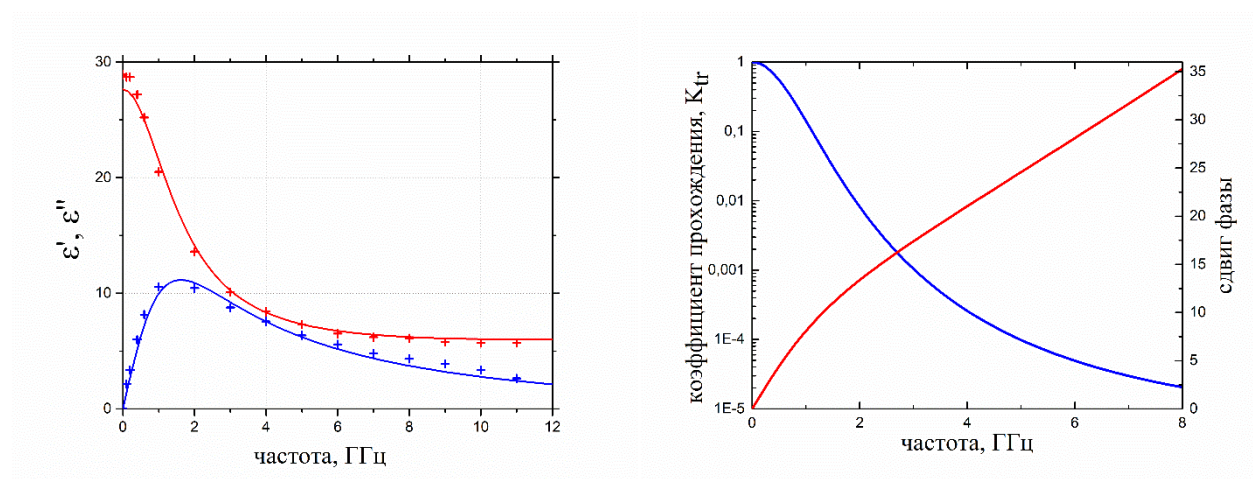


Рисунок 16. Зависимость диэлектрической проницаемости от частоты (Крест – экспериментальные данные, линия – аппроксимация) (слева). Зависимость коэффициента прохождения и сдвига фазы от частоты (справа).

Если имеется волновой пакет, который на границе среды (при  $z=0$ ) представлен интегралом Фурье

$$\mathbf{E}(0, t) = \text{Re} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{E}_{\omega}(\omega) e^{i\omega t} d\omega .$$

Далее этот пакет распространяется как суперпозиция монохроматических волн

$$\mathbf{E}(z, t) = \text{Re} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{E}_{\omega}(\omega) e^{i[\omega t - k(\omega)z]} d\omega ,$$

волновые числа которых определяются выражениями (3.1).

Таким образом, задавая на границе среды импульс произвольной формы и определяя для него комплексные амплитуды  $E_{\omega}(\omega)$ , можно получить форму импульса на требуемом удалении от границы среды. На рисунке 17 представлены сигналы и спектры этих сигналов с несущей частотой 4 ГГц и прямоугольной, трапецеидальной и колоколообразной огибающей до и после 8 см этилового спирта. Такая длина спирта является характерной для широкоапертурных СВЧ калориметров для несущей частоты 4 ГГц.

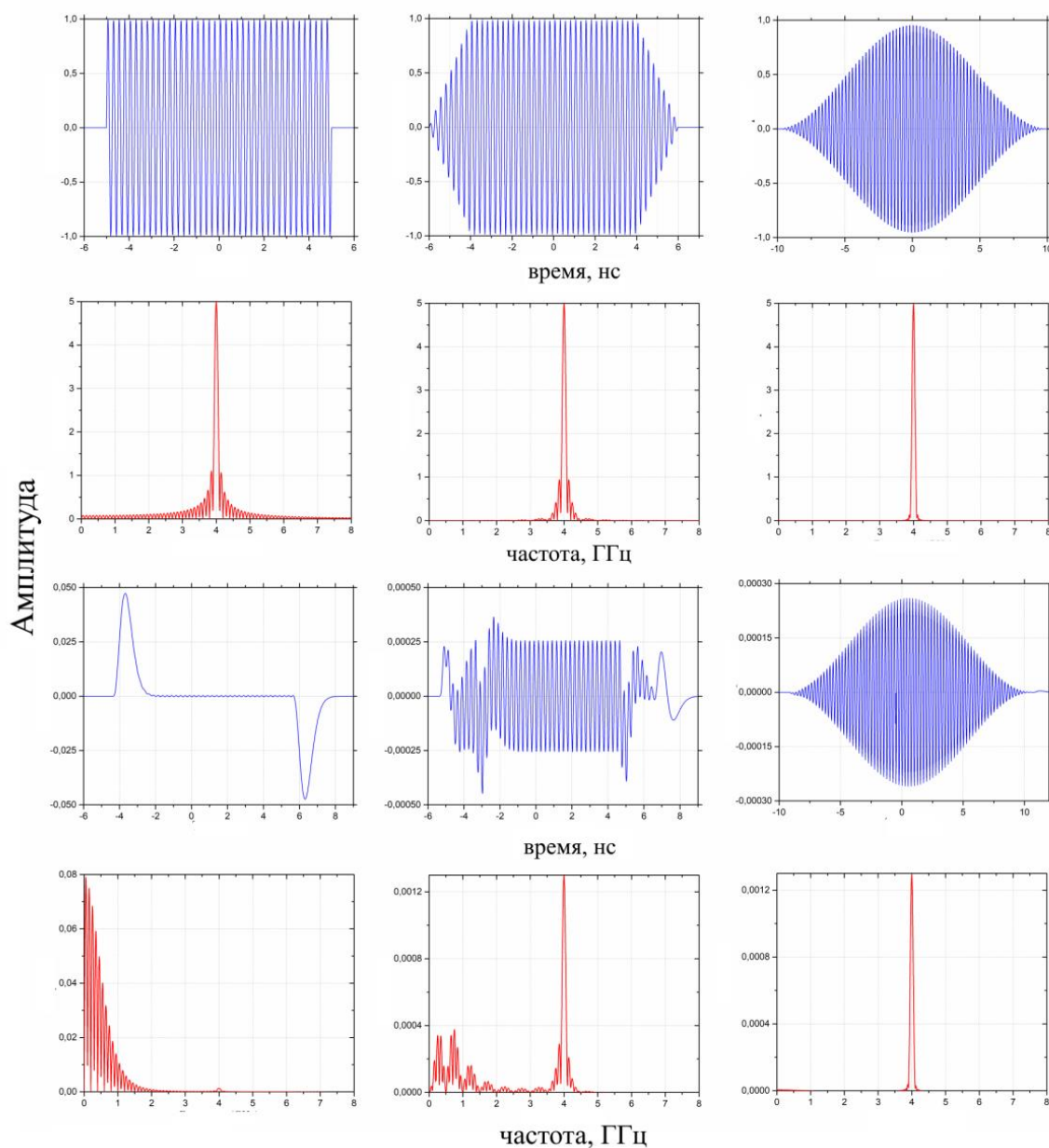


Рисунок 17. Формы сигналов и их спектры до и после прохождения 80 мм в спирте.

Зависимости  $\varepsilon'(\omega)$  и  $\varepsilon''(\omega)$  в эксперименте получают, вообще говоря, для квазистационарных монохроматических колебаний (для длинных волновых импульсов). Это означает, что и поляризация в среде устанавливается в виде стационарных колебаний. Поэтому расчеты на основании вышеизложенного подхода можно с уверенностью применять, строго говоря, только для сравнительно длинных импульсов. Интерес же представляют расчеты и для импульсов произвольной формы, в том числе и таких, в которых число колебаний невелико: широкополосных и сверхширокополосных. В этих случаях целесообразно уже напрямую численно решать уравнения Максвелла для электромагнитных волн. В рамках данной задачи была разработана одномерная FDTD модель распространения электромагнитной волны в спирте с использованием пакета прикладных математических программ Scilab.

При численном расчете распространения электромагнитной волны в среде методом FDTD свойства среды определяются тем током, который возникает в среде под действием электромагнитного поля. Этот ток стоит в правой части одного из уравнений Максвелла:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}. \quad (3.2)$$

В случае диэлектрической среды с потерями, каковой и является спирт, можно использовать модель Лоренца [15], согласно которой поляризация в среде создается смещением электронных осцилляторов, колеблющихся под действием электрического поля. Пусть в среде присутствует осциллятор с концентрацией  $n$ , частотой собственных колебаний  $\omega$  и декрементом затухания  $\Gamma$ , тогда можно записать выражение для плотности тока создаваемой таким осциллятором:

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \Gamma \frac{\partial}{\partial t} + \omega^2 \right) \mathbf{j} = \frac{\omega_p^2}{4\pi} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}. \quad (3.3)$$

В расчетах использовались следующие параметры для осцилляторов  $\varepsilon_b = 7$ ,  $\omega_p = 157$  ГГц,  $\omega = 34.6$  ГГц,  $\Gamma = 126$  ГГц. Формы сигналов после 80 мм этилового спирта в FDTD моделировании для тех же форм огибающих, рассмотренных ранее, представлены на рисунке 18.

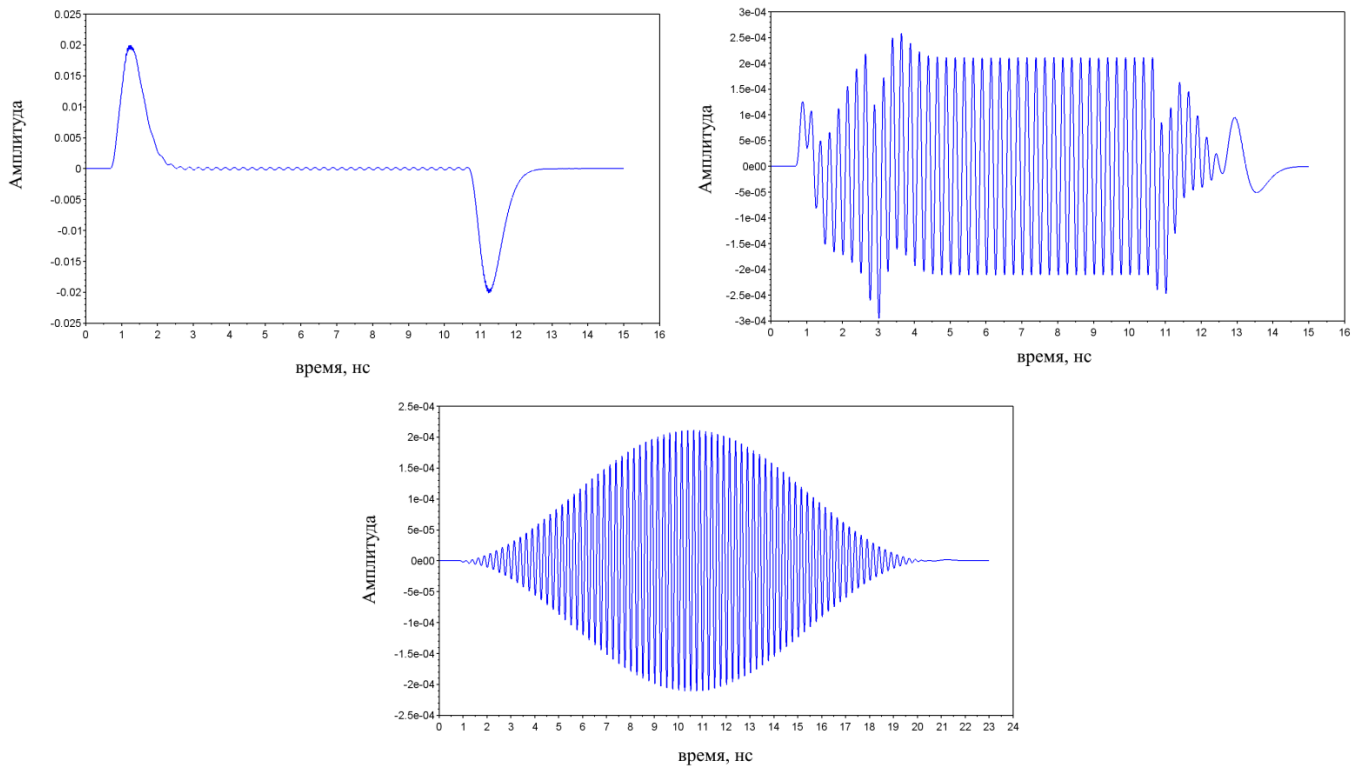


Рисунок 18. Формы сигналов, полученные в численном эксперименте после прохождения ими 80 мм спирта.

Результаты расчетов с использованием преобразования Фурье и FDTD методом хорошо согласуются между собой. Они показывают, что по мере распространения СВЧ импульсов в спирте может происходить искажение их формы. Причем максимально искажается импульс с прямоугольной огибающей, а минимально с «колоколообразной». Это различие объясняется тем, что при одинаковой длительности на полувысоте эти импульсы имеют существенно различную ширину спектра исходного импульса. Максимальную ширину спектра имеет импульс с огибающей прямоугольной формы, минимальную – «колоколообразный». Поскольку коэффициент передачи сильно уменьшается с ростом частоты, максимальное затухание имеют высокочастотные компоненты спектров импульсов. При этом чем шире спектр, тем сильнее искажение импульса. В зависимости от длительности фронта импульса, длительности самого импульса и несущей частоты импульсы с одной и той же формой огибающей могут изменять свою форму или оставаться неизменными. Например, импульс с такой же трапецидальной огибающей с теми же временными параметрами, как импульс, рассмотренный выше, не будет изменять свою форму при несущей частоте ниже 2.5 ГГц.



В описанном выше моделировании волна распространяется в неограниченной и однородной среде в поперечном направлении. Рассмотрим ситуацию, близкую к экспериментальной, когда калориметрическая нагрузка размещена без радиального зазора на пути волновода в котором может быть помещен СВЧ детектор.

Ниже представлены результаты моделирования (с использованием RZ-версии кода KARAT) слоистой калориметрической нагрузки, имеющей ребристое входное окно, с эффективной толщиной спиртовой смеси около 8 см, помещенной в волновод с радиусом 24 см, рисунок 19. Прямоугольный импульс со структурой поля ТМ<sub>01</sub> длительностью 10 нс падает на нагрузку. Несущая частота импульс составляет 4 ГГц. За нагрузкой установлен более узкий волновод радиуса R с открытым концом, имитирующий входной волновод детектора. Для подавления отражений от правой границы системы (как снаружи, так и внутри принимающего волновода) пространство справа от  $z = 80$  см заполнено омическим поглотителем.

Моделировался квадратичный детектор, который определяет мощность электромагнитной волны посредством регистрации потока вектора Пойнтинга через окружность с радиусом 3 см, расположенный в приемный волновод при  $z = 79$  см, то есть на расстоянии 19 см от края волновода. Это расстояние значительно превышает «вакуумную» длину волны на несущей частоте (7,5 см). Радиус R принимающего волновода будет постепенно увеличиваться, начиная с критического радиуса для самой низкой симметричной волны ТМ<sub>01</sub> на этой частоте.

При радиусе принимающего волновода, немного превышающем критический для этого режима, импульс, регистрируемый детектором, в основном содержит колебания на несущей частоте, но форма записанного импульса лишь отдаленно напоминает прямоугольную. С увеличением радиуса принимающего волновода (и уменьшением его критической частоты) в сигнале начинают доминировать все более низкие и низкие частоты, и форма импульса резко искажается, приобретая всплески, соответствующие фронту и срезу исходного импульса. Однако ситуация с одиночными монополярными скачками на фронтах, подобная той, которая показана ранее не достигается. При расширении приемного волновода до полного радиуса пути волновода (24 см) регистрируются колебания с частотой, близкой к критической частоте моды ТМ<sub>01</sub> для этого радиуса ( $\sim 0,5$  ГГц).

Если волновая мода, падающая на калориметрическую нагрузку, выше, чем  $TM_{01}$ , то эволюция импульса, обнаруженного «детектором», будет еще более сложной.

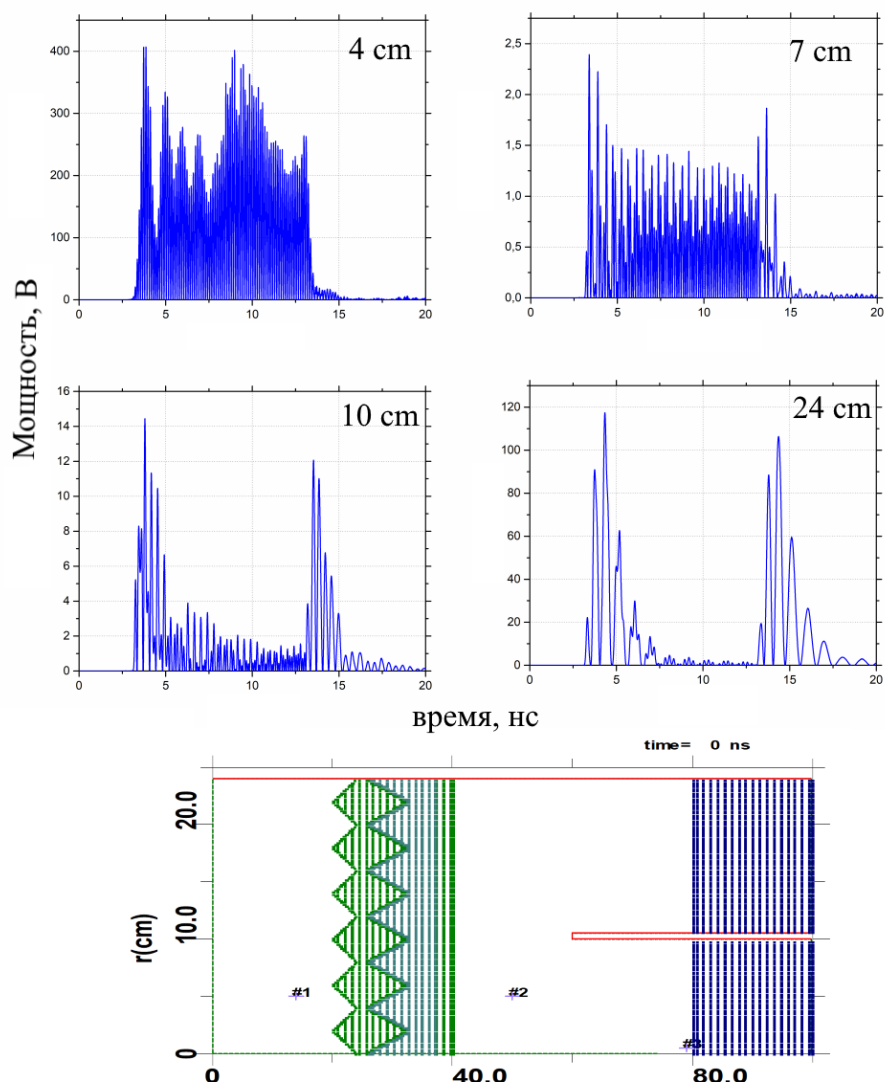


Рисунок 19. Расчетная геометрия и формы потока мощности внутри волновода для различных радиусов (4, 7, 10 и 24 см).

### Выводы к разделу 3

При регистрации наносекундного СВЧ-импульса с помощью антенны и детектора, расположенных за широкоапертурной дискообразной поглощающей нагрузкой калориметра, использующего этиловый спирт в качестве рабочей жидкости, следует учитывать факторы, искажающие форму импульса, обусловленные дифракцией волн на нагрузке и дисперсионные эффекты. Эти факторы особенно выражены в L и S диапазонах. Для регистрации импульсов в этом случае можно использовать ответвители, включенные в выходной волновод мощного импульсного СВЧ-генератора.

Степень искажения формы СВЧ-импульса существенно определяется начальной формой его огибающей. Искажение максимально для импульса с крутыми фронтами и срезом и минимально – для плавно нарастающего плавно спадающего (колоколообразного) импульса. В зависимости от длительности фронта импульса, длительности самого импульса и несущей частоты импульсы с одной и той же формой огибающей могут изменять свою форму или оставаться неизменными.

### **Обоснование достоверности полученных результатов**

Достоверность результатов, полученных в разделе 1, обуславливается хорошим согласованием предварительных расчетов и результатов эксперимента. Достоверность экспериментальных данных обуславливается использованием опробованных методик измерений и использованием проверенного измерительного оборудования. Достоверность результатов раздела 2 и 3 обуславливается использованием современных методов и алгоритмов моделирования задач электродинамики. Достоверность результатов численного моделирования также обуславливается устойчивостью разностных схем к изменению пространственного и временного шага. Достоверность результатов раздела 3 обуславливается хорошим согласованием результатов, полученных методом преобразования Фурье и FDTD методом.

### **Обоснование новизны, научной и практической ценности результатов исследования**

Изучалась работа импульсного одновиткового трансформатора с насыщенным во внешнем магнитном поле магнитопроводом с первичной и вторичной обмоткой, выполненной в виде двух короткозамкнутых коаксиальных линий. Экспериментально получено, что в схеме импульсного трансформатора не происходит возбуждение гиромагнитной прецессии вследствие сильного ослабления ортогональной к оси симметрии коаксиала составляющей магнитного поля. Предложенная и реализованная конструкция импульсного трансформатора, имеющая энергетический КПД более 60% и не искажающая формы передаваемого импульса, может быть использована в системах, где требуется гальваническая развязка.

Впервые рассматривается подход к генерации радиоимпульсов при распространении УЭМВ в линиях с перекрестной емкостной связью и периодическими

обострителями фронта импульса (газовые разрядники, полупроводниковые диоды). Показано, что в линии с разрядниками происходит затухание фронта УЭМВ, что приводит к прекращению формирования квазистационарного цуга колебаний в линиях с большим количеством звеньев. Предложенный в разделе 2 макет нелинейной передающей линии с перекрестными связями и обостряющими диодами позволяет уменьшить размеры СВЧ генераторов. Проведены оценки эффективности, позволяющие предположить длину линии, в которой может наблюдаться максимальный КПД. Результаты экспериментов по обострению наносекундного фронта в линии с нелинейной керамикой указывают на возможность создания нелинейных линии, в которых возможно получение колебаний с частотами выше 500 МГц.

Рассмотрена задача об искажении формы наносекундного СВЧ импульса при его распространении в среде этилового спирта. Показано, что в зависимости от длительности импульса, длительности нарастания и спада импульса и частоты колебаний форма СВЧ сигнала может быть искажена. На основе данных об искажении импульса СВЧ излучения при его распространении в этиловом спирте является возможным определить условия для корректной регистрации формы СВЧ сигнала при его прохождении через слой поглощающей жидкости широкоапертурного калориметра.

### **Сведения об опубликовании результатов исследований в рецензируемых научных журналах**

По результатам исследований было опубликовано 5 статей из них 2 индексируемые в базе Web of Science и 3 в Scopus.

1. Romanchenko I.V., Pripitnev P.V., Rostov V.V. – RF pulse formation dynamics in gyromagnetic nonlinear transmission lines. // Journal of Physics: Conference Series 830(1),012034
2. Tarakanov, V.P., Klimov, A.I., Pegel, I.V., Pripitnev, P.V., Totmeninov, E.M. - Time-dependent numerical simulation of diffraction and absorption effects in diagnostics of short high-power microwave pulses using wide-aperture liquid calorimeters. // European Physical Journal Web of Conferences. – 2017. – V. 149. – No 04046.
3. Prudaev, et. al - The avalanche S-diode based on GaAs with deep levels: A high-current microwave switch. // Proceedings of EAPPC & BAEMS 2018 (Changsha, China, Sept. 16-20, 2018). pp. 82-85.

4. Pripitnev P.V., et. al - Nanosecond front dynamics and rf oscillation generation in a transmission line with nonlinear capacitors. // Proceedings - 2018 20th International Symposium on High-Current Electronics, ISHCE 2018 8521185 p. 85-88.

5. Припутнев П.В., Романченко И.В., Ростов В.В. – Гироманитный импульсный трансформатор для генерации наносекундных сверхвысокочастотных импульсов. // Радиотехника и электроника. Т. 64. № 3. С. 310-314.

Одна публикация направлена в печать и находится в стадии рецензирования:

Pripitnev P.V., Klimov A.I, Pegel I.V., Tarakanov V.P, Totmeninov E.M. – Effects of diffraction, dispersion and absorption of electromagnetic waves in a diagnostics of high-power microwave pulses using wide-aperture liquid calorimeters. // IEEE Transaction on Antennas and Propagation

### **Сведения о представлении результатов исследований на международных и всероссийских конференциях**

Результаты работы были представлены на одной международной конференции 20<sup>th</sup> International Symposium on High-current Electronics (Россия, город Томск, 16—22 сентября 2018 года).

### **Сведения о личном вкладе аспиранта в получение результатов научного исследования**

Совместно с научным руководителем автором были составлены планы научных исследований и сформулированы основные задачи. Автор участвовал в обсуждении и анализе результатов, в разработке конструкций экспериментальных макетов, обработке экспериментальных данных. Все аналитические и численные расчеты были проведены лично автором. Все эксперименты, проведенные в рамках работы, были выполнены при непосредственном участии автора работы. По материалам проведенной работы автором лично написано 4 публикации.

### **Список цитируемой литературы**

1. Rossi J.O., et. Al. – Practical constraints on nonlinear transmission lines for RF generation. // IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 47, issue 1, pp. 1000-1016, 2019.

2. Ikezi H., DeGrassie J.S., Drake J. – Soliton generation at 10 MW level in the very high frequency band. // Applied Physics Letters, vol. 58, no. 9, pp. 986-987, 1991.

3. Seddon N., Spikings C.R., Dolan J.E. – RF pulse formation in nonlinear transmission lines. // Proc. 16<sup>th</sup> IEEE Int. Pulsed Power Conf. Albuquerque, NM, USA, pp. 678-681, 2007.
4. Romanchenko I.V., et. Al. – Repetitive sub-gigawatt RF source based on gyromagnetic nonlinear transmission line. // Review of Scientific Instruments, vol. 83, no. 7, pp. 074705-074705-6, 2012.
5. Shaw H.J., Elliott B.J., Harker K.J., Karp A. – Microwave generation in pulsed ferrites. // Journal of applied physics, vol. 37, no. 3, pp. 1060-1066, 1966.
6. Белянцев А.М. и др. – Генерация радиоимпульсов ударной электромагнитной волной в линии передачи с ферритом. // Журнал технической физики, том 65, № 8, стр. 132-142, 1995.
7. Klimov A.I., Kovalchuk O.B., Rostov V.V., Sinyakov A.N. - Measurement of Parameters of X band High Power Microwave Superradiative Pulses. // IEEE Transactions of Plasma Science, vol. 36, no. 3, pp. 661-664, 2008.
8. Гапонов А.В., Островский Л.А., Фрейдман Г.И. – Ударные электромагнитные волны. // Известия высших учебных заведений – радиофизика, том 10, № 9-10, стр. 1376-1413, 1967.
9. Rompe R., Weizel W. – Uber das Toeplersche Funkengesetz. // Z. Phys. Bd. 122, s. 9-12, 1944.
10. Прудаев И.А. и др. - Задержка переключения лавинных s-диодов в схеме с оптическим запуском // ПТЭ. №4. С. 80-82, 2011.
11. Shi Wei, et. Al. - Large current GaAs PCSS triggered by a laser diode // IEEE photonics technology letters. vol. 26, no. 21, pp. 2158-2161, 2014.
12. Гусев А.И., и др. - Пикосекундное переключение тока высокой плотности (60 кА/см<sup>2</sup>) кремниевым коммутатором на основе сверхбыстрого фронта ионизации // ФТП. том. 48, стр. 1095–1106, 2014.
13. Shkvarunets A.G. - A broadband microwave calorimeter of large cross section. // Instruments and Experimental Techniques, vol. 39, no. 4, pp. 535–538, 1996.
14. Jian-Zhong Bao J.-Z., Swicord M.L., Davis C.C. - Microwave dielectric characterization of binary mixtures of water, methanol, and ethanol. // Journal of Chemical Physics, vol. 104, no. 12, pp. 4441-4450, 1996.
15. Lorentz H.A. - The theory of electrons and its applications to the phenomena of light and radiant heat. // Leipzig: B.G. Teubner, 1916.