

Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки  
**ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОФИЗИКИ**  
Уральского отделения  
Российской академии наук  
(ИЭФ УрО РАН)

Амундсена ул., д.106, г. Екатеринбург, 620016

Тел. (343) 267-87-96 Факс (343) 267-87-94

ОКПО 04839716 ОГРН 1026604936929

ИНН/КПП 6660007557/667101001

23.07 2024 г. № 16346-1256-169

на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ИЭФ УрО РАН

д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН

Чайковский С.А.

«23» июль 2024 г.



### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу ПРИПУТНЕВА Павла Владимировича  
«Формирование мощных наносекундных высокочастотных импульсов в частично запол-  
ненных ферритом коаксиальных линиях с различными дисперсионными свойствами»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.3.5 – физическая электроника

#### Актуальность темы

Среди новых и перспективных СВЧ систем отдельную группу составляют нелинейные передающие линии (НПЛ) с ферритовым заполнением. По своим характеристикам в дециметровом диапазоне длин волн они сравнимы с пучковыми приборами СВЧ-электроники. Мощность генерируемых импульсов в НПЛ может достигать сотен МВт при частоте следования импульсов до 1 кГц. В настоящее время идет интенсивное исследование и развитие таких систем как у нас в России, так и в зарубежных исследовательских центрах. В этом аспекте диссертационная работа Припутнева П.В. представляет собой классический пример, поскольку направлена на усовершенствование НПЛ-систем, их экспериментальное и теоретическое исследование. В частности, автором предложено периодическое расположение колец из постоянных магнитов и ферритов, что устраняет необходимость применения соленоида для создания внешнего продольного магнитного поля. Результаты исследования могут найти широкое применение при разработке мощных им-

пульсных СВЧ генераторов. Актуальность темы выполненной работы сомнений не вызывает.

### **Оценка содержания работы и ее завершенности**

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, двух приложений и списка цитируемой литературы с общим объемом 175 страниц, включая 103 рисунка. Список цитируемой литературы включает 106 наименований. Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и основные задачи исследований, показана теоретическая и практическая значимость полученных результатов, отражена их научная новизна и представлены положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** носит обзорный характер, в ней рассмотрены основные результаты развития технологии нелинейных передающих линий с ферритом. Рассмотрена теория ударных электромагнитных волн и дано описание ферритовых линий для обострения фронта импульса напряжения. Приведены результаты по разработке одноканальных и многоканальных СВЧ источников на основе коаксиальных линий с насыщенным ферритом.

Во **второй главе** описаны результаты численного моделирования линий с насыщенным ферритом FDTD методом с использованием кода KARAT. Показано, что частота колебаний на выходе НПЛ с насыщенным ферритом имеет сильную зависимость от поперечных размеров линии и радиуса ферритовых колец при фиксированных значениях продольного магнитного поля подмагничивания и азимутального поля в ферритовом кольце. Установлен оптимальный коэффициент поперечного заполнения линии ферритом, при котором в выходном импульсе наблюдается максимальная амплитуда первого колебания. Также показано, что максимальная эффективность преобразования энергии входного импульса в ВЧ колебания наблюдается при импедансе коаксиала в диапазоне 25–35 Ом.

**Третья глава** посвящена численному моделированию и экспериментальному исследованию влияния конфигурации коаксиальной линии с ферритом и полярности входного импульса напряжения на эффективность генерации колебаний. Выявлено, что на мощность и частоту колебаний оказывает влияние расположение ферритовых колец внутри линии. Оптимальному варианту соответствует расположение колец, когда зазор между кольцами и внутренним электродом отсутствует. Также установлено влияние полярности входного импульса на мощность и частоту генерируемых колебаний на выходе линии. Показано, что мощность колебаний выше при отрицательной полярности входного им-



пульса, а частота колебаний, наоборот, выше при положительной полярности входного импульса.

В **четвертой главе** предложена модель процесса возбуждения колебаний в однородной ферритовой линии. Показано, что за формирование выходного ВЧ импульса отвечают два конкурирующих процесса: обострение фронта импульса напряжения и дисперсионное уширение импульса. При этом рост частоты возбуждаемых колебаний при уменьшении поперечных размеров линии определяется дисперсионной характеристикой волны типа  $E_{00}$ .

В **пятой главе** представлена конфигурация коаксиальной нелинейной передающей линии с насыщенным ферритом в магнитном поле колец из постоянных магнитов. Для установки магнитов используется линия с гофрированным внутренним проводником. Такое техническое решение устраняет необходимость применения соленоида для создания внешнего продольного магнитного поля. Преимущество такой системы подмагничивания также состоит в том, что кольца из постоянных магнитов создают магнитное поле не во всем объеме линии, как это происходит при использовании внешнего соленоида, а лишь в малой части объема, только там, где расположены ферритовые кольца. Показано, что дисперсионная зависимость коаксиальной передающей линии с гофрированным внутренним проводником аналогична дисперсионной зависимости дискретной линии передачи с емкостными связями между соседними ячейками линии.

**Шестая глава** посвящена экспериментальному исследованию нескольких конфигураций линии с гофрированным внутренним проводником и ферритом, насыщенным в поле постоянных магнитов. Эффективность преобразования энергии входного импульса в энергию выходных ВЧ колебаний лежит в диапазоне 2–6%. В экспериментах получено рекордное значение пиковой мощности для линий с насыщенным ферритом – 800 МВт. Длительность высокочастотного импульса в линии составляет 6 нс, центральная частота колебаний – 2.7 ГГц.

Результаты работы опубликованы в 5 статьях в отечественных и зарубежных рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, в 5 докладах, опубликованных в трудах международных конференций и симпозиумов, также получен 1 патент на изобретение. Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы подтверждена практической реализацией научных положений и выводов.

Таким образом, можно заключить, что работа хорошо выстроена логически, подробно изложена и является завершенной.

### **Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и теме**

Содержание диссертации полностью отвечает заявленной специальности и теме.

### **Соответствие автореферата диссертации её содержанию**

Автореферат диссертации в полной мере отражает ее содержание.

### **Личный вклад соискателя в получении результатов исследования**

В докладе и ответах на вопросы Припутнев П.В. показал свою компетентность и высокую квалификацию. Нет сомнений в том, что он является автором приведенных в работе защищаемых положений и выводов.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Выполненные в рамках диссертационной работы исследования включают численное моделирование и эксперименты. Полученные данные хорошо сопоставимы друг с другом и обладают воспроизводимостью. Результаты, полученные в работе, согласуются с результатами исследований по данной тематике, представленными в литературе.

### **Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов**

Теоретическая значимость работы состоит в том, что автор построил физическую модель возбуждения высокочастотных колебаний в ферритовой НПЛ, которая позволяет объяснить зависимости частоты возбуждаемых колебаний от поперечных размеров линии и диэлектрической проницаемости ферритов.

Практическая ценность работы также очевидна. Использование постоянных магнитов для насыщения феррита приводит к значительному улучшению массогабаритных характеристик генераторов и СВЧ источников на основе НПЛ. При этом увеличивается полная энергетическая эффективность устройства из-за отсутствия соленоида и системы его питания.

### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Результаты и выводы диссертации Припутнева П.В., полученные при исследовании коаксиальных линий частично заполненных ферритом, могут быть использованы при разработке мощных СВЧ генераторов в таких организациях, как ИЭФ УрО РАН, ИПФ РАН, ФИ РАН, ИОФ РАН, а также в некоторых институтах Росатома.

### **Оценка новизны и научной ценности результатов исследований**

Анализ материалов, изложенных в диссертации Припутнева П.В., показал, что во всех положениях, вынесенных автором на защиту, присутствует научная новизна.



### Замечания по диссертационной работе

1. Общее замечание по оформлению: рукопись содержит значительное количество опечаток.
2. Весь раздел «Научная новизна», состоящий из 5 пунктов, не содержит ни одного числового параметра. В отрыве от текста диссертации нет возможности оценить амплитудный и временной диапазон существования выявленных закономерностей.
3. При переходе от однородной ферритовой линии к гофрированной с установкой постоянных кольцевых магнитов снижается продольный коэффициент заполнения линии ферритами. По рис. 5.7. этот коэффициент близок к значению 0.45. В диссертации отсутствует анализ изменения размаха колебаний (мощности СВЧ компоненты выходного импульса) и периода колебаний при снижении продольного коэффициента заполнения линии ферритами.
4. Часть результатов опирается на анализ свойств волны  $E_{00}$ . Вопрос является важным, но при этом недостаточно четко обоснован такой подход.
5. В работе отсутствует объяснение того факта, что при положительной полярности входного импульса напряжения частота колебаний выше, чем при отрицательной полярности. По графикам на рис. 3.13 это увеличение достигает  $\sim 1.3$  раза. Хотя все условия, определяющие частоту колебаний, остаются неизменными: поперечные размеры линии и ферритового заполнения, продольное магнитное поле смещения, амплитуда входного импульса (азимутальное магнитное поле в линии).
6. Раздел 3.5. Нет численных параметров или графиков, отражающих увеличение выходной мощности при отрицательной полярности входного импульса в сравнении с положительной полярностью (хотя это входит в защищаемое положение 1). А для частоты колебаний, которая не входит в защищаемое положение 1, такие графики построены.

Указанные замечания не снижают общую позитивную оценку выполненного исследования, значимость и достоинства работы.

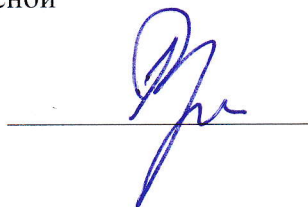
### Заключение

В целом, диссертация Припутнева П. В. является научно-квалификационной работой, которая вносит существенный вклад в развитие твердотельной электроники и мощной высокочастотной импульсной электроники. Диссертация отвечает требованиям п.9 «По-

ложения о присуждении ученых степеней» ВАК РФ, утвержденного постановлением правительства Российской Федерации от 24.09.2013г. № 842 (в современной редакции), а ее автор Припутнев Павел Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5 – физическая электроника.

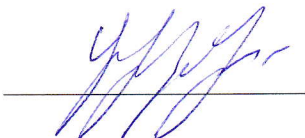
Материалы диссертации Припутнева П. В. "Формирование мощных наносекундных высокочастотных импульсов в частично заполненных ферритом коаксиальных линиях с различными дисперсионными свойствами ", а также отзыв на диссертацию рассмотрены на расширенном семинаре лаборатории импульсной техники и лаборатории электронных ускорителей ИЭФ УрО РАН 10 июля 2024 года (Протокол № 5).

Заведующий лабораторией импульсной  
техники ИЭФ УрО РАН, д.т.н.,  
член-корреспондент РАН



Рукин Сергей Николаевич  
«23» июля 2024 г.

Старший научный сотрудник лаборатории электронных  
ускорителей ИЭФ УрО РАН,  
к.т.н.



Ульмаскулов Марат Рахметович  
«23» июля 2024 г.

Подписи Рукина С.Н. и Ульмаскулова М.Р. удостоверяю:  
ученый секретарь ИЭФ УрО РАН,  
к.ф.-м.н.



Кокорина Елена Евгеньевна  
«23» июля 2024 г.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН)  
620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106  
Тел.: 8 (343) 267-87-96  
Факс: (343) 267-87-94  
E-mail: admin@iep.uran.ru