

УТВЕРЖДАЮ

Врио директора  
Федерального  
государственного  
бюджетного научного  
учреждения «Федеральный  
исследовательский центр  
Институт прикладной  
физики Российской  
академии наук»,  
член-корреспондент РАН



Г.Г. Денисов

» 03 2019 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» на диссертацию Романченко Ильи Викторовича «Генерирование мощных наносекундных импульсов электромагнитного излучения на основе линий с ферритом», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

#### Актуальность темы исследования

Исследования методов генерирования мощных импульсов электромагнитного излучения при импульсном перемагничивании феррита, помещенного в передающую линию, представляют значительный научный интерес и имеют различные практические приложения. В настоящее время в мире интенсивно ведутся исследования в направлении создания генераторов мощных радиоимпульсов на основе нелинейных передающих линий, где в качестве дискретных нелинейных элементов применяются нелинейные емкости или индуктивности. При этом, частота генерации таких устройств не превышает нескольких сотен мегагерц. Особое место среди исследований нелинейных передающих линий занимают исследования линий с непрерывным заполнением ферритом, которым посвящена диссертационная работа И.В. Романченко. Как показано автором в представленных в работе экспериментах, благодаря возбуждению гиромагнитной прецессии в линиях с ферритом удается реализовать генерацию на частотах от сотен мегагерц до единиц гигагерц при субгигаваттном уровне излучаемой мощности. Значительное внимание в работе уделено теоретическому описанию возбуждения высокочастотных колебаний в линии с ферритом на частоте синхронизма фазовой скорости и скорости ударного фронта электромагнитной волны. Установленные в экспериментах закономерности, подтверждаемые теоретическими выкладками, позволили автору с сотрудниками создать ряд источников мощных

наносекундных радиоимпульсов с эффективностью преобразования электрического импульса в излучение, достигающей 10%. Автором исследована возможность применения линии с ферритом в качестве управляемой линии задержки высоковольтных импульсов в экспериментах с макетами многоканальных генераторов мощных импульсов излучения, что открывает новые перспективы по достижению высокой плотности мощности излучения в максимуме диаграммы направленности таких генераторов.

### **Оценка содержания работы, ее завершенности**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 137 наименований, и одного приложения. Общий объем диссертации составляет 220 страниц, включая 163 рисунка.

Во введении показана актуальность исследований, сформулированы цели и задачи работы, представлены научная новизна и практическая ценность результатов, приведены защищаемые научные положения и сведения о публикациях автора по теме диссертации.

Первая глава посвящена теоретическому анализу возбуждения высокочастотных колебаний ударным фронтом высоковольтного импульса, распространяющегося по коаксиальной передающей линии с насыщенным ферритом. Рассмотрено образование ударного фронта электромагнитной волны в линии с насыщенным ферритом и условие его синхронизма с возбуждаемой ТЕМ-волной, определяющее частоту генерируемых колебаний. Проведен анализ решения для ТЕМ-волны и волны намагниченности в виде стационарных нелинейных колебаний, а также анализ зависимости частоты полученных решений от приложенных магнитных полей. Дана теоретическая оценка максимального КПД преобразования монополярного высоковольтного импульса в высокочастотные колебания. Дан вывод модифицированного уравнения Кортевега-де Вриза для описания нестационарной динамики формирования колебаний в линии с ферритом. При учете потерь в ферритах получены решения в виде стационарных ударных волн с затухающими колебаниями за фронтом, соответствующие экспериментально наблюдаемым осциллограммам напряжения.

Во второй главе представлены результаты экспериментальных исследований возбуждения высокочастотных колебаний в линии с насыщенным ферритом. Рассмотрена динамика возбуждения колебаний при распространении высоковольтного импульса по нелинейной линии. Показано, что максимальная амплитуда возбуждаемых колебаний достигается на длине линии до 1 м и соответствует теоретическим оценкам. На основе экспериментов с десятью различными конфигурациями линий с ферритом сделан вывод об оптимальном коэффициенте поперечного заполнения коаксиальной линии ферритом. Приведены результаты испытаний с различными вариантами высоковольтной изоляции линии. Показано, что для эффективного возбуждения колебаний использование вакуумного масла предпочтительнее по сравнению с трансформаторным маслом и элегазом. Показано, что длительность возбуждаемого цуга колебаний ограничена 3-5 наносекундами из-за потерь в феррите.

В третьей главе изложены результаты работ по исследованию частотных характеристик возбуждаемых колебаний от параметров нелинейной передающей линии. Показано, что ширина спектра цуга возбуждаемых колебаний составляет  $\sim 0.5$  ГГц по уровню -10 дБ при центральной частоте генерации от 0.6 до 2.5 ГГц. Показана возможность перестройки частоты генерации при изменении напряжения и поля подмагничивания линии с ферритом. Указано на вероятность возбуждения высших мод в линии с ферритом в процессе возбуждения колебаний, в частности моды  $TE_{11}$ . Сделан вывод о том, что низкочастотные паспортные свойства исследованных NiZn ферритов слабо коррелируют с параметрами возбуждаемых колебаний.



Четвертая глава посвящена генерированию мощных наносекундных импульсов излучения на основе нелинейных передающих линий. Приведены результаты испытания на ресурс линии с ферритом в импульсно-периодическом режиме, составившем не менее  $3 \cdot 10^6$  импульсов при характерном уровне электрического поля в феррите 100 кВ/см. Предложена и путем численного моделирования обоснована методика фильтрации высокочастотной компоненты импульса на выходе линии с ферритом при поглощении низкочастотной компоненты в резистивной нагрузке. Изложены результаты работ по созданию генератора мощных наносекундных высокочастотных импульсов в виде низшей  $TE_{10}$  моды прямоугольного волновода для изучения воздействия на биологические объекты. Приведены экспериментальные результаты по формированию излучения при помощи трех типов антенн. Продемонстрирована эффективность преобразования высоковольтного импульса в излучение на уровне 10% и эффективный потенциал излучения на уровне нескольких сотен киловольт.

В пятой главе приведены результаты экспериментов по созданию многоканальных фазированных генераторов мощных СВЧ импульсов, в которых высоковольтный импульс от одного высоковольтного драйвера разделяется между каналами. Исследованы закономерности управления задержкой времени пробега высоковольтного импульса по линии с ферритом при регулировании тока подмагничивания. Изложены результаты по когерентному сложению излучения от двух и четырех каналов с возбуждением колебаний в линиях с ферритом. Продемонстрировано стандартное отклонение фазы между каналами на уровне единиц процентов от периода колебаний на частотах генерации  $\sim 1$  и  $\sim 2$  ГГц. Приведены результаты применения линии с ферритом для управления фазой в двух- и четырехканальных электронных СВЧ генераторах на лампах обратной волны для стабильного когерентного сложения импульсов излучения на частотах 10 и 38 ГГц.

В заключении подведены итоги диссертационной работы.

Таким образом, можно заключить, что работа хорошо выстроена логически, грамотно изложена, а материал соответствует специальности 01.04.04 – физическая электроника.

Автореферат и сама диссертация дают достаточно полное представление о проведенных автором исследованиях, автореферат соответствует структуре и содержанию диссертации.

### **Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций**

Развиваемый автором теоретический подход и следующие из него научные положения, выводы и рекомендации относительно разработки генераторов мощных наносекундных импульсов электромагнитного излучения четко сформулированы и обоснованы в тексте диссертации. Достоверность экспериментальных результатов подтверждается их воспроизведением и использованием общепринятых методик измерения. Полученные результаты хорошо известны научной общественности, опубликованы в авторитетных российских и международных журналах, докладывались на различных научных конференциях.

**Научная новизна** полученных результатов заключается в следующем:

Реализовано эффективное возбуждение ВЧ колебаний при распространении монополярного высоковольтного импульса по нелинейной передающей линии с частичным заполнением насыщенным ферритом. Экспериментально определены параметры нелинейной линии, такие как длина, поперечное заполнение ферритом, поле подмагничивания, соответствующие оптимальным условиям для эффективного возбуждения высокочастотных колебаний. Экспериментально установлена максимальная длительность цуга возбуждаемых колебаний.



Экспериментально и аналитически исследована зависимость центральной частоты возбуждаемых в гиромангнитной нелинейной линии колебаний от приложенных азимутального и продольного магнитных полей. Экспериментально установлены и теоретически обоснованы закономерности управления частотой генерации при изменении амплитуды высоковольтного импульса и тока подмагничивания линии с ферритом.

Построена аналитическая модель, позволяющая определить максимальную эффективность преобразования высоковольтного импульса в излучение, оценить частоту генерации при заданной геометрии линии, обосновать ограничение длительности цуга возбуждаемых колебаний за счет потерь в ферритах.

Разработан ряд источников мощных наносекундных радиоимпульсов на основе линий с насыщенным ферритом, характеризующихся высоким эффективным потенциалом излучения (до 600 кВ), высокой частотой следования импульсов (до 1000 Гц) и высоким ресурсом работы (не менее  $3 \cdot 10^6$  импульсов). Определены условия по электрической изоляции линии с ферритом, позволяющие обеспечить указанные параметры.

Показано, что фаза возбуждаемых колебаний жестко привязана к фронту высоковольтного импульса при достаточной стабильности источника тока для подмагничивания нелинейной линии. Реализовано стандартное отклонение задержки радиоимпульса между каналами на уровне единиц процентов от периода возбуждаемых колебаний. Продемонстрировано четырехкратное (для двухканальной системы) и шестнадцатикратное (для четырехканальной системы) увеличение плотности потока мощности излучения многоканальных генераторов на основе линий с ферритом.

Предложена и реализована концепция многоканальных СВЧ генераторов, запитываемых от одного источника высоковольтных импульсов, в которых регулировка фазы между каналами осуществляется током подмагничивания в линиях с ферритом. Такой подход позволил реализовать управление максимумом диаграммы направленности в двух- и четырехканальных генераторах на основе релятивистских ламп обратной волны при стандартном отклонении фазы между каналами на уровне единиц процентов от периода возбуждаемых колебаний.

Эти положения изложены в опубликованных автором с сотрудниками работах, доложены на научных конференциях. Работы И.В. Романченко известны в научном сообществе, занимающемся методами генерирования мощных импульсов электромагнитного излучения, а также нелинейными передающими линиями. Автором по теме диссертации с 2008 г. по настоящее время опубликовано 23 статьи в рецензируемых журналах, индексируемых в базах данных РИНЦ, Web of Science и Scopus, а также 11 статей в сборниках трудов конференций.

### **Практическая значимость полученных результатов**

При выполнении работы автором разработан и создан ряд источников мощных наносекундных радиоимпульсов дециметрового диапазона длин волн с эффективным потенциалом излучения несколько сотен киловольт. В широком диапазоне амплитуд высоковольтных импульсов определены параметры нелинейных линий с ферритом, обеспечившие достижение теоретического предела энергетического КПД формирования импульсов излучения на уровне около 10%. Реализованная высокая частота повторений импульсов до 1000 Гц при высоком ресурсе указывают на значительный потенциал данных источников с точки зрения их последующего использования в короткоимпульсной радиолокации, системах электронного противодействия, нетепловом воздействии электромагнитных импульсов на различные среды. Предложенный автором и реализованный в работе метод управления фазой многоканальных СВЧ генераторов в линии с ферритом в продольном магнитном поле позволили обеспечить когерентное сложение излучения



релятивистских СВЧ генераторов, а также генераторов на основе линий с насыщенным ферритом. Это открывает новые возможности по достижению экстремально высоких плотностей энергии в излучении, а также управления максимумом диаграммы направленности.

### **Рекомендации по использованию результатов работы**

Результаты, полученные в диссертационной работе Романченко И.В. можно рекомендовать к использованию в организациях, занимающихся проектированием, созданием и эксплуатацией источников мощных импульсов радиочастотного и СВЧ излучения, сильноточных ускорителей. Этими организациями являются ОИВТ РАН, ИОФ РАН, НИЯУ МИФИ, НИЦ «Курчатовский институт», ФИЦ ИПФ РАН, НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, ИЭФ УрО РАН, ИСЭ СО РАН.

### **Соответствие диссертации и автореферата требованиям «Положения о присуждении ученых степеней»**

Диссертация представляет собой законченную научную работу, содержащую новые результаты в области создания источников мощных коротких импульсов излучения. В диссертации описан новый метод генерации высокочастотных колебаний в передающей линии при импульсном перемагничивании феррита за счет возбуждения в нем гиромагнитной прецессии. Проведенные исследования позволили создать новый класс источников мощных наносекундных импульсов электромагнитного излучения. Диссертационная работа удовлетворяет критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней».

### **Критические замечания**

- 1) По нашему мнению, результаты достаточно обширного теоретического анализа, приведенного в I главе, в наиболее наглядном и имеющем практическое значение виде представлены на рис. 1.25, где показаны расчетные «осциллограммы» напряжения при параметрах, близких к экспериментальным. Как можно понять из соответствующего текста диссертации, данные зависимости получены на основе решения двух обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка при нулевых начальных условиях. Представлялось бы уместным привести данные уравнения в явном виде. Кроме того, для некоторых характерных экспериментальных осциллограмм хотелось бы видеть прямое сравнение с соответствующими расчетными зависимостями.
- 2) Как указано во Введении и автореферате, одна из публикаций с участием автора «...послужила толчком к проведению исследований описываемого эффекта во многих лабораториях в различных странах мира, включая Великобританию, Францию, США, Китай, Сингапур, Южную Корею, Украину и Бразилию ...», однако в диссертации практически не приводится информации о том, каких успехов добились исследователи в этих странах. Представлялось бы целесообразным привести сравнение по основным потребительским характеристикам устройств на гиромагнитных нелинейных линиях, разработанных разными компаниями.

Сделанные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей научной и практической ценности диссертационной работы.

### **Считаем целесообразным:**

- продолжить исследования в направлении дальнейшего совершенствования генераторов на основе линий с ферритом. В качестве одного из направлений предлагаем рассмотреть

дальнейшее развитие теории с разработкой численных алгоритмов, позволяющих адекватно внедрять элементы с ферритовыми линиями в программные коды, моделирующие СВЧ системы на основе конечно-разностных методов.

## Заключение

Исследования, изложенные в диссертации, проведены на высоком научном уровне и свидетельствуют о высокой квалификации автора. В результате работы создано и развито новое научное направление – гиромагнитные нелинейные передающие линии.

На основании изложенного можно сделать вывод о том, что диссертация И.В. Романченко отвечает всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

Отзыв на диссертацию И.В. Романченко рассмотрен и одобрен на совместном семинаре отделов высокочастотной релятивистской электроники и электронных приборов ИПФ РАН в качестве отзыва ведущей организации (протокол №9 от 27.03.2019).

Отзыв подготовил заведующий лабораторией  
прикладной электроники СВЧ  
ФИЦ ИПФ РАН  
д.ф.-м.н., профессор РАН



С.В. Самсонов

Самсонов Сергей Викторович, доктор физико-математических наук, профессор РАН.  
Почтовый адрес: 603950, г. Нижний Новгород. БОКС-120, ул. Ульянова, 46.  
Телефон: (831) 416-46-21.

Наименование организации: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук».

Должность: заведующий лабораторией прикладной электроники СВЧ, отдел электронных приборов, отделение физики плазмы и электроники больших мощностей.

Адрес электронной почты: samsonov@appl.sci-nnov.ru.