

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертационную работу 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” в диссертационном совете Д 003.031.01 при ИСЭ СО РАН

Актуальность. В диссертационной работе И.В. Романченко представлены результаты исследований по генерированию мощных гигагерцовых электромагнитных колебаний за счет возбуждения гиромагнитной прецессии в феррите, заполняющем передающую линию. Созданные на основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований источники СВЧ излучения по своим параметрам приближаются к приборам традиционной релятивистской СВЧ электроники. Их важной особенностью является отсутствие электронных пучков и, как следствие, сопутствующего рентгеновского излучения, а также отсутствие проблем, связанных с ограниченным ресурсом взрывоэмиссионных катодов. Все это характеризует источники мощных импульсов СВЧ излучения на основе линий с ферритом как перспективное решение для ряда прикладных и исследовательских задач. Рассмотренные автором задачи по когерентному сложению мощных СВЧ импульсов многоканальных источников при контроле фазы между каналами при помощи линий с ферритом открывают возможности по достижению рекордно высоких значений плотности электромагнитной энергии в СВЧ излучении. Можно заключить, что описанные в диссертации исследования процессов возбуждения высокочастотных колебаний в передающей линии с насыщенным ферритом при его перемагничивании сильноточным импульсом с субнаносекундным фронтом несомненно являются актуальными.

Структура диссертации. Объем диссертации составляет 220 страниц, включая список литературы из 137 научных работ, 3 таблицы и 163 рисунка. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемых публикаций и приложения.

Введение посвящено формулировке целей и задач исследований, их актуальности. Дается обоснование научной и практической значимости работы, научной новизны полученных результатов. Изложены защищаемые научные положения.

В первой главе рассмотрены теоретические аспекты формирования ударного фронта электромагнитной волны в нелинейной передающей линии с ферритом и возбуждающихся за ним затухающих несинусоидальных колебаний. Применительно к исследуемой конфигурации ферритовой линии выписаны основные уравнения, описывающие волновые процессы. Описана динамика образования ударного фронта ТЕМ волны в нелинейной коаксиальной линии; проведен анализ распространения стационарных волн. Исследована зависимость частоты возбуждаемых колебаний от амплитуды инициирующего импульса и от поля подмагничивания. Показано, что с ростом амплитуды колебаний по мере продвижения ударного фронта по нелинейной линии с ферритом фазовая скорость возбуждаемых колебаний остается в синхронизме со скоростью ударного фронта, что обеспечивает эффективную накачку колебаний.

Во второй главе описаны результаты экспериментов по определению параметров линий с ферритом, при которых возбуждение гигагерцовых колебаний происходит наиболее эффективно. Показано, что для эффективного возбуждения колебаний в линии с насыщенным ферритом длительность фронта высоковольтного импульса должна быть меньше периода возбуждаемых колебаний. Продемонстрированы рост и насыщение амплитуды высокочастотных колебаний при увеличении длины линии с ферритом до 1 метра. Демонстрируется, что пиковая мощность высоковольтного импульса на выходе нелинейной передающей линии достигает удвоенной величины мощности падающего высоковольтного импульса.

В третьей главе исследованы закономерности перестройки частоты возбуждаемых колебаний при изменении параметров нелинейной передающей линии. Установлена зависимость частоты колебаний от продольного поля подмагничивания и азимутального магнитного поля сильноточного импульса. Полученные экспериментальные данные указывают на возможность создания источников сверхширокополосного излучения.

В четвертой главе представлены результаты по созданию макетов источников мощных наносекундных гигагерцовых широкополосных импульсов на основе линий с ферритом. В разработанных источниках достигнут эффективный потенциал излучения до 600 кВ. Продемонстрирован высокий ресурс линий с ферритом, составивший $\sim 3 \cdot 10^6$ импульсов. На частоте повторений импульсов до 200 Гц реализована стабильная генерация без развития пробоя в генераторе.

В пятой главе приведены результаты исследований по когерентному сложению излучения многоканальных мощных СВЧ-генераторов с регулированием фазы за счет

изменения поля подмагничивания в линиях задержки с ферритом. Синфазное сложение реализовано в многоканальных источниках на основе линий с насыщенным ферритом, а также на основе релятивистских ламп обратной волны, что соответствует частоте генерации от 1 до 38 ГГц.

В заключении диссертационной работы сформулированы основные результаты и выводы; приведены благодарности.

Обоснованность и достоверность результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. Выдвинутые автором научные положения, выводы и рекомендации четко и ясно сформулированы и в достаточной мере обоснованы в тексте диссертационной работы. Достоверность полученных экспериментальных результатов не вызывает сомнений. Она обусловлена использованием современных диагностических методов, которые представляются достаточно надежными и адекватными поставленным задачам. Достоверность выводов, следующих из проведенного теоретического анализа, основана на применении традиционных аналитических методов нелинейной динамики. Полученные теоретические и экспериментальные результаты внутренне непротиворечивы и согласуются с результатами других исследователей.

Новизна исследований и полученных результатов. В диссертации представлен целый спектр новых результатов.

Экспериментально продемонстрировано и теоретически обосновано эффективное преобразование монополярного высоковольтного импульса в гигагерцовые колебания в коаксиальной линии с насыщенным ферритом. Установленный на уровне 10% теоретический предел такого преобразования подтвержден экспериментально при помощи оптимизации всех параметров нелинейной линии.

Впервые экспериментально показана и теоретически обоснована перестройка частоты возбуждаемых колебаний при изменении амплитуды высоковольтного импульса и тока подмагничивания нелинейной передающей линии.

Создан ряд источников мощных гигагерцовых широкополосных наносекундных импульсов излучения на основе линий с ферритом. Достигнутые эффективный потенциал излучения в сотни киловольт и частота следования импульсов до 1000 герц позволяют использовать их в качестве инструмента в исследованиях в области электромагнитной совместимости и электромагнитного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру.

Предложен и продемонстрирован способ управления фазой СВЧ колебаний в многоканальных СВЧ генераторах при помощи линий с намагниченным ферритом.

Высокая стабильность фазы на уровне единиц процентов от периода возбуждаемых колебаний позволила реализовать когерентное сложение излучения таких генераторов.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов. На основе проведенного комплекса теоретических и экспериментальных исследований созданы макеты нового типа генераторов мощных широкополосных импульсов электромагнитного излучения дециметрового диапазона. Продемонстрированная возможность когерентного сложения излучения многоканальных источников на основе линий с ферритом открывает перспективы по достижению гигаваттного уровня мощности таких источников.

Апробация. Результаты исследований докладывались и широко обсуждалась на многочисленных международных научных симпозиумах и конференциях.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 34 печатных научных работах, в том числе в 23 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК. Все положения, выносимые на защиту, опубликованы в весомых научных журналах. Автореферат в достаточной степени отражает содержание диссертации.

Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации. Диссертация Романченко Ильи Викторовича представляет собой хорошо структурированный завершённый научный труд, имеющий несомненную ценность для научного сообщества и перспективу применения полученных результатов в высокотехнологичных приложениях. Тем не менее, по тексту работы имеются замечания:

1. В разделе 1.2 нелинейные телеграфные уравнения (1.32) и (1.33) редуцированы к паре уравнений (1.38) и (1.39), описывающих независимое распространение нелинейных ТЕМ волн в прямом и обратном направлениях. Вывод редуцированных уравнений делается через промежуточное волновое уравнение (1.37). Однако этот подход верен лишь для линейных уравнений (т.е. в ситуации, когда индуктивность не зависит от тока). В рассматриваемом существенно нелинейном случае уравнение (1.37) – неверно. Для нелинейных исходных уравнений переход к ключевым уравнениям (1.38) и (1.39) (они – верны) осуществляется на основе предположения о существовании функциональной зависимости $U = U(J)$ и требования совместности уравнений (1.32) и (1.33), записанных с использованием такой зависимости.

2. Ключевую роль в понимании механизма образования ударной волны в нелинейной линии играет выводимая в разделе 1.2 зависимость результирующего магнитного поля h_{Σ} от тока J . К сожалению, в работе не приведена эта зависимость ни

графически, ни аналитически (последнюю можно было бы выписать хотя бы в слабонелинейном приближении).

3. На стр. 48 делается вывод о том, что “максимально допустимое значение тока, бегущего по линии с ферритом без затухания не превышает... амплитуду падающего импульса, умноженную на корень из двух.” Вывод сделан на основании анализа стационарных волн в нелинейной линии с насыщенным ферритом и потому относится только к этому классу решений. Он не распространяется на нестационарные волны (примером таких волн являются ударные волны из раздела 1.2 работы). Отсутствие решений в виде стационарных волн для сверхкритических амплитуд означает тенденцию к их опрокидыванию/укручению в процессе распространения по коаксиальной линии.

4. В разделе 1.4 анализ стационарных волн в нелинейной линии с насыщенным ферритом без затухания сведен уравнению Дуффинга и, далее, к анализу движения эффективной ньютоновской частицы в потенциале (1.95). В рамках подобной часто используемой при рассмотрении нелинейных волновых процессов аналогии различные типы волн (уединенные, кноидальные, гармонические) соответствуют различным энергиям “частицы”, определяющим насколько высоко “частица” проходит над дном потенциальной ямы. На рисунке 1.10 и в рассуждениях вокруг него (стр. 47 и 48) использована, на мой взгляд, неудачная интерпретация этой аналогии, в которой вместо единственной ямы и “частицы” с различными энергиями возникло множество различных потенциальных ям.

5. Текст содержит неточности и опечатки, характерные для подобного рода работ. В частности, при выписывании уравнения Ландау-Лифшица и во введении, и в главе 1 не расшифровывается обозначение γ (гиромагнитное отношение для электрона); на стр. 24 многократно используется обозначение J_z , которое, видимо, имеет смысл используемого в остальной части диссертации тока J ; на стр. 38 и 50 имеются пустые ссылки на литературу “[]”, на странице 10 имеем “диниях” вместо “линиях” и т.п.

Отмеченные недостатки не снижают общей высокой оценки диссертационной работы Романченко И.В.

Общее заключение. Диссертационная работа «Генерирование мощных наносекундных импульсов электромагнитного излучения на основе линий с ферритом», представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком профессиональном уровне. Результаты автора работы, И.В. Романченко, в области

физической электроники и генерации мощного СВЧ излучения хорошо известны мировой научной общественности. Достоверность полученных результатов, их научная новизна, фундаментальная и практическая ценность не вызывают никаких сомнений. Совокупность выполненных исследований по созданию источников мощных наносекундных гигагерцовых импульсов излучения можно квалифицировать как новое научное направление, имеющее важное значение для задач электромагнитного противодействия различным электронным целям, в том числе беспилотным летательным аппаратам, что находится в русле мер по обеспечению безопасности страны. Таким образом, представленная работа соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор, Илья Викторович Романченко заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

Официальный оппонент Зубарев Николай Михайлович,
член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник, заведующий Лабораторией нелинейной динамики,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук,
620016 Екатеринбург, ул. Амундсена 106
8 (343) 267-87-76
nick@ier.uran.ru
16.04.2019 г.

Зубарев Н.М.

Подпись Зубарева Н.М. заверяю,
Ученый секретарь ИЭФ УрО РАН
кандидат физико-математических наук



Кокорина Е.Е.