

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертацию Припутнева Павла Владимировича «Формирование мощных наносекундных высокочастотных импульсов в частично заполненных ферритом коаксиальных линиях с различными дисперсионными свойствами»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5. (01.04.04) – физическая электроника

### **Актуальность тематики исследования**

Диссертационная работа Припутнева П.В. посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию процессов генерации мощных высокочастотных электромагнитных импульсов в нелинейных передающих линиях, заполненных ферритом.

Важной положительной с точки зрения потребителя особенностью таких устройств является отсутствие вакуумных систем и электронных пучков и, как следствие, отсутствие сопутствующего рентгеновского излучения, а также проблем, связанных с ограниченным ресурсом взрывоэмиссионных катодов.

Уровни достигаемой мощности в сотни мегаватт при частоте высокочастотного (ВЧ) заполнения единицы гигагерц, длительности импульсов несколько наносекунд и возможность работы с частотой повторения до единиц килогерц в совокупности с умеренными массогабаритными характеристиками делают эти источники особенно привлекательными для таких приложений как радиоэлектронное противодействие, воздействие на электронную аппаратуру и биологические объекты, радиолокация и ряд других.

Ранее, на основе линий с непрерывным заполнением ферритом были разработаны практические устройства для обострения фронта импульса напряжения, а также источники ВЧ импульсов, в том числе фазированные многоканальные. Однако и в настоящее время остается достаточно много нерешенных проблем и направлений совершенствования этих приборов.

В частности, до недавнего времени отсутствовал т.н. полноволновой 3-мерный компьютерный код, позволяющий моделировать такие системы с максимальным приближением к реальности, т.е. выполнять т.н. численные эксперименты. В практическом плане серьезным недостатком таких систем являлось использование достаточно габаритных и энергозатратных соленоидов на постоянном токе.

Данная диссертационная работа в основном сфокусирована на решении этих двух задач, что и определяет актуальность ее тематики.

### **Научная новизна**

Представленные в диссертации исследования и результаты, несомненно, соответствуют критериям научной новизны.

В первую очередь следует отметить то, что автором, совместно с В.П. Таракановым, был успешно модифицирован компьютерный код КАРАТ путем добавления модуля,

соответствующего электромагнитному моделированию процессов, происходящих в ферритовом заполнении в т.ч. и коаксиальной линии передачи. На основе этого кода автором был выполнен большой объем расчетов, которые, во-первых, позволили верифицировать данную модель на основе сравнения с имеющимися экспериментальными данными, и, во-вторых, позволили выявить определенные неточности теоретических моделей, использовавшихся до этого, а также обозначить ряд не очевидных зависимостей и эффектов, которым ранее уделялось не так много внимания: в частности, зависимость параметров генерируемого ВЧ сигнала от геометрического заполнения ферритом пространства коаксиальной линии, а также зависимость от полярности падающего на линию импульса напряжения. Насколько можно понять из анализа предшествующих работ, данные эффекты были не только впервые обнаружены теоретически, но и верифицированы в специально поставленных автором экспериментах.

Также впервые была систематически (теоретически и экспериментально) исследована конфигурация коаксиальной линии с гофрированным внутренним проводником и чередующимися кольцами из ферритов и постоянных неодимовых магнитов, в которой феррит насыщается в поле магнитных колец. Такое техническое решение позволяет избежать использования соленоидов для насыщения ферритового заполнения линий, что положительно отражается на массо-габаритных характеристиках устройства и его энергопотреблении.

Впервые продемонстрировано эффективное возбуждение высокочастотных колебаний при распространении высоковольтного импульса по коаксиальной линии с гофрированным внутренним проводником и чередующимися кольцами из ферритов и магнитов. Достигнутая в экспериментах высокая пиковая мощность (до 800 МВт) ВЧ колебаний с несущей частотой гигагерцового диапазона и длительностью импульса порядка 10 нс свидетельствует о высокой перспективности данной модификации устройства.

### **Обоснованность и достоверность результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

Результаты компьютерного моделирования, представленные в работе, в большинстве случаев находятся в достаточно убедительном соответствии с экспериментами. Следует особо положительно отметить постановку и проведение специальных экспериментов, направленных на верификацию не очевидных физических эффектов, впервые обнаруженных при детальном компьютерном моделировании.

Научные положения, выводы и рекомендации четко сформулированы и в большинстве случаев адекватно обоснованы в тексте диссертации. Достоверность результатов экспериментов подтверждается их воспроизводимостью, сопоставлением с результатами, получаемыми другими научными группами, использованием общепринятых методик проведения измерений. Полученные результаты опубликованы в авторитетных российских и международных журналах, были представлены на различных российских и международных конференциях.

Работа достаточно хорошо логически выстроена и изложена. Ее материал соответствует специальности 1.3.5 – физическая электроника. Диссертация и автореферат дают полное представление о проведенных автором исследованиях. Автореферат соответствует структуре и содержанию диссертационной работы.

## Практическая значимость

В ходе выполнения работы был создан существенный задел для разработки и создания востребованных для практических приложений генераторов мощных наносекундных импульсов высокочастотного электромагнитного излучения на основе коаксиальных гофрированных линий с чередующимися кольцами из ферритов и постоянных магнитов. Данные генераторы могут быть использованы в конструкции источников излучения с эффективным потенциалом несколько сотен киловольт в дециметровом диапазоне длин волн. Частотный диапазон генераторов 0,7–3,6 ГГц, пиковая мощность 20–800 МВт, энергетическая эффективность до 6%, длительность ВЧ импульса 3–12 нс.

## Замечания

Работа в целом оставляет весьма благоприятное впечатление. Тем не менее, к материалу диссертации и его представлению имеется ряд критических замечаний:

- 1) Повсеместно в тексте диссертации для обозначения как теоретических, так и экспериментальных временных зависимостей используется термин «осциллограммы», что представляется не совсем корректным для расчетных зависимостей, и зачастую, вводит читателя в заблуждение (по крайней мере, заставляет его отыскивать соответствующие комментарии в тексте).
- 2) В диссертации отмечено, что: «Параметр феноменологического затухания был равен  $\alpha=0.15$  во всех представленных в работе расчетах». При этом не представлено какого-либо обоснования выбора этого параметра, тем более, что в предшествующих теоретических работах других авторов величина этого параметра, как правило, рассматривалась в 2-3 раза меньшей.
- 3) Диэлектрические потери в ферритах и вакуумном масле, по-видимому, могут быть легко заданы в качестве параметров в коде КАРАТ. Однако в расчетах, представленных в диссертации, эти потери не учитывались (или оппоненту не удалось найти соответствующей информации). По моему мнению, информация и комментарии по данному поводу были бы весьма уместными.
- 4) В работе встречается ряд неоправданно категоричных и недостаточно обоснованных утверждений, например:
  - а) «Ранее, в отсутствие возможностей численного моделирования, разработка и оптимизация генераторов высокочастотных импульсов на основе НПЛ с насыщенным ферритом проводились эмпирически.» - Таким высказыванием фактически обнуляются все предшествующие теоретические работы в данном направлении;
  - б) «...можно сделать вывод, что создание магнитной системы, внутрь которой помещается нелинейная передающая линия с ферритом, не может являться альтернативой соленоиду для насыщения заполнения линии.» (имеется в виду создание магнитной системы «трубчатой формы» на постоянных магнитах);
  - в) «Реализация коаксиальной линии передачи, в которой между проводниками в продольном направлении чередуются ферритовые кольца и постоянные магниты является невозможной.»

5) Не указан ряд важных геометрических размеров гофрированных линий, в частности, периода гофрировки, а также параметров  $l_f$ ,  $l_g$  и  $R_0$ , обозначенных на Рис. 5.7.

Кроме того, основные выходные параметры импульсов, полученных в экспериментах с шестью ГНПЛ, полезно было бы свести в одну итоговую таблицу, что, впрочем, сделано в автореферате, но явно не хватает в самой диссертации. Кроме параметров, приведенных в Таблице 3 и 4 автореферата, полезно было бы привести и эффективность.

6) В диссертации не дано четкого математического определения величины «эффективности преобразования энергии импульса напряжения в энергию высокочастотных колебаний», которая часто используется в качестве одного из основных выходных параметров, характеризующих НПЛ (или оппоненту не удалось найти соответствующей информации).

7) Комментарии по поводу влияния полярности падающего напряжения на форму выходного сигнала, такие как: «Простая аналитическая оценка, подкрепленная численным расчётом, указывает на то, что направление азимутальной компоненты магнитного поля, в отличие от аксиальной компоненты, влияет на вихревой ток в феррите и, следовательно, на формирование фронта ударной волны», представляются не совсем убедительными, т.к. они применимы и для случаев, когда влияния полярности быть не может в силу симметрии геометрии и исходной изотропности задаваемой физической среды, например, в случае плоской геометрии (полосковой линии) симметрично заполненной ферритом.

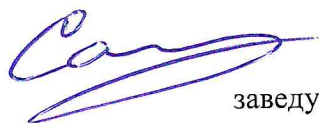
8) Несколько раз в тексте диссертации уменьшение центральной частоты импульса по мере его распространения в НПЛ объясняется «дисперсионным расплыванием импульса», что представляется не совсем корректным. Обычно под дисперсионным расплыванием понимается заметное увеличение длительности короткого (несколько периодов квазимонохроматических колебаний) импульса при его распространении в линейной среде с дисперсией, где групповая скорость волны зависит от частоты. При этом изменения спектральных характеристик импульса, по крайней мере, модуля Фурье-преобразования, не происходит (в пренебрежении потерь), т.к. среда однородная и линейная. В разделах диссертации 4.1 и 4.2 при решении задачи о распространении импульса с коротким фронтом в НПЛ без феррита автор справедливо отмечает, что спектр импульса практически не меняется, тем не менее, осцилляции на переднем фронте (так же как и в НПЛ с ферритом) возникают, и временные промежутки между максимумами и минимумами этих осцилляций изменяются по мере увеличения длины линии. Но в линейной задаче никакой выделенной частоты нет, и поэтому не корректно говорить о ее изменении и «дисперсионном расплывании». Можно также заметить, что когда автор говорит о «дисперсионном разбеге гармоник фронта волны  $E_{00}$ », то опять-таки сравнивает это с дисперсионным расплыванием коротких импульсов, ссылаясь на работы по оптике фемтосекундных импульсов. Более уместным в данном случае представляется сравнение тоже из области оптики, но не во времени, а в пространстве. В классических работах по оптике и многих учебниках можно найти картину дифракции плоской монохроматической волны на краю плоского непрозрачного экрана. Там также возникают осцилляции, очень похожие на многие «осциллограммы», приводимые в диссертации, но не во времени, а в пространстве. В связи с этим представляет интерес сравнение уравнений и их приближенных интегральных решений, описывающих данные эффекты в оптике и в рассматриваемых НПЛ, т.к. в оптике поведение таких дифракционных

максимумов и минимумов хорошо известно и может быть найдено на основе графоаналитических методов (спирали Корню).

Отмеченные замечания недостатки не снижают общей высокой оценки диссертационной работы Припутнева П.В.

#### Общее заключение.

Диссертационная работа П.В. Припутнева «Формирование мощных наносекундных высокочастотных импульсов в частично заполненных ферритом коаксиальных линиях с различными дисперсионными свойствами» является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком профессиональном уровне. Работа соответствует требованиям "Положения о порядке присуждения ученых степеней", утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, несомненно, заслуживает присуждения ему искомой ученой степени по специальности 1.3.5 - физическая электроника.



Самсонов Сергей Викторович  
доктор физ.-мат. наук, профессор РАН  
заведующий лабораторией широкополосных гироприборов  
отдела электронных приборов

Отделения физики плазмы и электроники больших мощностей.  
Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики  
им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук  
603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46,  
тел. +7 (831) 416-46-21,  
e-mail: samsonov@ipfran.ru.

Подпись Самсонова С.В. удостоверяю

Зам. директора ИПФ РАН по научной работе

Глявин М. Ю.

