

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента Завьялова Николая Валентиновича  
на диссертационную работу Жерлицына Андрея Алексеевича на тему «Мощные  
ЛТД генераторы с изоляцией воздухом атмосферного давления и временем  
вывода энергии порядка 100 нс», представленную на соискание ученой степени  
доктора технических наук по специальности  
1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки

### **Актуальность темы**

В наиболее мощных высоковольтных импульсных генераторах применяются промежуточные емкостные или индуктивные накопители энергии, которые заряжаются от первичных емкостных накопителей за время  $\sim 1$  мкс и более. Повышение мощности и сокращение времени вывода энергии из первичных емкостных накопителей, позволяет улучшить характеристики промежуточных накопителей обоих типов. В случае достижения времени вывода энергии до  $\sim 100$  нс это дает возможность для целого ряда важных применений отказаться от промежуточных накопителей и включать первичный накопитель непосредственно на нагрузку. Другой важной задачей является разработка первичных накопителей энергии гибкой конфигурации, допускающей перестройку под определенную задачу и установку. Для решения указанных задач в диссертационной работе А.А. Жерлицына исследуется ЛТД технология (английская аббревиатура LTD – Linear Transformer Driver) построения мощных субмикросекундных первичных накопителей энергии с уровнем напряжения порядка  $10^6$  В и тока порядка  $10^6$  А. В настоящее время эта технология рассматривается как одна из перспективных для создания генераторов сверхмощных импульсов, способных ввести в низкоиндуктивную нагрузку лайнерного типа ток более 50 МА за время  $\sim 100$  нс. Привлекательна она и для других приложений, где требуется высокая пиковая мощность. Важной отличительной особенностью развиваемого в диссертации подхода к созданию ЛТД генераторов является отказ от применения масляной изоляции и

использование воздуха атмосферного давления в качестве изолирующей среды емкостного накопителя энергии, а также рабочей среды разрядников. Такой подход упрощает конструкцию и эксплуатацию ЛТД генераторов, что особенно актуально для крупных электрофизических установок.

В связи с вышеизложенным актуальность темы диссертации не вызывает сомнений.

### **Практическая значимость**

Результаты работы автора заключаются в создании: 1) высоковольтной элементной базы для субмикросекундных генераторов с зарядным напряжением до 100 кВ без масляной изоляции и повышенного давления газа; 2) ряда ЛТД генераторов с изоляцией воздухом атмосферного давления на основе этой элементной базы. Разработанные ЛТД генераторы нашли применение в отечественных и зарубежных научно-исследовательских организациях. Полученные в ходе выполнения работы результаты могут служить практическими рекомендациями при проектировании и разработке мощных импульсных генераторов с изоляцией воздухом атмосферного давления для исследовательских и прикладных целей.

Сказанное свидетельствует о практической значимости и востребованности темы диссертации.

### **Научная новизна работы и достоверность результатов**

Результаты диссертационной работы обладают научной и технической новизной.

Разработаны и изготовлены несколько вариантов ЛТД ступеней с изоляцией воздухом атмосферного давления и максимальным зарядным напряжением 100 кВ, обеспечивающих амплитуду тока разряда до 1 МА с фронтом  $\sim 100$  нс. В ступенях реализовано основное достоинство подхода, связанного с использованием воздушной изоляции: возможность проведения профилактики и ремонта емкостного накопителя без полной разборки ступени, что особенно



важно для крупных установок, где используются модули из многих последовательно включенных ЛТД ступеней. Ступень с изоляцией воздухом атмосферного давления с выходным импульсом тока амплитудой мегаамперного уровня и временем нарастания около 100 нс создана впервые в мире. Другая ЛТД ступень с запасаемой энергией более 17 кДж, выходной мощностью 40 ГВт и амплитудой тока 1 МА является самой мощной и энергоемкой из существующих ступеней с воздушной изоляцией и временем вывода энергии  $\sim 300$  нс.

Разработаны и созданы ЛТД модули и ЛТД генераторы с широким диапазоном выходных параметров. Так, например, создан ЛТД генератор для уникальной мультитераваттной фемтосекундной лазерной системы видимого диапазона THL-100. Генератор демонстрирует прогресс в снижении длительности на полувывсоте генерируемого импульса в электронном диоде с 700 нс до 250 нс. Также впервые создан модуль из последовательно включенных ЛТД ступеней с воздушной изоляцией для мультимегаамперной электрофизической установки.

Обоснованность результатов исследований диссертационной работы подтверждается их практической реализацией при создании генераторов. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на многочисленных конференциях, опубликованы в 40 полнотекстовых докладах и статьях в рецензируемых журналах.

### **Общая характеристика работы**

Диссертационная работа состоит из введения, семи разделов, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 228 страниц. Список литературы включает 201 наименование.

Во введении приведена основная информация по диссертационной работе: актуальность тематики; цели и задачи; научная новизна и практическая значимость полученных результатов; выносимые на защиту положения.

Первый раздел имеет обзорный характер. В нем приведено состояние дел по теме диссертации и обоснование задач работы.

Во втором разделе представлены результаты разработки и исследования многоазорного многоканального разрядника атмосферного давления для субмикросекундного емкостного накопителя энергии с рабочим напряжением до 100 кВ. Представлены достигнутые характеристики, в том числе по разбросу времени включения разрядника и ресурсу его работы.

Третий раздел посвящен секциям емкостного накопителя энергии ЛТД ступеней с воздушной изоляцией. Разработаны три вида секций с разной электрической емкостью, что позволяет в дальнейшем на их основе создавать ступени ЛТД с достаточно широким диапазоном выходных характеристик.

В четвертом разделе описаны результаты исследования созданной мегаамперной ЛТД ступени с изоляцией воздухом атмосферного давления с временем нарастания импульса около 100 нс и временем вывода энергии менее 200 нс. Проведено сравнение ЛТД ступеней с воздушной и масляной изоляцией.

В пятом разделе приведены результаты создания ЛТД генератора для мультитераваттной фемтосекундной лазерной системы видимого диапазона ТНЛ-100. Создание генератора демонстрирует прогресс в снижении длительности на полувывсоте импульса на диоде с 700 до 250 нс. Это позволило сохранить пиковую мощность электронного пучка на уровне 100 ГВт при снижении энергии в емкостном накопителе в 2,8 раза по сравнению с генератором, созданным ранее для прямой накачки газового лазера без формирующих линий.

В шестом разделе представлена разработанная и созданная мегаамперная ЛТД ступень с воздушной изоляцией и пиковой мощностью  $\approx 40$  ГВт. Приведены результаты испытаний и исследований ЛТД модулей в составе двух и пяти таких ступеней. Разработан проект установки из 10 включенных параллельно модулей, каждый из которых включает в свой состав 12 ступеней. При запасаемой энергии  $\sim 1,7$  МДж установка должна обеспечить на лайнерной нагрузке ток  $\sim 8$  МА при времени вывода энергии  $\sim 300$  нс. Полноразмерный модуль спроектирован, изготовлен и подготовлен к испытаниям.

Седьмой раздел содержит примеры реализации импульсных генераторов на основе разработанных секций с воздушной изоляцией: субмикросекундный



генератор тока для экспериментов с лайнерными нагрузками, ЛТД генератор для радиографии, источник СВЧ-излучения, компактный генератор электронного пучка, источник сильноточного электронного пучка и электронный источник с плазмонаполненным диодом.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

### **Замечания и недостатки**

1. Следует отметить, что впервые емкостные накопители с многоканальными искровыми разрядниками были размещены во внутреннем объеме индукторов в 60-х годах в РФЯЦ-ВНИИЭФ, где был предложен новый тип линейных индукционных ускорителей электронов без сердечников из ферромагнитных материалов (так называемые безжелезные ЛИУ). В ускорителе ЛИУ-2 (1967) в каждом из 48 индукторов с воздушной изоляцией в качестве накопителей использовались по 12 малоиндуктивных сикондовых конденсаторов К-15-10 с дополнительной внешней изоляцией из компаунда на основе эпоксидной смолы и кольцевые управляемые разрядники, заполненные азотом. В дальнейшем для повышения тока и темпа ускорения в установках ЛИУ-10 (1977) и ЛИУ-30 (1988) вместо конденсаторов в индукторах использовались низкоимпедансные радиальные линии, а в установках ЛИУ-10М (1994) и ЛИУ-Р-Т (2015) – ступенчатые формирующие линии с водяной изоляцией. Включение индукторов по заданной временной программе осуществляется с наносекундной точностью с помощью многоканальных искровых газонаполненных разрядников тригатронного типа. Генераторы Аркадьева-Маркса размещаются снаружи индукторов.
2. В работе не указан в явном виде диапазон выходных параметров электрофизических установок (напряжение, ток, длительность импульса, энергозапас), для создания которых целесообразно применять ЛТД генераторы и в том числе с воздушной изоляцией. Это реализовано в основном через ссылки на многочисленные литературные источники, но, как

правило, без указания полученных в этих работах основных результатов. Поэтому для более полного понимания описанных в диссертации проблем приходится переходить к поиску и изучению первоисточников, что значительно затрудняет ознакомление с диссертацией.

3. Не вызывает сомнения, что разработанные в диссертационной работе устройства с использованием в качестве изоляции в ступени ЛТД и разрядниках воздуха при атмосферном давлении значительно упростят и удешевят эксплуатацию установок. Вместе с тем отказ от масляной изоляции привел к увеличению осевого размера ступени в  $\sim 1,5$  раза и некоторому снижению выходного напряжения, а также удлинению импульса. Все это значительно снижает вероятность применения ступеней с воздушной изоляцией для генерации мощных коротких импульсов тормозного излучения для радиационных исследований и для импульсной радиографии быстропротекающих процессов, где нужны установки с выходным напряжением на уровне 5 МВ и выше при длительности импульса  $10 \div 50$  нс. При этом максимальная длина вакуумной линии с магнитной изоляцией для индукционного суммирования напряжения ограничена необходимостью обеспечения достаточной механической прочности центрального электрода этой линии из-за его консольного крепления. В этом случае основным критерием для выбора варианта ступени является скорость роста выходного напряжения ЛТД модуля при увеличении его длины.

4. В высоковольтной импульсной технике в качестве основной временной характеристики импульса указывается, как правило, длительность импульса на полувисоте. В рассмотренной работе применяются также время нарастания от уровня 0,1 до уровня 0,9, время вывода энергии (0,1-0,9) и время до максимума. Указанные величины значительно отличаются между собой, и их соотношение изменяется при варьировании нагрузки. В разных местах диссертации выделяются разные характеристики. Например, в заключении раздела 4 для ЛТД ступени с изоляцией воздухом атмосферного давления с мегаамперным уровнем тока указано, что время нарастания по



уровню 0,1-0,9 составляет менее 100 нс. А в представленных в данном разделе таблицах 4.2, 4.3 и 4.4, где приведены параметры выходного импульса для одной и двух таких ступеней, а также для наиболее мощной ЛТД ступени с масляной изоляцией, для сравнения временных характеристик используется время до максимума тока. В названии же диссертации упор сделан на время вывода энергии. Это вызывает определенную неоднозначность при сравнении между собой разных устройств.

5. Диссертация написана хорошим языком и достаточно хорошо структурирована. Но в русскоязычной литературе десятичную часть числа принято отделять запятой, а не точкой. Пришедшее из английского языка понятие джиттер хорошо бы было заменить на русскоязычный аналог – разброс по времени.

Отмеченные недостатки не носят принципиального характера и не влияют на общую высокую оценку работы и значимость полученных результатов.

### **Выводы и заключение**

Тема представленной диссертации актуальна и имеет четкую практическую направленность. Работа посвящена исследованиям и разработке высоковольтной элементной базы и генераторов мощных сильноточных высоковольтных импульсов. В соответствии с паспортом специальности такая работа относится к специальности 1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки для отрасли технические науки.

Диссертационная работа Жерлицына А.А. выполнена на высоком научном уровне, является законченной научно-квалификационной работой, содержащей результаты решения актуальных, имеющих научно-практическое значение задач. По совокупности достигнутых результатов работу можно квалифицировать как значительный вклад в развитие мощных высоковольтных сильноточных генераторов субмикросекундных импульсов, что соответствует критериям, предъявляемым к докторским диссертациям, изложенным в п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842. Автор диссертационной работы

Жерлицын А.А. заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки.

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук,  
член-корреспондент РАН, директор Института ядерной радиационной физики  
Федерального государственного унитарного предприятия «Российский  
федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский  
институт экспериментальной физики» Завьялов Николай Валентинович  
607188, Нижегородская обл., г. Саров, пр. Мира, 37.  
E-mail: nvzavyalov@vniief.ru

24. 04. 2025 г.

 Н.В. Завьялов

Подпись Завьялова Николая Валентиновича заверяю.

Ученый секретарь,  
кандидат физико-математических наук



А.О. Бликов

Федеральное государственное унитарное предприятие "Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики" (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»)  
пр. Мира, д.37, г. Саров, Нижегородская обл., 607188  
Факс: 83130 25638 E-mail: staff@vniief.ru