

На правах рукописи

АКИМОВ Александр Валентинович

**СИСТЕМА
ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИМПУЛЬСНОГО ПИТАНИЯ
ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ ЛИУ-2**

**01.04.20 – физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

НОВОСИБИРСК – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

Логачев Павел Владимирович – доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Куксанов Николай Константинович – доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, заведующий лабораторией.

Сочугов Николай Семенович – кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск, заведующий лабораторией

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ – Объединённый институт ядерных исследований, г. Дубна.

Защита диссертации состоится « _____ » _____ 2013 г. в « _____ » часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

А.В. Бурдаков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Импульсная рентгенография интенсивно развивается и становится отдельной отраслью прикладной физики. В различных лабораториях мира продолжают работы по совершенствованию рентгенографических комплексов, при этом предпочтение отдается комплексам на основе линейных индукционных ускорителей (ЛИУ). ЛИУ обеспечивают наилучшие показатели по заряду электронного пучка, фокусируемого на мишень с минимальным поперечным размером, позволяют получать сильноточные высокоэнергетичные пучки без необходимости обеспечения высоковольтной изоляции на полное напряжение ускорения. Идея применения индукционных ускорителей для производства мощных импульсов тормозного излучения выглядит на данный момент наиболее перспективной.

В России до сих пор не было построено ни одного рентгенографического комплекса на основе ЛИУ. Имеющиеся в нашей стране специализированные установки для импульсной рентгенографии не позволяют проводить исследования быстропротекающих процессов в полном объеме и с предельным разрешением. В связи с этим задача создания в российском институте принципиально нового рентгенографического комплекса, отвечающего всем современным требованиям, является, в некотором смысле, вызовом. Современный комплекс будет нацелен на получение таких уникальных и востребованных характеристик, как многоразовный режим облучения объекта, двухимпульсный режим работы, субмиллиметровый поперечный размер пучка на мишени.

Также можно отметить, что линейные индукционные ускорители в нашей стране не нашли широкого практического применения, многие построенные установки были закрыты, новые не проектируются, в связи с этим были утрачены многие технологии, сопутствующие этой тематике. Восстановление и совершенствование таких технологий, как производство крупногабаритных магнитных сердечников из аморфных сплавов с улучшенными импульсными характеристиками, высоковольтных сильноточных коммутаторов энергии, высоковольтных емкостных накопителей энергии со свойствами формирующих линий, а также разработка уникальных систем управления, является неотъемлемой частью работ по созданию рентгенографического комплекса на основе ЛИУ и может рассматриваться, как вклад в российскую науку и технику.

Цель диссертационной работы

Целью настоящей работы являлось:

Разработка импульсной системы питания для линейного индукционного ускорителя ЛИУ-2, рассчитанного на ускорение электронного пучка током 2 кА до энергии 2 МэВ при длительности плоской вершины импульса питающего напряжения 200 нс.

Обеспечение двухимпульсного режима работы системы питания. Система должна формировать на комплексной нагрузке последовательность из двух импульсов напряжения равной амплитуды, интервал между которыми должен регулироваться в пределах от 2 до 10 мкс.

Тестирование отдельных элементов системы питания, создание и испытание прототипов импульсных модуляторов, проработка финальных схемных решений.

Конструктивная проработка и отработка технологии производства импульсной системы ускорителя ЛИУ-2 в полном объеме.

Испытания импульсной системы питания в составе ускорителя ЛИУ-2 и получение электронного пучка в ускорителе с номинальными параметрами.

Личный вклад автора

Личное участие автора в получении результатов, составляющих основу диссертации, является определяющим. При его непосредственном участии разработана, спроектирована, изготовлена и введена в эксплуатацию система импульсного питания ускорителя. Отработаны варианты получения двухимпульсного режима питания. Проанализированы и протестированы основные схемотобразующие элементы импульсного модулятора – тиратроны и формирующие линии. Разработаны два варианта импульсных модуляторов – с использованием различных емкостных накопителей энергии, в том числе специально спроектированных и произведенных для данной системы. Автор принимал участие в электрических испытаниях системы импульсного питания, получении экспериментальных данных.

Научная новизна

Разработан импульсный модулятор, позволяющий получать на комплексной нагрузке серию из двух импульсов напряжением до 21 кВ, током до 8 кА, длительностью вершины 200 нс, следующих с интервалом, регулируемым от 2 до 10 мкс.

В достаточном объеме получены экспериментальные данные по использованию сравнительно новых приборов, тиратронов с полым катодом, в режиме коммутации 10-кА токов со стабильностью коммутации на уровне единиц наносекунд, с переполосовкой по анодному напряжению.

Изучены и применены диодные свойства тиратронов с полым катодом при временах восстановления электрической прочности от 1 мкс.

Изучены импульсные характеристики неоднородных формирующих линий на основе пленочных конденсаторных секций с волновым сопротивлением до 2,5 Ом, зарядным напряжением до 50 кВ, током нагрузки до 10 кА.

Научная и практическая ценность работы

Разработана и введена в эксплуатацию система импульсного питания линейного индукционного ускорителя ЛИУ-2, предназначенного для проведения рентгенографических исследований быстропротекающих процессов в Российском федеральном ядерном центре Всероссийском научно-исследовательском институте технической физики им. академика Е.И. Забабахина. основополагающие идеи, внедренные в систему питания, используются при создании рентгенографического комплекса ЛИУ-20, рассчитанного на энергию 20 МэВ, ток электронного пучка 2 кА.

Исследованы особенности работы тиратронов с полым катодом в режиме восстановления электрической прочности. Полученные данные могут быть применены при разработке высоковольтных сильноточных генераторов серии импульсов, следующих с частотой до 1 МГц. Также на основе проведенных исследований была разработана модель пентодного тиратрона с полым катодом. Такая модификация тиратрона может быть использована для получения лучших результатов по восстановлению электрической прочности.

Отработана технология создания формирующих линий на основе конденсаторных секций с комбинированным диэлектриком. Подобные формирующие линии могут применяться в генераторах для получения импульсов с амплитудой напряжения в десятки киловольт, тока – в десятки килоампер, с длительностью импульсов – сотни наносекунд и выше.

Основные положения, выносимые на защиту

Система высоковольтного импульсного питания линейного индукционного ускорителя, обеспечивающая питание индукторов в двухимпульсном режиме с регулируемым интервалом между импульсами.

Разработка серии высоковольтных формирующих линий, позволяющих сформировать на комплексной нагрузке высоковольтные сильноточные импульсы.

Исследования коммутационных и ресурсных характеристик тиратронов с полым катодом, не применявшихся до этого в установках в больших количествах.

Исследования диодных свойств тиратронов с полым катодом в режиме восстановления обратной электрической прочности за единицы микросекунд.

Апробация работы и публикации

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на семинаре в ИЯФ СО РАН (г. Новосибирск), на российских и международных научных конференциях: 19-й Международный семинар по ускорителям заряженных частиц (Алушта, Украина, 2005); Russian Particle Accelerator Conference RUPAC'06 (Новосибирск, Россия, 2006); 20-й Международный семинар по ускорителям заряженных частиц (Алушта, Украина, 2007); 2007 IEEE Pulsed Power and Plasma Science Conference (Albuquerque, USA, 2007). Результаты диссертационной работы содержатся в трех реферируемых научных журналах.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 58 наименований, изложена на 145 страницах машинописного текста, содержит 69 рисунков и 12 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведены основные требования, предъявляемые к современным рентгенографическим комплексам на основе линейных индукционных ускорителей, и следующие из этого задачи по разработке системы импульсного питания ускорительных секций. Исходя из поставленных задач и проведенного анализа, выделены предпосылки, которые задают основу для начала разработки системы импульсного питания. Сформулированы основные цели диссертации и приведено краткое изложение содержания работы.

В первой главе приведен обзор существующих рентгенографических комплексов на основе линейных индукционных ускорителей. Основное внимание в обзоре уделено системам импульсного питания индукторных модулей. Проанализированы преимущества и недостатки систем питания. Сопоставлены характеристики имеющихся систем со специфическими требованиями, предъявляемыми к проекту индукционного ускорителя ЛИУ-2. Обоснован выбор параметров системы питания, которая должна обеспечивать на комплексной нагрузке в виде индуктора ускоряющей секции серию из двух импульсов напряжением до 21 кВ, током до 8 кА, длительностью плоской вершины импульса 200 нс, с интервалом между импульсами, регулируемым от 2 до 10 мкс. Основными особенностями такой системы является сравнительно низковольтное исполнение, упрощенная конструкция, использование сравнительно простых, недорогих и надежных элементов, обладающих повышенным ресурсом. Описан выбор схемы импульсного модулятора, работающего в двухимпульсном режиме.

Предпочтение было отдано схеме параллельного включения двух генераторов на одну нагрузку (см. рис. 1). Представлен расчет эквивалентных параметров нагрузки модулятора, которой является индуктор ускоряющей секции. Основные параметры импульсного модулятора приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры импульсного модулятора системы питания ускорителя ЛИУ-2.

Число индукторов, запитываемых от модулятора	2
Количество импульсов	2
Интервал между импульсами, регулируемый в пределах	2 – 10 мкс
Зарядное напряжение	42 кВ
Амплитуда напряжения на нагрузке	21 кВ
Амплитуда выходного тока	8 кА
Составляющая выходного тока, приходящаяся на электронный пучок (на 2 индуктора)	4 кА
Длительность плоской вершины импульса	200 нс
Длительность фронта импульса	100 нс
Длительность спада импульса	150 нс
Равномерность плоской вершины импульса напряжения на ускоряющем зазоре*)	$\pm 1\%$
Временная стабильность импульса на нагрузке	± 2 нс
*) Большая неравномерность напряжения на выходе одного модулятора может быть скомпенсирована за счет усреднения колебаний напряжения на вершине импульса от нескольких модуляторов, работающих на один ускоряющий зазор.	

Во второй главе описан выбор основных элементов системы импульсного питания: высоковольтных силовоточных коммутаторов энергии и емкостных накопителей энергии со свойствами формирующих линий. Оценка указанных элементов проводилась с учетом конкретной схемы питания.

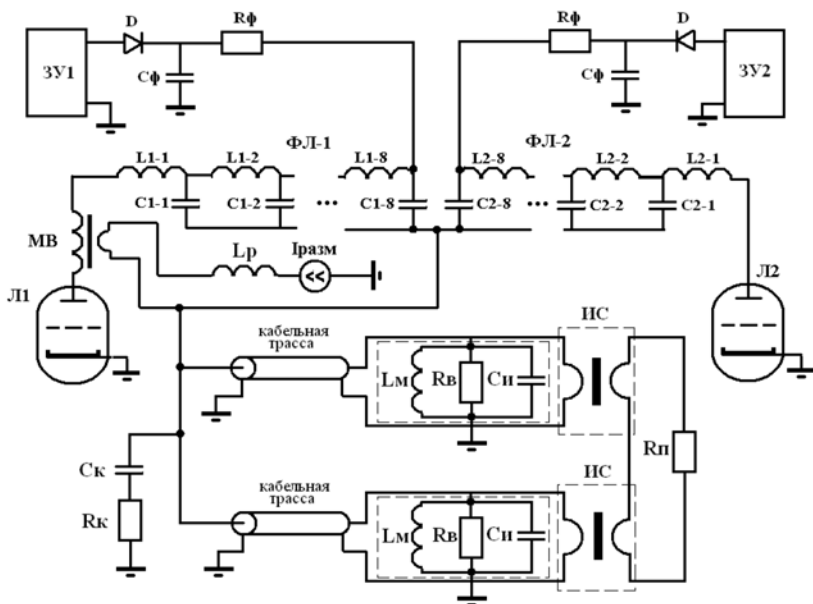


Рис. 1. Принципиальная схема импульсного модулятора: ЗУ1,2 – зарядные устройства; D-RФ-СФ – зарядные цепочки; ФЛ1,2 – формирующие линии; Л1,2 – ключи; МВ – магнитный вентиль; Rк-Ск – корректирующая цепочка; Lp – дроссель размагничивания; ИС – индукторы; Lm-Rв-Сп – параметры индуктора; Rп – сопротивление нагрузки.

На рис. 1 представлена принципиальная схема модулятора, питающего индукторы ускорителя ЛИУ-2, основанная на параллельном включении двух генераторов на общую нагрузку. Каждый из двух генераторов состоит из формирующей линии ФЛ, ключа Л. Для коррекции формы импульса на нагрузке используется цепочка Rк-Ск. Каждый генератор запитывается от своего зарядного устройства ЗУ через фильтрующую цепь D-RФ-СФ. Нагрузкой одного модулятора являются два индуктора ИС, обладающие определенными параметрами: Rв – вихревое сопротивление железа индуктора; Lm – индуктивность намагничивания железа; Сп – конструктивная емкость индуктора. Индукторы, в свою очередь, нагружены на эквивалентное сопротивление электронного пучка Rп. Модулятор питает индукторы через кабельную трассу. Размагничивание индукторов обеспечивается от импульсного источника тока Иразм, подключенного к выходу модулятора через развязывающий дроссель Lp. Отличительной особенностью одного генератора от другого является наличие в цепи первого магнитного вентиля МВ. Источник тока Иразм также обеспечивает начальное намагничивание магнитного вентиля.

В первой части главы был проанализирован опыт использования различных сильноточных коммутаторов, основное внимание при этом было уделено более современным приборам – тиратронам с ненакаливаемым полым катодом. Такие приборы рассматриваются как альтернатива классическим высоковольтным водородным тиратронам с накаливаемым катодом, особенно при коммутации больших токов с наносекундной стабильностью запуска и сравнительно малом среднем токе через прибор. В схеме импульсного модулятора использованы тиратроны серии ТПИ1-10к/50. Они рассчитаны на коммутацию токов до 10 кА при анодном напряжении до 50 кВ, отличаются малыми габаритами и низкой стоимостью.

Представлены статистические данные испытаний партии тиратронов ТПИ1-10к/50 в режимах, соответствующих требованиям, предъявляемым к системе питания ЛИУ-2. В частности, было показано, что стабильность отпирания отдельных экземпляров тиратронов колеблется от 2 до 11 нс, время коммутации, принимаемое равным длительности переднего фронта анодного тока, измеренного на уровне 10 – 90%, составляет порядка 35 – 40 нс. В результате исследований коммутационных и ресурсных характеристик тиратронов были отмечены как преимущества этих приборов, так и выявлены их недостатки, которые были устранены производителем в последующих модификациях.

Отдельно были изучены диодные свойства тиратронов с полым катодом. Скорость восстановления обратной электрической прочности тиратрона является важным фактором в выбранной схеме импульсного питания ЛИУ-2, где требуется изолировать два параллельно включенных генератора друг от друга по импульсному напряжению. Диодные свойства тиратронов в сочетании с использованием магнитного вентиля позволили решить эту задачу наиболее оптимальным способом. Данные по проектированию и испытанию магнитного вентиля также представлены во второй главе. На основе проведенных исследований была разработана модель пентодного тиратрона с полым катодом, позволяющая в некоторых практических применениях получать лучшие результаты по восстановлению электрической прочности. Для сравнения, тиратроны в стандартном тетродном исполнении способны выдерживать обратное напряжение –24 кВ спустя 5 – 6 мкс после начала коммутации импульсного тока длительностью по основанию порядка 500 нс, амплитудой около 8 кА, в то время как тиратроны в пентодном исполнении, при прочих равных условиях, восстанавливают обратную электрическую прочность за время 3 – 4 мкс. При этом следует принять во внимание, что в силу специфики схемы импульсного питания индукторов через тиратрон в течение порядка 1 мкс течет прямой ток, обусловленный вначале рабочим током нагрузки, а затем – током источника размагничивания индукторов. Если учесть, что при коммутации меньших токов на меньших анодных напряжениях рассматриваемые тиратроны восстанавливают обратную, а следовательно, с некоторой поправкой, и

прямую электрическую прочность существенно быстрее, можно говорить о возможности использования таких ключей для создания высоковольтных силовых генераторов серии импульсов, следующих с частотой до 1 МГц.

Во второй части главы проанализированы различные емкостные накопители энергии, на основе которых возможно создать формирующую линию для импульсного модулятора ЛИУ-2. Были выбраны два варианта емкостных накопителей – ситалловые конденсаторы К15-10 и конденсаторные секции с комбинированным пленочным диэлектриком на основе полипропилена. Оба этих варианта отличаются высокой энергоемкостью. Преимуществами ситалловых конденсаторов являются улучшенные импульсные характеристики и возможность создания на их основе формирующей линии, поддающейся последующей подстройке волнового сопротивления. Недостатком – остановленное производство таких конденсаторов с напряжением 50 кВ. В связи с этим, были изучены импульсные характеристики формирующей линии на базе конденсаторных секций с комбинированным пленочным диэлектриком. На основе полученных данных была спроектирована неоднородная формирующая линия, отвечающая требованиям системы импульсного питания ЛИУ-2.

В третьей главе описана конструкция импульсного модулятора, как основополагающего устройства системы питания. Представлены данные испытаний отдельных элементов модулятора, а также формы напряжения выходных импульсов модуляторов при работе на эквивалентную нагрузку в двухимпульсном режиме при номинальном значении напряжения на нагрузке (см. рис. 2). Описана работа по монтажу и наладке системы импульсного питания на установке ЛИУ-2 (см. рис. 3). Представлены экспериментальные данные, полученные при работе установки ЛИУ-2 с электронным пучком в одноимпульсном (рис. 4) и двухимпульсном режимах (рис. 5). Описаны возникшие проблемы и пути их решения. В частности, были отмечены повышенные искажения импульса на нагрузке модуляторов, обусловленные влиянием конструктивной емкости ускорительной системы. Предложенные решения позволили получить равномерность вершины импульса тока на выходе ускорителя в пределах $\pm 0.5\%$ (рис. 6). В частности, были скорректированы параметры формирующих линий модуляторов, а также использована возможность усреднения и сглаживания колебаний суммарного напряжения на ускоряющем зазоре при его питании от нескольких модуляторов.

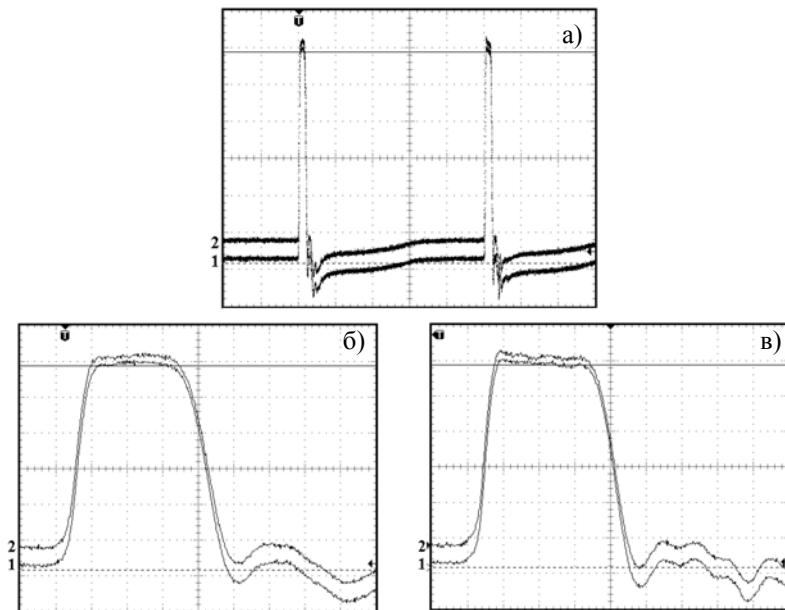


Рис. 2. Осциллограммы тока нагрузки модулятора (луч 1, 350 А/клетка) и напряжения на индукторе (луч 2, 4100 В/ клетка, сигнал инвертирован) в двухимпульсном режиме: первый импульс – (б); второй импульс – (в); масштаб по горизонтали: 2 мкс/клетка (а) и 100 нс/клетка (б, в).



Рис. 3. Система импульсного питания в сборе: 48 модуляторов установлены в 8 стоек.

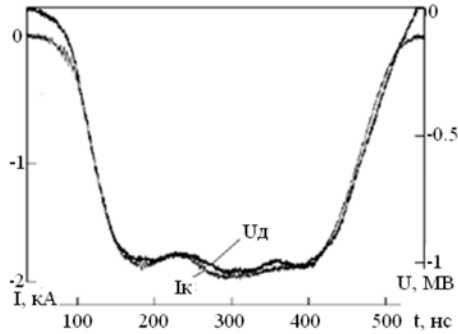


Рис. 4. Кривые напряжения на диоде анод-катод U_d и тока катода I_k (сигнал инвертирован) ускорителя ЛИУ-2.

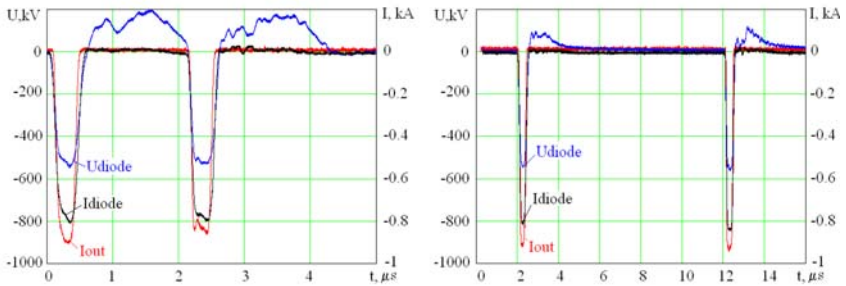


Рис. 5. Осциллограммы токов (сигналы инвертированы) и напряжений, снятые при работе ускорителя ЛИУ-2 в двухимпульсном режиме при разном интервале между импульсами. U_{diode} – напряжение на диоде, I_{diode} – ток катода, I_{out} – ток на выходе ускорителя.

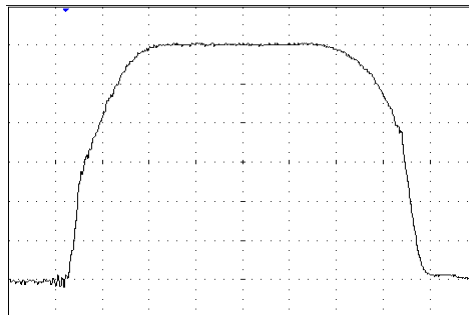


Рис. 6. Импульс тока электронного пучка на выходе ускорителя; масштаб по вертикали – 200 А/клетка, по горизонтали – 50 нс/клетка.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы. Можно отметить, что ускоритель ЛИУ-2 сдан в эксплуатацию заказчику. Установка используется для проведения рентгенографических опытов с просвечивающей способностью на уровне 70 мм при поперечном размере пучка на мишени менее 2 мм. Импульсная система обеспечивает питание индукционного ускорителя в необходимом объеме.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Акимов А.В., Бак П.А., Казарезов И.В. и др. Исследование параметров тиратронов с холодным катодом ТПИ1-10к/50 при напряжении до 50 кВ, токов до 10 кА при длительностях импульсов сотни нс. // Вопросы атомной науки и техники, серия: "Ядерно-физические исследования", Харьков, 2006, вып. 3(47), с.92-94.
2. Akimov A.V., Bak P.A., Kazarevov I.V. et al. The modulator for the 10 MeV 2 kA inductive accelerator pulse power supply. // Proceedings of RuPac 2006, Novosibirsk, 2006, p.284-286.
3. А.В.Акимов, П.А. Бак, А.А. Корепанов и др. Применение тиратронов с ненакаливаемым катодом для формирования серии высоковольтных сильноточных импульсов. // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2008, том. 3, вып. 4, с.68-73.
4. А.В. Акимов, П.В. Логачев, В.Д. Бочков и др. Применение тиратронов ТПИ1-10к/50 для создания модулятора, обеспечивающего питание индуктивно-резистивной нагрузки в двухимпульсном режиме. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: "Ядерно-физические исследования", Харьков, 2008, вып. 3(49), с.132-135.
5. A.V. Akimov, P.V. Logachev, V.D. Bochkov et al. Application of TPI-Thyratrons in a Double-Pulse Mode Power Modulator with Inductive-Resistive Load. // IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, vol.17. No 3, p.718-722.
6. А.В. Акимов, В.Е. Акимов, П.А. Бак и др. Система импульсного питания линейного индукционного ускорителя ЛИУ-2. // Приборы и техника эксперимента, 2012, №2, с.77-83.
7. А.В. Акимов, П.В. Логачев, А.А. Корепанов и др. Магнитопроводы из аморфной ленты для индукционного ускорителя. // Приборы и техника эксперимента, 2012, №2, с.129-134.

АКИМОВ Александр Валентинович

**Система высоковольтного импульсного питания
линейного индукционного ускорителя ЛИУ-2**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Сдано в набор 12.04. 2013 г.

Подписано в печать 15.04. 2013 г.

Формат 60x90 1/16. Объем 0.9 печ.л., 0.7 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 4

Обработано на РС и отпечатано
на ротапинтере ИЯФ СО РАН,

Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11