

Ш - 35

9-81-233

ШВЕЦ

Владимир Андреевич

РАЗРАБОТКА
И ИССЛЕДОВАНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
СИЛЬНОТОЧНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

Специальность: 01.04.13 - электрофизика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Дубна 1981

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики
Объединённого института ядерных исследований

Официальные оппоненты:

доктор технических наук
профессор Фёдор Алексеевич Водополян
доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник Алексей Фёдорович Писарев

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва.

Защита диссертации состоится " _____ 1981 г. в _____ часов
на заседании Специализированного совета Д.047.01.02 при
Лаборатории высоких энергий Объединённого института
ядерных исследований, г. Дубна, Московская область.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан " _____ 1981 г.

Учёный секретарь
Специализированного совета

М.Ф.Лихачёв

Ключевой проблемой повышения мощности электронных пучков в линейных индукционных ускорителях (ЛИУ) является уменьшение потерь частиц в процессе ускорения. При этом, как показали расчёты, особенно важным оказалось создать на входе в ЛИУ так называемый ^{*} ламинарный поток электронов, при осуществлении ускорения которого в ЛИУ потери в тракте оказываются наименьшими. Однако потери электронов могут быть вызваны не только неламинарностью потока, но и другими причинами, одной из которых является немоноэнергетичность инжектируемых в ЛИУ частиц. При этом под немоноэнергетичными подразумевались частицы, следующие на фронте и спаде ускоряющего импульса напряжения, приложенного к катоду источника электронов ^{/1/}.

Уместно заметить, что уменьшение процента немоноэнергетичных частиц за счёт сокращения длительностей фронта и спада в высоковольтных (сотни кВ) сильноточных установках возможно только до определённого предела, при котором указанные длительности составляет $100 + 500$ нс ^{/2-5/}. Таким образом, потери частиц, обладающих меньшими энергиями в инжектируемом импульсе электронов в ЛИУ и, как следствие, меньшими скоростями, неизбежны ^{/1/}.

Выходная средняя мощность пучка электронов в ускорителе ЛИУ-30 составит 200 кВт при энергии 30 МэВ и частоте посылок 50 Гц ^{*}. В связи с этим недопустимы потери пучка даже на уровне процента, которые приведут к нежелательным активированию ускорителя и термическому повреждению его элементов. В особенно тяжёлых условиях будет находиться начальная часть ЛИУ-30, где действие объёмного заряда максимально ^{*}.

Один из наиболее рациональных путей ликвидации потерь немоноэнергетичных частиц, следующих на фронте и спаде импульса электронов, предполагает введение в тракт пучка на выходе источника электронов импульсного магнитного дефлектора ^{/6/}.

Целью диссертационной работы является теоретическое и экспериментальное исследование условий формирования монохроматического пучка в сильноточном источнике электронов; разработка и создание действующей системы управления сильноточным электронным пучком; формирование и исследование монохроматического пучка с помощью этой системы в сильноточном источнике электронов.

^{*} Матора И.М. и др. ЖТФ, 1971, т. 41, с.1469-1471.

Элемент управления пучком - магнитный дефлектор - получает питание от быстродействующего двухканального импульсного генератора^{7,8/}. Первый канал его включается одновременно с началом фронта импульса источника электронов и своё действие оканчивает крутым спадом. В дефлекторе, представляющем собой два полуцилиндра, отделённых друг от друга узким разрезом и соединённых с одного конца поперечной проводящей перемычкой, протекают импульсные токи. Создаваемые этими токами магнитные поля направлены от щели к щели разреза и отклоняют электроны, следующие на фронте, на водоохлаждаемый токоприёмник. Второй канал генератора включается одновременно с началом спада импульса электронов, и эти частицы устраниаются из процесса ускорения аналогично. Вершина импульса электронов проходит дефлектор беспрепятственно, так как в эти моменты он не запитан. Далее в работе показано, что дефлектор должен быть согласован с трактом формирования генератора и нагрузкой^{9,10/}. В конце введения изложены требования, которым должна удовлетворять система управления пучком. Они заключаются в следующем.

Аксиальная симметрия пучка электронов и всех элементов тракта требует и конструктивной симметрии дефлектора и вакуумной камеры. При разработке импульсного генератора было выяснено, что два тиратронных канала его не могут работать на общую нагрузку^{9,12/}. Поэтому в дефлекторной секции реализовано два отдельных дефлектора, обращённых друг к другу для уменьшения связи короткозамыкающими перемычками^{9,12/}. Это, а также отсутствие достаточно большого участка тракта ЛЛУ для установки дефлекторов, ограничило их осевую протяжённость. Кроме того, длина дефлекторной секции ограничена наличием сильфонных развязок, токоприёмника, устройств для проводки пучка, промежутка дрейфа на входе для формирования пучка и т.д.^{12/}. Следовательно, необходимые импульсные токи управления будут измеряться сотнями ампер, т.к. в этих условиях возможно применение только одновиткового элемента отклонения. Многовитковый дефлектор не применим в наших условиях из-за большой собственной индуктивности, требующей больших напряжений и ограничивающей время нарастания тока^{11/}. Необходимость формирования моноэнергетичного пучка электронов влечёт за собой наносекундные времена срабатывания генератора, а следовательно, применение в схеме формирования импульсов тока так называемых обострителей^{7/}. Высокая надёжность, требующаяся от генератора, и большая частота следования посылок ограничивают рабочие напряжения обострителей. С этой точки зрения необходима разработка низкоимпедансных обострителей и схемы формирования импульсов в целом^{8/}.

В первой главе "Условия формирования монохроматического пучка в сильноточном источнике электронов" определена связь между геометрическими размерами и физическими свойствами одновиткового магнитного дефлектора применительно к параметрам этого источника. При этом рассмотрение вопроса о распространении импульса управляющего тока в цилиндрической двухпроводной системе (дефлекторе) для упрощения расчётов было разделено на две части^{11/}:

1) исследование свойств дефлектора в квазистационарном режиме, т.е. определение необходимой величины магнитного поля и отклоняющей способности;

2) исследование волновых свойств дефлектора при сверхвысоких частотах. Решение этой части задачи даёт возможность найти максимальную крутизну фронтов управляющих импульсов.

Получены расчётные формулы для величины магнитного поля в цилиндрическом дефлекторе и отклоняющей способности его^{11/}. Расчёты, выполненные на ЭВМ, показывают, что для полного отклонения на длине 15 см пучка электронов с начальным радиусом 1 см, энергией частиц 500 кэВ, током пучка 250 А при фокусирующем поле 300-400 Э и радиусе дефлектора 3 см необходима величина тока в дефлекторе 1000 А^{11/}.

Эти токи должны существовать только во время следования фронта и спада импульса электронов в системе управления пучком, и потому геометрические размеры дефлектора, выбранные с точки зрения эффективного отклонения пучка, являются определяющими для волновых свойств его^{9/}. Показано, что время установления $\tau_{уст}$ магнитного поля в дефлекторе составляет 2 нс. Оно определяется временем пробега $\tau_{пр}$ дефлектора импульсом тока длительностью фронта импульса генератора $\tau_{фр}$ и соответствует частоте 470 МГц. Остальные частоты, определяемые конструкцией дефлекторной секции, лежат выше этой граничной частоты^{11,9/} гр.

Параметры системы управления по быстродействию были проверены на электронной модели с помощью специально изготовленного индикатора - электронно-лучевой трубки^{11/}. В широком диапазоне длительностей фронта (от 2 до 100 нс) импульсы поля и тока хорошо совпадали по форме. Величина магнитного поля, измеренная в этих же экспериментах импульсным датчиком при номинальных значениях тока дефлектора, также соответствовала расчётной.

Во второй главе "Формирование фронта импульса отклоняющего тока в системе управления сильноточным электронным пучком" показано^{13-15/}, что только в ферритовых нелинейных обостряющих линиях могут быть получены импульсы тока, удовлетворяющие условиям форми-

рования монохроматического пучка по частоте следования, длительности перепада, амплитуде тока и временной стабильности.

Ферритовые нелинейные линии, в которых используется явление ударных электромагнитных волн[✱], были исследованы первоначально в двух традиционных вариантах: в виде коаксиальной и искусственной линий^{/15/}. Первые же эксперименты показали, что основным препятствием для получения номинальных значений амплитуд токов, на которые были рассчитаны выбранные ферритовые кольца, является низкая электрическая прочность феррита $E_{фп}$. И.Г. Катаевым[✱] было показано, что предельное значение амплитуды тока в нелинейной линии ограничено значением $E_{фп} = 10^5$ В/см. Превышение этой величины вызывает пробой по ферритовым кольцам, и потому для расчёта им была введена так называемая напряжённость магнитного поля $H_{кр}$ на пределе прочности. Ограничение по электрической прочности $E_{фп}$ определяло и всю дальнейшую методику расчёта: обоснование максимальной амплитуды тока исходя из $H_{кр}$, волнового сопротивления линии и, как следствие, высокого рабочего напряжения.

Таким образом, существование некоторого наименьшего значения волнового сопротивления (30–50 Ом), определяемого по этой методике низкой электрической прочностью феррита, явилось основным стимулом для оптимизации параметров обостряющих линий^{/15/}, поскольку традиционные варианты их в килоамперном диапазоне токов требовали для своей работы чрезмерно высоких напряжений. Последнее не обеспечивало надёжности, а также существенно затрудняло как ввод импульса тока в дефлектор, так и механизм извлечения и поглощения электромагнитной энергии.

Наиболее предпочтительными оказались два варианта: 1) исключить из процесса перемагничивания влияние низкой электрической прочности феррита; 2) снизить волновое сопротивление, а следовательно, и рабочее напряжение настолько, чтобы напряжённость электрического поля в феррите не достигала значения $E_{фп}$.

Первый вариант был реализован^{/15,16/} в низкоимпедансной нелинейной линии, каждое ферритовое кольцо которой заключено в разомкнутый проводящий экран. Экран электрически соединён с центральным проводником, на который насажены ферритовые кольца, и своей наружной поверхностью обращён к внешней оболочке. Зазор между наружной поверхностью экрана и внешней оболочкой заполнен диэлектриком.

[✱] И.Г. Катаев. Ударные электромагнитные волны. Изд-во "Советское радио", Москва, 1963.

Ферритовое кольцо оказалось в этом случае заключённым между двумя эквипотенциальными поверхностями "центральный проводник – внутренняя часть экрана", и низкая электрическая прочность материала его оказалась второстепенным фактором. Рабочее напряжение определялось лишь свойствами диэлектрика, и это позволило на порядок (до 5 Ом) снизить волновое сопротивление.

Анализ полученных результатов^{/15/} показал, что дальнейшее снижение волнового сопротивления возможно лишь при условии существенного уменьшения собственной индуктивности внутреннего проводника. Кроме того, ГОСТ на ферритовые изделия не предусматривает тонких колец. В ферритовых кольцах, выпускаемых промышленностью, при увеличении диаметра пропорционально увеличивается и осевой размер, что приводит к росту геометрических размеров нелинейной линии и, кроме того, существенно увеличивает время полного перемагничивания больших колец^{/18/}. По этим причинам наибольший диаметр ферритовых колец с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ), например, марки ВТ, ограничен и составляет 10 мм. Все вышесказанное привело к попытке^{/15,17/} создать "расщеплённую" структуру в нелинейной линии, чтобы увеличение диаметра для получения больших токов происходило за счёт параллельного включения нескольких ферритовых колец. В такой линии волновое сопротивление ρ_0 оказалось настолько малым (1,5 Ом), что рабочая напряжённость электрического поля E при достижении номинальной амплитуды перемагничивающего поля H всегда оказывалась меньше $E_{фп}$ ^{/18/}. Существенным для достижения столь малых значений ρ_0 здесь оказалась развитая структура ячейки со значительно увеличенной ёмкостью и уменьшенной индуктивностью. За счёт параллельного включения ферритовых колец в плоскости одной ячейки строго симметрично относительно друг друга и оси обостряющей линии была получена длительность перепада порядка 0,15 нс^{/19/}. В работах^{/18,19,20/} измерены характеристики комплекта созданных автором обостряющих линий, который изготовлен для системы управления пучком в виде двадцати отдельных секций по 100 ячеек в каждой^{/15/}. Каждая секция помещена в отдельный корпус, снабжённый коаксиальными разъёмами. Секции заполнены трансформаторным маслом; их размеры – диаметр 70 мм, длина 250 мм. Предельная амплитуда тока ударной волны – 1300 А.

Дальнейшее уменьшение волнового сопротивления с одновременным увеличением амплитуды тока можно реализовать^{/23,24/}, применяя диэлектрик с большим ϵ и ферритовые кольца марки НН, выпускаемые существенно большего диаметра, чем ферритовые кольца с ППГ. В сильных полях теряется существенное различие в характере перемагничивания и его скорости для ферритов ВТ и НН. Однако увеличение диа-

метра ферритовых колец и применение диэлектриков, которые при большом ϵ имеют значительную электрическую вязкость (напр., глицерин), ограничивают минимальное время перепада тока значением 1–5 нс. В обостряющей десятиканальной линии на общий ток 8 кА было получено волновое сопротивление 0,54 Ом ^{/25/}. Длительность перепада тока на выходе трёх последовательно включённых полуметровых секций составила 1,0–1,5 нс ^{/25/}. Нелинейные обостряющие каналы, объёмные в общем коаксиальном внешнем проводнике, были изготовлены из ферритовых колец марки 2000 НН, каждое из которых было заключено в разомкнутый проводящий экран; каналы заполнялись глицерином. Полностью характеристики всех обостряющих линий приведены в работах ^{/15, 18–20, 25/}.

Были проведены также ^{/19, 26/} экспериментальные исследования зависимости времени перемагничивания пермаллоя 50НН от длительности фронта прямоугольного намагничивающего импульса и величины объёма сердечника с точки зрения применимости в нелинейных линиях пермалловых торов для обострения фронта импульса до единиц наносекунд. Результаты исследований показывают, что при малых объёмах сердечников и достаточной амплитуде перемагничивающего импульса длительность перепада на выходе составляет 5–15 нс ^{/26/}. Такие перепады могут быть использованы для некоторых экспериментов.

Преимущества же пермалловых торов по сравнению с ферритовыми кольцами очевидны: нет ограничения на типоразмеры и рабочий перепад индукции ΔB значительно выше ^{/19, 26/}.

В третьей главе "Формирование отклоняющих импульсов тока в системе управления сильноточным электронным пучком" рассматриваются вопросы создания мощных низкоомных импульсных генераторов и дефлекторной секции ^{/8, 9, 27/}. Формирование фронта импульса не вызывает затруднений, так как он становится достаточно коротким после прохождения импульсом тока нелинейной линии.

При формировании спада оказалось необходимым учесть, что ^{/8/}: 1) длительность импульса отклоняющего тока должна быть достаточно большой – 0,8–1,0 мкс – при длительности спада до 2 нс; 2) после крутого спада первого импульса управляющего тока не должно быть послепульсов.

Исследования с этой точки зрения нелинейные насыщающиеся дроссели оказались неприемлемыми для формирования импульсов с крутым спадом в системе управления пучком, поскольку максимальная длительность импульса в них составляла 200–300 нс при длительности спада 5–15 нс, а при больших мощностях порядка 10 МВт после крутого спада следовала серия послепульсов, амплитуда которых составляла до 30% от основной.

На основании проведённого анализа показано, что в обычном тиратронном генераторе, к выходу которого подключён тракт формирования, можно удовлетворить высказанным требованиям, если реализовать следующую схему ^{/8, 27/}.

Импульс тока при разряде накопительной линии длительностью 2,5–3,0 мкс через ключ (тиратрон) после прохождения линейной кабельной трассы поступает на тройниковое разветвление. Здесь он делится в определённом соотношении между последовательно включёнными дефлектором с диссипативной нагрузкой и нелинейным короткозамкнутым плечом. На нагрузке появляется фронт импульса тока, по длительности равный фронту исходного импульса накопительной линии. После прохождения нелинейного плеча волна тока, отразившись от короткозамкнутого конца линии с противоположной полярностью и обостренным фронтом, поступает на тройниковое разветвление. Здесь она складывается с исходной падающей волной. Таким образом, благодаря введению в традиционную схему генератора на нелинейных линиях ^{*}: а) первого линейного плеча; б) диссипативной нагрузки вместо второго линейного разомкнутого плеча; в) дефлектора, установленного между тройниковым разветвлением и нагрузкой, были получены: а) импульс тока в дефлекторе амплитудой несколько килоампер длительностью 0,8–1,0 мкс; б) спад импульса тока, а следовательно, и магнитного поля в дефлекторе, порядка 2 нс; в) практическое отсутствие колебаний на рабочей части импульса электронов.

Физические основы работы схемы следующие ^{/8, 27/}. Линейное плечо улучшает согласование и отделяет генератор от тройникового разветвления; тем самым колебания, возникающие в схеме сложения, вернутся к нагрузке после отражения от накопительной линии только через время двойного пробега этого плеча. Электромагнитная энергия управляющих импульсов не выделяется в дефлекторе, а целиком рассеивается в диссипативной нагрузке. Это исключает возникновение колебаний на стыках "тракт-дефлектор-нагрузка". Диссипативная нагрузка подключена без дополнительных линейных трасс через дефлектор к тройниковому разветвлению, что значительно улучшает условия сложения волн и уменьшает послепульсы.

Второй импульс управляющего тока, который отклоняет частицы, следующие на спаде электронного импульса, формируется в схеме ^{/8/}, также состоящей из линейного накопителя, тиратрона, линей-

^{*} А.Н.Мешков. Приборы и техника эксперимента, 1965, № 5, с. 136–139.

ного плеча, обостряющей нелинейной линии, дефлектора и нагрузки. Однако, поскольку в этой части задачи нужен только крутой фронт, а после электронного импульса при частоте посыла 50 I/c следует пауза ≈ 20 мс, все эти элементы соединены последовательно. Накопительная линия формирует исходный импульс длительностью ≈ 1 мкс, фронт импульса затем укорачивается до 2 нс в нелинейной линии и через дефлектор импульс тока замыкается на нагрузку.

Ко входу и выходу нелинейных обостряющих линий параллельно им подключены в каждом канале генератора стабилизированные источники постоянного тока размагничивания с дроссельной схемой защиты от высокого импульсного напряжения ^{/12/}. Ток размагничивания необходим для создания условий возникновения ударных электромагнитных волн в нелинейных линиях и имеет полярность, противоположную полярности импульсов управляющего тока.

В самой накопительной линии реализован принцип коаксиальной структуры. Это позволило сформировать на малой нагрузке до 1 Ом импульсы тока амплитудой несколько килоампер длительностью до 3 мкс прямоугольной формы ^{/8,29/}.

Для сборки трактов формирования управляющих импульсов разработаны специальные соединительные элементы и низкоомная широкополосная нагрузка, позволяющая рассеивать импульсную мощность $3 + 4$ МВт ^{/10/}.

Исследование разработанной импульсной системы показало, что на стыках элементов схемы формирования достигнуто хорошее согласование ^{/8/}.

В дефлекторной секции функции отклонения и поглощения частиц разделены следующим образом ^{/9,12/}. На наружной поверхности изолированной керамической вакуумной камеры смонтированы дефлекторы с токовыми разъемами, а с внутренней стороны камера закрыта от воздействия пучка специальным токоприёмником отклонённых электронов ^{/28/}. Этот токоприёмник, как показали исследования ^{/32/}, без искажения и ослабления пропускает внутрь камеры магнитное поле отклонения и состоит из продольных, не образующих замкнутых контуров для вихревых токов водоохлаждаемых пластин ^{/28/}. Соосно с камерой установлены дополнительные соленоиды, предназначенные для проводки через дефлекторную секцию неотклоняемой части электронного пучка ^{/12/}.

Такая компоновка элементов дефлекторной секции не требует высоковольтного высокоплотного ввода импульсов тока в дефлектор и, кроме того, значительно облегчает согласование дефлектора со схемой формирования импульсов и нагрузкой ^{/12/}.

В четвёртой главе "Формирование и исследование импульсного монохроматического пучка в сильноточном источнике электронов" дано описание экспериментальной установки – сильноточного источника электронов ЭЭП-2, разработанного и сооружённого в ЛНФ ОИЯИ ^{/30,31/}. Параллельно с другими работами на ЭЭП-2 была проведена отработка описываемого здесь способа монохроматизации электронов.

К катоду источника электронов приложено отрицательное напряжение 300–400 кВ от импульсного трансформатора ^{/2-4/}, повышающего импульсное напряжение модулятора ^{/11/}, выполненного на тиратроне ТТИ-2500/50 с двойной формирующей линией, до требуемой величины. Электронный пучок, пройдя отверстие в заземлённом аноде, первый фокусирующий соленоид, участок формирования пучка (это одновременно и датчик огибающей), дефлекторную секцию, поступает в блок анализаторов ^{/30/}.

Эксперименты по формированию и исследованию монохроматического пучка проводились в две стадии ^{/30/}. Первоначально без дефлекторной секции получался номинальный ток с катода, измерялись распределения плотности тока по сечению пучка при различных режимах работы катода и соответствующие им распределения угловых скоростей и другие характеристики. Затем анодный блок и блок анализаторов расстыковывались и в промежутке монтировалась дефлекторная секция со схемой формирования импульсов. Схема формирования импульсов подключалась к двухканальному тиратронному генератору с помощью вышеописанных линейных кабельных трасс.

Расчёты по проводке пучка выполнялись по теории, изложенной в работе [§], по двум критериям: 1) отклонение огибающей пучка от оси не должно превосходить внутреннего радиуса токоприёмника; 2) угловое расхождение пучка на выходе из дефлекторной секции должно быть минимальным. В ходе экспериментов было выяснено, что расположение фокусирующих соленоидов и токи в них соответствуют рассчитанным и в дальнейшем соленоиды сразу же устанавливались на рассчитанные места ^{/32,33/}.

При включении генератора системы монохроматизации токи протекают по соответствующим дефлекторам и замыкаются на нагрузках, их положение на оси времени устанавливается регулированием времён задержки заданных генераторов относительно опорных синхроимпульсов запуска ^{/32/}. С части нагрузок первого и второго каналов импульсы тока подключаются к первому входу осциллографа, на второй вход поступает

[§] И.М.Матора, О.А.Стрелина. ОИЯИ, Р9-12673, Дубна, 1979.

сигнал с коллиматора – импульс электронного тока. Регулированием времени задержки запуска каналов системы управления крутой спад первого импульса отклоняющего тока совмещаем с началом вершины электронного импульса, а крутой фронт импульса отклоняющего тока второго канала – с началом спада (или через 0,5 мкс по отношению к первому каналу). Регулированием амплитуды тока в дефлекторах добиваемся исчезновения электронов на фронте и спаде. Результат действия отклоняющих токовых импульсов – монохроматический электронный пучок – регистрируется и исследуется в блоке анализаторов ^{/32,33/}. В некоторых из экспериментов были подключены к отдельной нагрузке пластины токo-приёмника ^{/32/}. Импульсы тока на ней хорошо совпадали с прежними фронтом и спадом импульса тока электронов на входе, т.е. выполнено условие монохроматизации, по которому немонoэнергетичные частицы должны быть поглощены в дефлекторной секции. Амплитуды токов в дефлекторах сравнивались с рассчитанными в первой главе для наблюдаемых в экспериментах значений энергий и токов электронов ^{/32,33/}. Совпадение достаточно удовлетворительное. В каждом из экспериментов измерялись: распределения плотности тока по сечению пучка, распределения угловых скоростей электронов в струйках тока, выделенных коллиматором при различных его положениях в вертикальной плоскости; в некоторых экспериментах были измерены с помощью дефлекторной секции вольтамперная и вольтсекундная характеристики катодов. Эти измерения, проведённые первоначально для каждого катода без дефлекторной секции, затем при её наличии и отключённых управляющих импульсах и далее при формировании монохроматического пучка, позволяют сделать вывод, что для пропускаемых через дефлекторную секцию частиц структура пучка и его качество сохраняются. В распределениях угловых скоростей для этих частиц при формировании монохроматического пучка также не наблюдалось резких изменений. Кроме того, в диссертации продемонстрирована возможность использования системы управления как быстродействующего затвора на выходе источника электронов (когда оба импульса тока системы управления "сдвинуты" вместе), что может оказаться весьма полезным в некоторых экспериментах на ускорителе ^{/32/}.

В конце главы сделано заключение, что на основании экспериментов, проведённых на штатном экzemпларе дефлекторной секции для ЛИУ-30, доказана возможность формирования монохроматического пучка при неизменности его качества для пропускаемых в ускоритель частиц ^{/33/}.

Основные результаты диссертации

Достигнута ЦЕЛЬ работы, состоявшая в разработке и создании быстродействующей системы управления сильноточным электронным пучком. Таким образом, решается ключевая проблема безопасной и надёжной работы начальной части ЛИУ-30. В этом же состоит и АКТУАЛЬНОСТЬ темы.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА. Предложены и разработаны впервые в сильноточной импульсной технике новые конструктивные схемы низкоомных нелинейных обостряющих линий. Они реализованы и проверены экспериментально в трёх вариантах. На основе этих линий разработаны и созданы генераторы мощных импульсов тока с амплитудой до 4 кА, длительностью импульса 1 мкс, длительностью спада 2+4 нс (первый) и длительностью фронта 2 и более нс (второй), частотой следования 50 Гц, позволившие в совокупности с оригинальной магнитной отклоняющей системой осуществить быстродействующее управление электронным пучком.

Впервые для сильноточных источников электронов осуществлено формирование импульсного монохроматического пучка. Доказан факт сохранения качества пропускаемого в ускоритель пучка при изменении параметров источника электронов и одновременном воздействии на немонoэнергетичные частицы отклоняющих импульсов магнитного поля.

По теме диссертации получено 12 авторских свидетельств на изобретения, 7 из них внедрено в систему управления пучком.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ. Создан и испытан комплекс аппаратуры, состоящий из систем питания, управления, блокировок, сигнализации, контрольно-измерительной аппаратуры и собственно системы управления пучком. Комплекс отработал свыше 1000 часов безотказно при исследованиях его параметров и в составе сильноточного источника электронов – пушки-диода. Проведены измерения разработанных и созданных нелинейных низкоимпедансных обостряющих линий, импульсных систем с малым волновым сопротивлением, их синхронизации с источником электронов, временной и амплитудной стабильности генерирования импульсов управляющих токов. Проведено исследование элементов управления, входящих в состав дефлекторной секции. Выполнено исследование пропускаемой рабочей части электронного пучка.

Выполненные и проверенные экспериментально разработки и исследования могут найти ПРИМЕНЕНИЕ при создании импульсных систем наносекундных ЛИУ/13,21/ для питания мощных импульсных магнитов, для монохроматизации пучков релятивистских электронов, а установки с указанными параметрами – для исследований по физике твёрдого тела и других прикладных работ.

Основные результаты ОПУБЛИКОВАНЫ в 33 работах, докладывались на Всесоюзных конференциях и семинаре по ускорителям.

Структура диссертации, содержание и названия глав одинаковы в ней и в автореферате. Раздел "Основные результаты диссертации" автореферата в диссертации имеет заголовок "Заклучение".

Общий объём работы - 140 стр., из них 80 страниц текста, 60 рисунков и 72 источника библиографии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Швец В.А. Условия монохроматизации электронного пучка в линейном индукционном ускорителе. Сообщение ОИЯИ, I3-8844, Дубна, 1975, с.3-14.
2. Анцупов П.С., Матора И.М., Швец В.А. IX Всесоюзная научная конференция "Разработка и практическое применение электронных ускорителей" /3-5 сент. 1975 г./ Тез. докл. Томский политехнический ин-т. Томск. ТГУ, 1975. с.137.
3. Анцупов П.С., Матора И.М., Швец В.А. Импульсный трансформатор экспериментальной электронной пушки. Препринт ОИЯИ, P13-9276, Дубна, 1975.
4. Анцупов П.С., Матора И.М., Швец В.А. Импульсный трансформатор электронной пушки. Приборы и техника эксперимента, 1976, № 4, с.137.
5. Анцупов П.С., Андросов А.В., Божков В.М., Быков В.Н., Журавлёв В.В., Забаров В.Б., Кладницкий В.С., Комендантов Ю.Н., Матора И.М., Меркулов Л.А., Метёлкин Ю.А., Петренко Ю.Д., Саввин В.А., Стрелина О.А., Харьзов Р.В., Швец В.А. Экспериментальная электронная пушка ЭЭП-2. Препринт ОИЯИ, P9-10999, Дубна, 1977.
6. Матора И.М., Швец В.А. Авторское свидетельство СССР №741347, от 20.08.74 г. Бюлл. ОИПОТЗ, 1980, №22, с.286.
7. Швец В.А. IX Всесоюзная научная конференция "Разработка и практическое применение электронных ускорителей" /3-5 сент. 1975 г./ Тез. докл. Томский политехнический ин-т. Томск, ТГУ, 1975, с.33.
8. Швец В.А. Формирование импульсов монохроматизации электронного пучка ЛИУ. Сообщение ОИЯИ, I3-9077, Дубна, 1975, с.3-12.
9. Швец В.А. О согласовании дефлекторной секции ЛИУ с трактом формирования импульсов монохроматизации. Сообщение ОИЯИ, 9-10301, Дубна, 1976, с.3-11.

10. Швец В.А. Низкоомная широкополосная нагрузка килоамперных импульсных генераторов. Сообщение ОИЯИ, I3-10302, Дубна, 1976, с.3-10.
11. Анцупов П.С., Матора И.М., Швец В.А. Импульсный модулятор экспериментальной электронной пушки. Сообщение ОИЯИ, I3-9277, Дубна, 1975, с.3-9.
12. Швец В.А. Формирование импульсного монохроматического пучка в сильноточной электронной пушке. ОИЯИ, Б1-11798, Дубна, 1978, с.1-14.
13. Харьзов Р.В., Швец В.А. Авторское свидетельство СССР №612426, от 05.01.77 г. Бюлл. ОИПОТЗ, 1978, №23, с.194.
14. Харьзов Р.В., Швец В.А. О возможности применения в ЛИУ магнитных генераторов импульсов. Сообщение ОИЯИ, 9-9523, Дубна, 1976, с.3-16.
15. Харьзов Р.В., Швец В.А. Нелинейная квазиоаксиальная линия для формирования ударных электромагнитных волн. Сообщение ОИЯИ, I3-8709, Дубна, 1975, с.3-11.
16. Харьзов Р.В., Швец В.А. Авторское свидетельство СССР №539372, от 25.07.72 г. Бюлл. ОИПОТЗ, 1976, №46, с.164.
17. Харьзов Р.В., Швец В.А. Авторское свидетельство СССР №5776556, от 24.12.73 г. Бюлл. ОИПОТЗ, 1977, №39, с.156.
18. Швец В.А. Исследование нелинейной квазиоаксиальной линии для формирования ударных электромагнитных волн. ОИЯИ, Б1-13-11399, Дубна, 1978, с.1-12.
19. Швец В.А. Длительность фронта стационарной ударной волны в многоканальной обостряющей линии. Сообщение ОИЯИ, I3-12269, Дубна, 1979, с.9-11.
20. Швец В.А. Исследование нелинейной многоканальной обостряющей линии. Приборы и техника эксперимента, 1980, № 5, с.132.
21. Матора И.М., Харьзов Р.В., Швец В.А. Авторское свидетельство СССР №447118, от 25.07.72 г. Бюлл. ОИПОТЗ, 1978, №48, с.247.
22. Харьзов Р.В., Швец В.А. Электронная нагрузка в линейном индукционном ускорителе. Сообщение ОИЯИ, 9-11395, Дубна, 1978, с.8-9.
23. Швец В.А. Перспективы увеличения тока в нелинейных линиях для формирования ударных электромагнитных волн. Сообщение ОИЯИ, I3-10300, Дубна, 1976, с.3-7.
24. Швец В.А. Авторское свидетельство СССР №660214, от 17.11.77 г. Бюлл. ОИПОТЗ, 1979, №16, с.274.

25. Швец В.А. Нелинейная многоканальная обостряющая линия на ферритовых кольцах с прямоугольной петлёй гистерезиса. Препринт ОИЯИ, Р13-80-670, Дубна, 1980, с.3-10.
26. Швец В.А. Зависимость времени перемагничивания пермаллоя 50 НИ от длительности фронта прямоугольного намагничивающего импульса и величины объёма сердечника. Сообщение ОИЯИ, I3-II799, Дубна, 1978, с.8-9.
27. Швец В.А. Авторское свидетельство СССР №718901, от 17.01.77 г. Бюлл. СИПОТЗ, 1980, №8, с.193.
28. Швец В.А. Авторское свидетельство СССР №721928, от 09.11.77 г. Бюлл. СИПОТЗ, 1980, №10, с.214.
29. Швец В.А. Авторское свидетельство СССР №746890, от 26.04.74 г. Бюлл. СИПОТЗ, 1980, №38, с.350.
30. Анцупов П.С., Андросов А.В., Божков В.М., Быков В.Н., Журавлёв В.В., Заббаров В.Б., Кладницкий В.С., Комендантов Ю.Н., Матора И.М., Меркулов Л.А., Метёлкин Ю.А., Петренко Ю.Д., Саввин В.А., Стрелина О.А., Харьюзов Р.В., Швец В.А. Мощная экспериментальная электронная пушка на напряжение порядка 500 кВ. Радиотехника и электроника, 1978, т. XXIII, № 12, с.2605.
31. Анцупов П.С., Андросов А.В., Божков В.М., Быков В.Н., Журавлёв В.В., Заббаров В.Б., Кладницкий В.С., Комендантов Ю.Н., Матора И.М., Меркулов Л.А., Метёлкин Ю.А., Петренко Ю.Д., Саввин В.А., Стрелина О.А., Харьюзов Р.В., Швец В.А. VI Всесоюзный семинар по численным методам решения задач электронной оптики. /19-21 сент. 1978 г./. Тез. докл. Рязанский политехнический ин-т. Рязань. РПИ, 1978.
32. Швец В.А. Формирование импульсного монохроматического пучка в сильноточной электронной пушке. Радиотехника и электроника, 1980, т. XXV, № 4, с.828.
33. Швец В.А. Дефлекторная секция ЛИУ-30. Сообщение ОИЯИ, Р9-80-349, Дубна, 1980, с.3-10.

Рукопись поступила в издательский отдел
3 апреля 1981 года.