

Ф-273

9-90-251

ФАТЕЕВ
Анатолий Александрович

УДК 621.384.6

**РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ
ИМПУЛЬСНОЙ СИСТЕМЫ ЛИНЕЙНОГО
ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ СИЛУНД-20**

Специальность: 01.04.13 - электрофизика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Дубна 1990

Работа выполнена в Общепитутском научно-методическом отделении Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук Долбилов Геннадий Варламович

Официальные оппоненты:
доктор технических наук Мешков Анатолий Николаевич
кандидат физико-математических наук Коваленко Александр Дмитриевич

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Научно-исследовательский институт ядерной физики при Томском политехническом институте.

Защита диссертации состоится " _____ 1990 года
в _____ на заседании Специализированного совета Д-047.01.02 при
Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных
исследований.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " _____ 1990 года.

Ученый секретарь
Специализированного совета  М. Ф. Лихачев

Актуальность. В научных исследованиях и технике широкое применение находят линейные индукционные ускорители. Основным направлением развития ЛИУ в последние годы является повышение мощности пучков.

Одна из наиболее сложных задач, возникающих при этом, состоит в формировании мощных импульсов наносекундного диапазона для ускорения сильноточных пучков заряженных частиц. Особые трудности возникают при формировании ускоряющих импульсов длительностью несколько десятков наносекунд и меньше. Путь увеличения количества традиционных наносекундных генераторов представляется малоперспективным, что с неизбежностью приводит к необходимости разработки новых типов генераторов для ЛИУ.

Успешное решение этой задачи позволяет добиться существенного прогресса не только в развитии ЛИУ, но и в других областях ускорительной (в частности, формирования импульсов для отклоняющих систем) и высоковольтной импульсной техники.

Цель работы заключалась в исследовании схем усиления импульсной мощности с применением нелинейных ферромагнитных элементов при больших ($10^8 + 10^9$ Вт) уровнях мощностей, разработка и создание на этой основе мощных магнитных генераторов импульсов наносекундного диапазона и импульсной системы линейного индукционного ускорителя СИЛУНД-20.

Научная новизна приведенных в диссертации результатов определяется их связью с развитием нового направления техники ЛИУ, характеризующегося применением схем усиления импульсной мощности и формирования наносекундных импульсов на нелинейных ферромагнитных элементах. Впервые создана импульсная система ЛИУ на основе схем сжатия.

Практическая ценность. Научные результаты, полученные в диссертационной работе, использованы при проектировании и создании линейного индукционного ускорителя СИЛУНД-20, корректирующего устройства системы формирования электронных колец и положили начало развитию нового класса ЛИУ - ЛИУ с использованием принципа сжатия во времени электромагнитной энергии.

Апробация работы. Основные результаты работ автора, связанных с темой диссертации, докладывались на научных семинарах ОНМО ОИЯИ, на Совещании по проблемам коллективных методов ускорения (Дубна, 1982г.), на IX Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 1984г.), на Международной конференции "ЛИНАК-86"

(Станфорд, США, 1986г.) и на XIII Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий (Новосибирск, 1986г.).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 9 работах, приведенных в списке литературы.

Структура диссертации. Работа состоит из введения, трех глав и заключения. Общий объем составляет 90 страниц, включая 26 иллюстраций, список литературы насчитывает 47 наименований, каждая глава заканчивается выводами.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы, сформулирована цель работы и дано краткое содержание основных разделов диссертации.

Первая глава посвящена решению проблем усиления импульсной мощности и формирования импульсов в наносекундной области длительностей с помощью коаксиальных нелинейных линий, заполненных ферритом.

В такой линии на фронте импульса может образовываться ударная электромагнитная волна* с коротким ($\sim 10^{-9}$ сек) перепадом напряжения и тока. В случае, когда относительная магнитная проницаемость на фронте волны $\mu_y \gg 1$, зарядка линии происходит за время много больше, чем ее разрядка на нагрузку, то есть возможно усиление импульсной мощности.

Показано^{/8/}, что максимальный коэффициент усиления при работе на согласованную нагрузку достигается в случае максимального заполнения линии ферритом и зависит от амплитуды напряженности магнитного поля ударной волны H_y (рис.1).

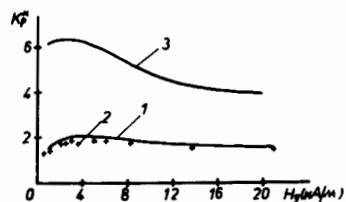


Рис.1. Зависимость максимального коэффициента усиления от амплитуды напряженности магнитного поля в линии: 1 - расчет по измеренным значениям μ_y и $\mu_{отр}$; 2 - экспериментальные точки; 3 - расчет для волны, отраженной от короткозамкнутого конца линии.

Получены также зависимости относительной магнитной проницаемости на фронте ударной (μ_y) и отраженной ($\mu_{отр}$) волн от H_y .

Приведены формулы для инженерного расчета ферромагнитных линий с использованием полученных экспериментальных данных.

* Катаев И.Г. "Ударные электромагнитные волны". Сов. радио, 1963.

Второй раздел первой главы посвящен вопросам формирования мощных импульсов наносекундной длительности ($\sim 20-30$ нсек) для ЛИУ. Проблема формирования наносекундных импульсов является одной из наиболее сложных в магнитных генераторах и тесно связана с проблемой усиления мощности в наносекундном диапазоне.

С целью решения этих проблем была предложена^{/9/} схема (рис.2), включающая в себя ДФЛ, одно из плеч которой заполнено ферритом, и нелинейный ферромагнитный дроссель L_k , который играет роль коммутатора. ДФЛ заряжается резонансным образом от накопительной емкости C_n , приблизительно равной суммарной емкости плечей. В общем случае емкость C_n является элементом цепи сжатия, а дроссель L_n и коммутатор К заменяются нелинейным дросселем.

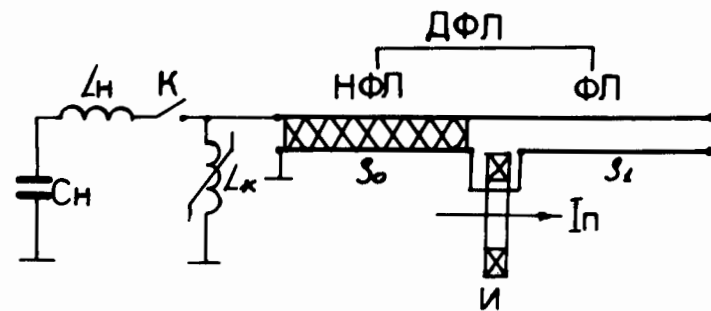


Рис.2. Принципиальная схема устройства для формирования ускоряющих импульсов.

В начальном состоянии феррит в линии и нагрузке (индуктор ЛИУ) намагничен и ДФЛ заряжается как сосредоточенная емкость. При этом дроссель L_k ненасыщен и обладает значительным импедансом. В момент достижения максимума напряжения дроссель L_k насыщается и на входе ДФЛ образуется перепад напряжения. При распространении по нелинейной формирующей линии (НФЛ) он преобразуется в более короткий по длительности и на индукторе формируется прямоугольный импульс.

Расчеты такого звена показали, что максимальный коэффициент полезного действия достигается при условии равенства волновых сопротивлений нелинейного и линейного участков ($\rho_0 = \rho_1$) и определяется отношением длительности перепада напряжения на входе НФЛ $\tau_{вх}$ к длительности импульса на нагрузке $T_{и}$:

$$\eta \approx \frac{[1 + 1/(\tau_{вх}/2T_{и} + \sqrt{(\tau_{вх}/2T_{и})^2 + 1})]^2}{4} \approx \frac{(1 + T_{и}/\tau_{вх})^2}{4}. \quad (1)$$

Проведены испытания такого формирующего звена, показавшие возможность его использования в модуляторе ЛИУ наносекундного диапазона ($T_{и} \approx 20$ нсек).

Вторая глава посвящена вопросам практического использования нелинейных схем усиления мощности в ускорительной технике.

Предложена схема магнито-тиратронного генератора мощных высоковольтных импульсов с коротким спадом и малым уровнем послеимпульсов (рис.3) для питания корректирующих пластин системы захвата электронного пучка. Повышающий трансформатор с насыщающимся сердечником служит одновременно и элементом звена сжатия. Короткий (~ 1 нсек) спад формируется короткозамкнутой линией Φ , заполненной ферритом.

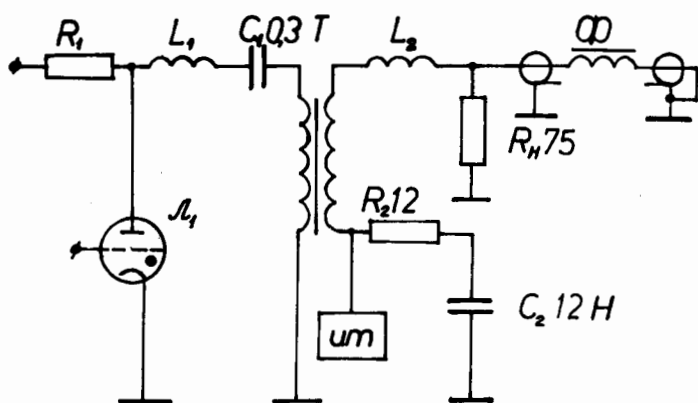


Рис.3. Схема генератора мощных высоковольтных импульсов с коротким спадом. L_1 - тиратрон ТГИ1-2500/50.

Определены основные причины возникновения послеимпульсов в такой схеме и указаны пути их уменьшения. В результате наладки получена рекордная для такого типа генераторов импульсная мощность ~ 150 МВт. Генератор формирует импульсы амплитудой до 100 кВ на нагрузке 75 Ом, со спадом 10^{-9} сек. Уровень послеимпульсов не превышает $\pm 15\%$.

Генератор работает с частотой повторения до 50 Гц. Временная нестабильность положения спада импульса на нагрузке Δt определяется нестабильностью зарядного напряжения и при существующей в настоящее время системе стабилизации ($\Delta U/U < 0,1\%$) не превышает 1 нсек. Созданный генератор полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к источнику питания корректорных пластин системы захвата электронного пучка. Длительная эксплуатация показала его высокую надежность.

Во втором разделе второй главы рассмотрены вопросы разработки и создания магнито-тиратронного модулятора для линейного индукционного ускорителя наносекундного диапазона. Определена общая требуемая мощность модулятора, включая потери на перемагничивание индукторов^{2/}. Рассмотрены основные характеристики ячейки сжатия с сосредоточенными параметрами на энергию $\sim 10^2$ Дж (емкость 0,1 мкФ при напряжении ~ 50 кВ, сердечник дросселя с изменением потока $\Delta \Phi \approx 9 \cdot 10^{-8}$ В·сек). Показано, что максимальный коэффициент усиления мощности такого звена ($K \approx 5$) достигается при длительностях выходного импульса $\tau > 300$ нсек. Экспериментально исследованы предельные по времени и мощности характеристики импульса при работе на резистивную нагрузку.

Такая ячейка может быть использована для запитки конечных каскадов модулятора, выполненных по схеме рис.2, что и было реализовано на головном образце ускорителя СИЛУНД-20^{1/}, где в модуляторе использовались 12 нелинейных ДФЛ с коммутирующими дросселями на ферритовых сердечниках.

Приведены описание схемы и принципа работы модулятора, формулы для расчета напряжения на нагрузке (пучке), основные технические характеристики элементов и узлов. На рис.4 показаны импульсы напряжения на входе в индуктор (а) и импульсы тока (б) в резистивной нагрузке индукторов (эквивалент пучка). Отличие их по форме связано с влиянием индуктивностей рассеяния и конечного времени распространения сигналов по ферритовым сердечникам индукторов.

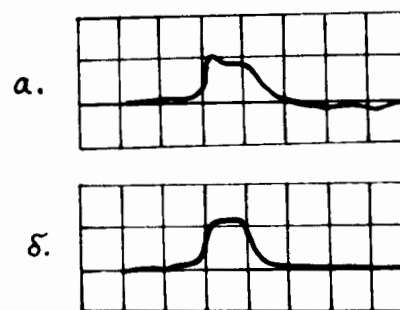


Рис.4. Осциллограммы импульсов:
а. - напряжения на входе в индуктор;
б. - тока на эквивалентной нагрузке.
Развертка 17 нсек/дел.

Приведены экспериментальные нагрузочные характеристики одной ускоряющей секции, которые находятся в хорошем соответствии с расчетными. Получена импульсная мощность ~ 400 МВт в пучке при токе ~ 1 кА (общая выходная мощность ~ 600 МВт). Модулятор был запущен на головном образце ускорителя СИЛУНД-20 совместно с электронным источником и проработал $\sim 10^3$ часов с цикличностью 50 Гц. Тем самым

впервые была экспериментально доказана возможность использования нелинейных схем усиления импульсной мощности в модуляторах линейных индукционных ускорителей. В дальнейшем на головном образце была запущена вторая ускоряющая секция с аналогичным модулятором, а затем оба модулятора были объединены в один с общим коммутатором.

Третья глава посвящена решению проблемы создания импульсной системы линейного индукционного ускорителя СИЛУНД-20^{/2-5/}, которая включает в себя 5 магнито-тиatronных модуляторов с индукционными ускоряющими секциями, систему размагничивания нелинейных ферромагнитных элементов и устройство стабилизированной резонансной зарядки.

Рассмотрена блок схема и назначение важнейших узлов системы. Приведено описание схемы (рис.5) и конструкции модулятора и индукторов, обоснованы основные изменения по сравнению с модулятором головного образца, вызванные более жесткими требованиями по стабильности и надежности.

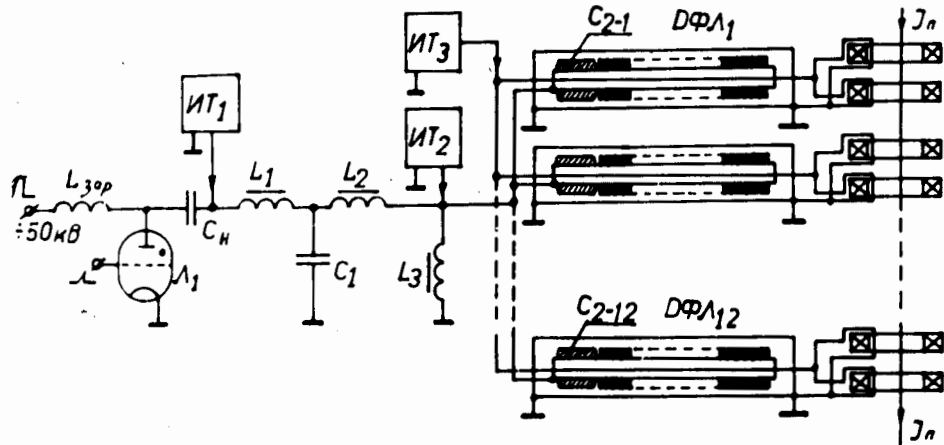


Рис.5. Принципиальная схема модулятора ускорителя СИЛУНД-20.

Высокая повторяемость начальной намагниченности ферромагнитных сердечников обеспечивается двуполярными импульсными источниками тока ИТ₁ - ИТ₃. Кроме того, дроссель L₂, наиболее сильно влияющий на задержку выходного импульса, размагничивается высокостабильным током зарядки модуляторов.

Модуляторы формируют прямоугольные импульсы длительностью ~30нсек и мощностью ~600МВт. Рабочая частота повторения до 50Гц. Джиттер выходного импульса не превышает 2нсек при общем времени задержки ~3мсек относительно времени коммутации тиратрона.

Во втором разделе третьей главы проведен анализ тиратронно-резонансной зарядки модуляторов. Показано, что она не обладает достаточной устойчивостью при работе с тиратронными генераторами.

Предложена двухконтурная схема зарядки (рис.6)^{/6/}, обладающая повышенной помехозащищенностью. Стабилизация напряжения осуществляется с помощью запираемого тиратронного ключа Т₂ на буферной емкости С₂.

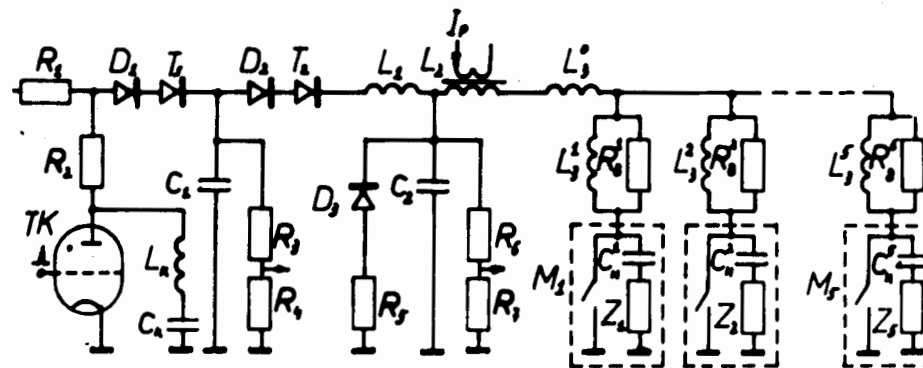


Рис.6. Схема устройства зарядки модуляторов.

Промежуточная емкость С₂, равная суммарной емкости модуляторов, заряжается резонансным образом через дроссель L₁ и тиратронный ключ Т₂ и только после его закрытия происходит зарядка накопительных емкостей модуляторов. Таким образом, срабатывание тиратронов в любой момент времени не приводит к режиму короткого замыкания высоковольтного выпрямителя. Схема обеспечивает зарядку емкости ~1мкФ до 50кВ с циклическостью до 50Гц. Нестабильность напряжения не превышает 0,04%, что является достаточным для того, чтобы исключить его влияние на джиттер ускоряющих импульсов модуляторов.

В третьем разделе приведены основные результаты длительной (>10⁴ часов) эксплуатации всей импульсной системы, в целом подтверждающие правильность и целесообразность выбранной схемы построения и технической реализации отдельных узлов.

Импульсная система ускорителя СИЛУНД-20 обеспечивает суммарную энергию 2МэВ при токе нагрузки 1кА и работает с частотой до 50Гц. Рассмотрены основные результаты работы импульсной системы с пучком. Внешний вид ускорителя СИЛУНД-20 показан на рис.7.

В заключение перечислены основные выводы по проделанной работе и обобщены результаты работы в целом.



Рис.7. Внешний вид ускорителя СИЛУНД-20.

Основные результаты, полученные при выполнении диссертационной работы.

1. Впервые в практике создания ЛИУ реализована возможность использования схем усиления импульсной мощности на нелинейных ферромагнитных элементах при формировании ускоряющих импульсов.

Проведенные исследования вариантов схем усиления использованы при проектировании и создании линейного индукционного ускорителя СИЛУНД-20.

Актуальность выбранного направления исследований подтверждается дальнейшим развитием ЛИУ наносекундного диапазона.

2. Предложена разработана и создана импульсная система линейного индукционного ускорителя СИЛУНД-20 с параметрами: суммарная энергия ~ 2 МэВ при токе ~ 1 кА, длительность ускоряющих импульсов $\sim 3 \cdot 10^{-9}$ сек, частота повторения до 50 Гц.

3. Предложен, разработан и создан модулятор линейного индукционного ускорителя с импульсной мощностью ~ 600 МВт, длительностью $\sim 3 \cdot 10^{-9}$ сек, частотой повторения импульсов до 50 Гц. В модуляторе применена новая схема формирования мощных наносекундных импульсов

с использованием нелинейных ферромагнитных линий, имеющая приоритетную новизну, подтвержденную авторским свидетельством на изобретение.

4. Экспериментально доказана возможность стабилизации временного положения импульсов магнито-тиратронных генераторов с точностью не хуже 0,1% общего времени задержки от момента срабатывания коммутатора.

5. Предложена, разработана и создана система резонансно-тиристорной зарядки модуляторов, обладающая повышенной надежностью. Надежность обеспечивается двухконтурной схемой зарядки.

6. Предложен, разработан и создан магнитный генератор высоковольтных импульсов с коротким спадом. Генератор формирует импульсы амплитудой до 100кВ на нагрузке 75 Ом, со спадом $\sim 10^{-9}$ сек. Исследованы основные причины возникновения послеимпульсов в таких генераторах и выработаны рекомендации по их уменьшению. Достигнут минимальный уровень послеимпульсов $\pm 15\%$.

7. Проведены исследования работы нелинейных ферромагнитных линий в режиме усиления импульсной мощности. Экспериментально показано, что существует предельный коэффициент усиления, определяемый непрямоугольностью петли гистерезиса. Получена экспериментальная зависимость коэффициента усиления от амплитуды магнитного поля в феррите марки 600НН. Получено, что максимальный коэффициент усиления равен ~ 2 для проходящей и ~ 6 для отраженной волн.

Литература.

1. Горинов Б.Г., Долбилов Г.В., Лебедев Н.И., Петров В.А., Петров В.А., Саранцев В.П., Сумбаев А.П., Фатеев А.А., Эберль У. Экспериментальное исследование систем индукционного ускорителя с повышенной циклическостью СИЛУНД II. ОИЯИ, 9-12148, Дубна, 1979.

2. Долбилов Г.В., Лебедев Н.И., Петров В.А., Петров В.А., Саранцев В.П., Сумбаев А.П., Фатеев А.А. В кн.: Коллективные методы ускорения. ОИЯИ, Д9-82-664, Дубна, 1982, с.101.

3. Долбилов Г.В., Дубовик Л.В., Инкин В.Д., Лебедев Н.И., Николаев В.П., Петров В.А., Петров В.А., Саенко Т.П., Саранцев В.П., Сумбаев А.П., Фатеев А.А., Шеулин А.С., Щинов Б.Г. Коллективный ускоритель тяжелых ионов КУТИ-20. СИЛУНД-20, системы управления, контроля и диагностики. ОИЯИ, Р9-83-307, Дубна, 1983.

4. Александров В.С., Белошицкий П.Ф., Беляев Л.Н., Фатеев А.А., Шорнак Г. В кн. Ускорительный комплекс тяжелых ионов в ОИЯИ. ОИЯИ, Р9-83-613, Дубна, 1983.

5. Долбилов Г.В., Петров В.А., Фатеев А.А. Линейный индукционный ускоритель электронов СИЛУНД-20. ОИЯИ, Р9-86-290, Дубна, 1986.

6. Долбилов Г.В., Лебедев Н.И., Узлов С.В., Фатеев А.А., Щинов Б.Г. Система стабилизированной резонансной зарядки модуляторов ускорителя СИЛУНД-20. ПТЭ, №5, 1986, с.22.

7. Долбилов Г.В., Петров В.А., Фатеев А.А. Магнитный генератор высоковольтных импульсов с коротким спадом. ПТЭ, №1, 1986, с.98.

8. Фатеев А.А. Усиление импульсной мощности в нелинейных ферромагнитных линиях. ПТЭ, №1, 1988, с.101.

9. Долбилов Г.В., Фатеев А.А. Импульсная система линейного индукционного ускорителя. Авторское свидетельство СССР № 724065, Н 05 Н 5/00. Приоритет от 03.07.78. Бюл. №47, 1986.

Рукопись поступила в издательский отдел
6 апреля 1990 года.