

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

К 783

9-88-419

УДК 621.384.64

КРАСНЫХ

Анатолий Константинович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ
МОЩНЫХ УСТРОЙСТВ
НАНОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА
ДЛЯ УСКОРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ**

Специальность 01.04.13 – электрофизика

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

Дубна 1988

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

Научный руководитель:

Саранцев

доктор физико-математических
наук, профессор

Владислав Павлович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор

Собенин

Николай Павлович

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник

Коваленко

Александр Дмитриевич

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Физический институт им. П.Н.Лебедева АН СССР,
Москва.

Защита диссертации состоится " ____ " _____ 1988 г.

в _____ часов на заседании специализированного совета
Д-047.01.02 при Лаборатории высоких энергий Объединённого
института ядерных исследований, Дубна Московской обл.,
в конференц-зале ДВЭ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ДВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан " ____ " _____ 1988 г

Ученый секретарь специализированного совета

М.Ф.Лихачев

М.Ф.Лихачев

Общая характеристика работы

Актуальность. Последние десятилетия интенсивно развивается физика и техника сильноточных релятивистских пучков, которые необходимы для решения проблем в таких областях, как управляемый термоядерный синтез, релятивистская СВЧ-электроника, лазерная техника, ускорители будущего. Поэтому актуальной является задача проведения исследований, направленных на разработку схемных решений и создания по ним мощных импульсных устройств наносекундного диапазона (нс). Диссертация посвящена поиску и исследованию новых решений высоконадежных, стабильных по времени и значительных по мощности импульсных устройств для современной ускорительной техники. В работе рассмотрены вопросы, относящиеся к разработке модуляторов и индукторов для линейных индукционных ускорителей (ЛИУ), обладающих повышенным темпом набора энергии и коэффициентом полезного действия. Актуальность этого направления связывается с поисками путей создания ускорителей следующего поколения.

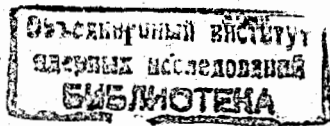
Цель работы заключалась в разработке, исследовании и создании мощных импульсных устройств нс-диапазона, выполненных на основе сочетания мощного тиратрона с нелинейными элементами, в том числе: 1) исследование и разработку индукторов для сильноточных ЛИУ с повышенным темпом набора энергии и КПД; 2) исследования схемных решений новых модуляторов для ЛИУ, содержащих звенья сжатия мощности на основе крупногабаритных ферромагнитных сердечников; 3) исследования предложенной модифицированной двойной формирующей линии (МДФЛ); 4) разработку и создание мощных импульсных устройств инжекции и быстрого вывода.

Научная новизна. Мощные импульсные устройства нс-диапазона для ускорительной техники построены по новым схемам. Впервые экспериментально исследованы звенья сжатия мощности на уровнях сотен мегаватт. В звеньях сжатия переключающие дроссели выполнены из крупногабаритных сердечников индукторов ЛИУ.

Предложена и исследована новая схема формирования на основе МДФЛ. Схема предназначена для запитки сердечников индукторов ЛИУ.

Предложен и исследован вариант "безжелезного" индуктора ЛИУ, обладающий повышенным темпом набора энергии при токах в нагрузке ~10 кА. Предложенный вариант ЛИУ защищен авторским свидетельством. (А.с. 1263189 (СССР). - Оп, 1987, № 14, с. 272).

Предложен и исследован вариант твердотельного высокоудельно-энергоемкого индуктора с рекордной величиной электрического поля напряженностью около 50 кВ/см.



Предложены, созданы и исследованы новые импульсные устройства для системы инжекции в прототип коллективного ускорителя тяжелых ионов (ПКУТИ) и синхротрон.

Предложен способ формирования сильноточных (~ 1 кА), ультрарелятивистских ($\gamma \sim 30$) пучков электронов нс-длительности и устройство для его осуществления. Предложенный способ и устройство защищены авторским свидетельством. (А.с. 1266452 (СССР). — ОИ, 1977, №14, с. 272).

Практическое применение полученных результатов

Проведенные исследования и эксперименты с крупногабаритными ферромагнитными сердечниками и с линиями передач, содержащими нелинейные элементы, позволили получить данные, которые использованы при разработке мощных импульсных устройств, наносекундного диапазона для ускорительной техники.

Разработаны и внедрены в эксперимент ряд мощных импульсных устройств наносекундного диапазона для коллективного ускорителя тяжелых ионов. Высокая эксплуатационная надежность и работоспособность системы устройств инжекции на прототипе КУТИ показали эффективность и перспективность развитого подхода к разработке аналогичных систем, работающих с повышенной частотой повторения.

Экспериментальные данные, полученные при разработке систем инжекции, использованы при проектировании систем ввода и вывода для нуклотрона ЛВЭ ОИЯИ.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Применение в ускорительной технике сочетания мощного водородного тиратрона с нелинейными ферромагнитными элементами как с сосредоточенными, так и с распределенными параметрами, целесообразно для получения импульсов мощности нс диапазона на уровнях нескольких десятков ГВт.

2. За счет использования в модуляторах ЛИУ схем сжатия мощности с нелинейными дросселями на основе крупногабаритных сердечников происходит увеличение мощности в каждом звене в интервале $2 \cdot 8$ в диапазоне длительностей импульсов, соответственно $100 \div 1000$ нс.

3. Достижимый коэффициент передачи энергии от последнего звена сжатия в МДФЛ $\sim 0,6$ позволяет сформировать импульс длительностью ~ 30 нс на уровнях ~ 15 ГВт с высокой циклическостью при помощи одного тиратрона и шести звеньев сжатия.

4. Для нахождения динамического сопротивления крупногабаритных сердечников индукторов ЛИУ применима методика инженерного расчета, известная в теории импульсного перемагничивания малогабаритных сердечников для устройств автоматики и вычислительной техники.

5. Использование комммутирующих свойств линий с нелинейной средой (ЛНС) позволяет в индукторе ЛИУ достичь напряженности электрического поля на уровне ~ 10 кВ/см при токах в нагрузке ~ 10 кА.

6. В предложенном варианте индуктора, содержащем в сочетании сикондовую керамику и полупроводниковый материал, реализуема напряженность ускоряющего поля, близкая к напряженности ускоряющего поля в резонансных ускорителях.

7. Благодаря использованию сочетания мощного тиратрона с линиями с нелинейной средой в устройствах, относящихся: а) к электродинамической системе инжекции электронов в камеру адгезатора ПКУТИ достигается коэффициент захвата на уровне 0,5; б) к электродинамической системе инжекции в синхротрон последовательности пяти ступеней, следующих через каждые 20 нс, создается импульс силы в апертуре 12×8 см² с эффективным полем ~ 370 Э и длительностью фронта, плато и спада соответственно 15 нс, 40 нс и 10 нс.

8. В системе вывода электронов из адгезатора ПКУТИ кольцевая форма преобразуется в линейную, и формируются сильноточные (~ 1 кА), ультрарелятивистские ($\gamma \sim 30$) пучки наносекундной длительности.

Публикации и апробация работы

Основные результаты, вошедшие в диссертацию, изложены в 13 публикациях и зарегистрированы как 2 изобретения. Результаты работы докладывались на II-м Международном симпозиуме по коллективным методам ускорения в Дубне в 1976 г., на IX Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц в Дубне в 1985 году, на Совещании по проблемам коллективного метода ускорения в Дубне в 1982 году, на X Всесоюзном семинаре по линейным ускорителям заряженных частиц в Харькове в 1987 г.

Структура диссертации. Работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, включающего 62 наименования. Диссертация содержит 165 страниц машинописного текста, в том числе 56 страниц иллюстративного материала.

Содержание работы

Во введении охарактеризован современный этап развития новой области техники — генерации сильноточных электронных пучков и управление их движением. Сформулирован тезис наиболее простого увеличения мощности интенсивных пучков с применением ЛИУ. Рассмотрены проблемы сооружения этих машин. Показан современный подход к высокоэффективным модуляторам ЛИУ, обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы и приведены основные тезисы, выносимые на защиту.

В первой главе, в рамках новых (волновых) представлений, рассмотрены ограничения по темпу набора энергии сильноточных ЛИУ нс-диапазона. Показано, что темп набора и КПД главным образом зависят от отношения волнового сопротивления, запитывающего индуктор фидера, к величине динамического сопротивления отдельного индуктора.

Экспериментально установлено, что для нахождения динамического сопротивления крупногабаритных ферромагнитных сердечников индукторов ЛИУ применима методика инженерного расчета, известная в теории импульсного перемагничивания малогабаритных сердечников.

Предложен вариант индуктора (рис. I), в котором не содержится дорогостоящих крупногабаритных ферромагнитных сердечников. Работа индуктора похожа на работу "безжелезного" индуктора, однако искровой коммутатор заменен отрезками ЛНС. Эксперименты показали возможность получения темпа набора энергии при ускорении интенсивных и электронных пучков (~ 10 кА), соответствующих лучшим мировым образцам (~ 10 кВ/см).

В конце главы приведены результаты исследований по разработке индукторов, обладающих рекордным на сегодняшний день темпом набора энергии для ЛИУ нс-диапазона.

Впервые достигнута напряженность поля длительностью ~ 15 нс около 50 кВ/см при использовании промышленных образцов полупроводниковых структур и сикондовой керамики. Таким образом, применение в индукционной части ЛИУ твердотельных высокоудельноэнергоемких материалов (сикондовая керамика в сочетании с кремнем) приводит к уменьшению габаритов, увеличению темпа набора энергии (при традиционных преимуществах - большой срок службы, надежность, высокий КПД и мгновенная готовность к работе). Предельная электрическая прочность исследованных материалов такова, что она позволит приблизиться к темпу набора энергии ~ 300 кВ/см.

Во второй главе рассмотрен современный уровень развития модуляторов для ЛИУ нс-диапазона, с применением мощных тиратронов, работающих в режимах, близких к паспортному, и нелинейных схем сжатия мощности.

В § 1 и 2 рассмотрены вопросы применения ЛНС с распределенными параметрами в модуляторах для ЛИУ. Здесь приведены экспериментальные результаты исследований свойств таких линий передач в диапазоне мощностей 20+200 МВт. Особое внимание уделено изучению коммутационных свойств ЛНС, позволяющих осуществлять сжатие мощности. Экспериментально установлена предельная величина увеличения подведенной к индукционной части ЛИУ мощности в 1,3+2 раза для традиционной схемы модулятора с ЛНС.

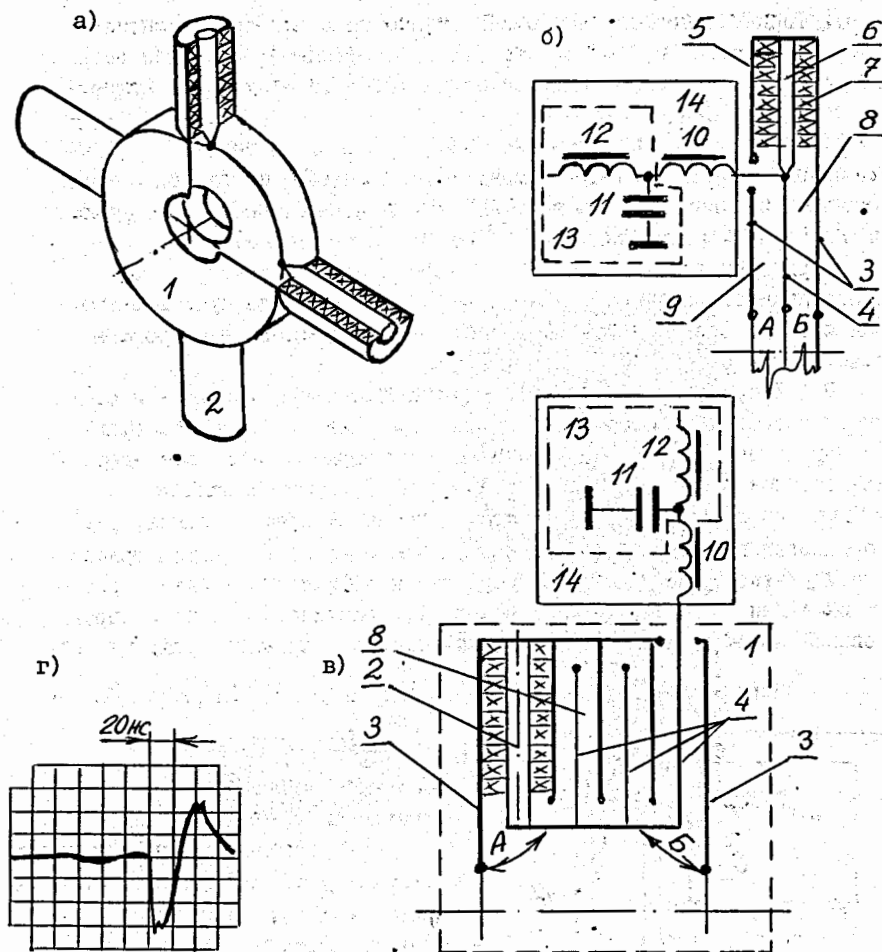


Рис. I. а) и в) варианты индукторов ЛИУ и схемы их запитки;
б) схема запитки варианта а);
г) импульс ускоряющего напряжения.

I + I4 - элементы схемы и индукторов.

В § 3 рассмотрен вопрос применения звеньев сжатия мощности для ЛИУ. Проведенные в новом диапазоне по мощности эксперименты показали, что коэффициент сжатия в микросекундном диапазоне составляет 6+8, если использовать индукторы ЛИУ-5/5000 в качестве сердечников переключающих дросселей. При одинаковом типоразмере сердечников коэффициент сжатия уменьшается от одного звена к дру-

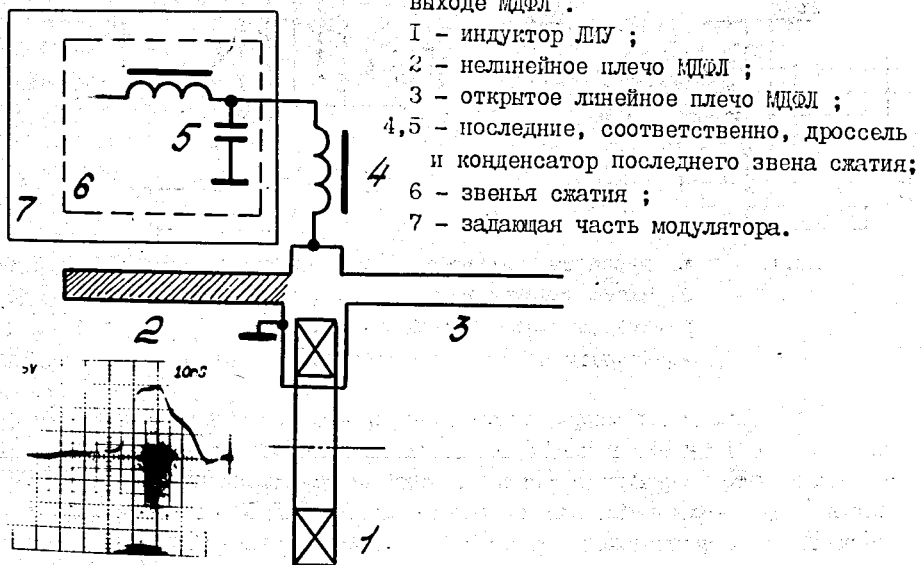
тому. Типичный коэффициент сжатия мощности в диапазоне длительностей 500 ± 100 нс составляет $3 \pm 1,5$. Коэффициент передачи энергии от звена к звену (кцд) составляет $0,9 \pm 0,8$ на уровнях мощности ~ 100 МВт.

В § 4 рассмотрена предложенная МДФЛ (рис.2). Проведено исследование работы задающей части модулятора на МДФЛ, нагрузкой которой является индукционная система ЛИУ. Экспериментально МДФЛ опробована на уровнях выходной мощности до 300 МВт (рис.2а).

В третьей главе рассмотрены мощные импульсные устройства наносекундного диапазона для систем ввода и вывода пучков, элементная база которых основана на использовании мощного тиратрона в сочетании с отрезками ЛНС.

В § I приведены результаты, полученные при разработке и создании устройств однооборотной системы инжекции электронного пучка в камеру адгезатора ПКУТИ. Созданная и экспериментально исследованная система состоит из двух независимых подсистем, включающих мощные импульсные источники питания нс-диапазона: 1) канал транспортировки пучка от ЛИУ в камеру адгезатора; 2) корректор траектории инжектируемого пучка. Достигнутый коэффициент захвата в системе инжекции $\sim 0,5$ получен за счет: 1) практически полного экранирования полей адгезатора на участке транспортировки пучка; 2) удо-

Рис.2. Упрощенная схема питания индуктора ЛИУ и импульс на выходе МДФЛ.



ветворительной импульсной компенсации ведущего поля адгезатора на участке дрейфа пучка; незначительного возмущения ведущего поля адгезатора как элементами, так и импульсными рассеянными полями системы инжекции; 4) достигнутой величиной эффективной напряженности корректирующего поля; 5) быстрой эвакуацией корректирующего поля с постынной времени ≤ 1 нс. Эксперименты и эксплуатация системы показали, что в камере адгезатора ПКУТИ устойчиво формируются электронные кольца с энергией вращательного движения $\sim 1,5$ МэВ и током ~ 200 А. (см. рис.3).

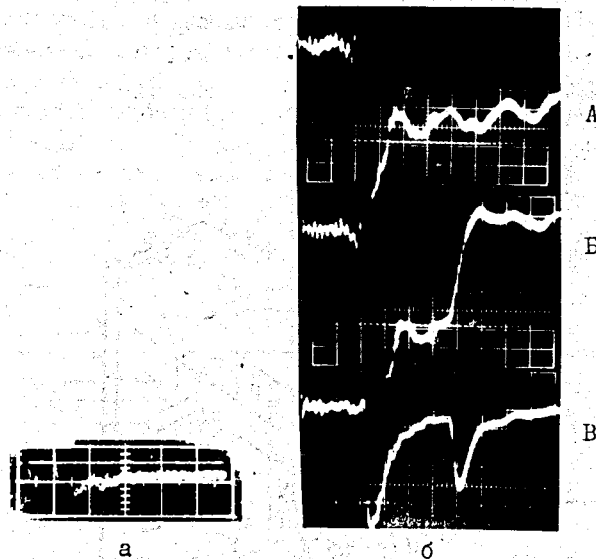


Рис.3. Осциллограммы, иллюстрирующие работу системы инжекции электронов в камеру адгезатора (образование электронных колец).

а. Осциллограмма тока в электронном кольце в течение первых $0,5$ мкс после инжекции. Длительность развертки 100 нс/дел. Чувствительность пояса Роговского 500 А/дел. В кадре наложено около 20 импульсов.

б. Осциллограммы: А - ток кольца в камере адгезатора, регистрируемый индукционным датчиком при выключенном устройстве сброса; Б - ток в кольце при разрушении его устройством сброса спустя 40 мкс после инжекции; В - сигнал тормозного γ - излучения в случае работы устройства сброса.

Разработанная система инжекции находилась в эксплуатации начиная с 1974 г.

В § 2 предложен способ формирования сильноточных (~ 1 кА), ультрарелятивистских ($\gamma \sim 30$) пучков нс-длительности и устройство для его осуществления. Устройство включает в себя инжектор, систему формирования кольца в адгезаторе, магнитную систему сжатия колец и электродинамическую систему вывода. Импульсный источник питания системы вывода выполнен на основе сочетания тиратрона с МДФЛ, нагрузкой которой является секционированный виток манипулятора. Кольцевая форма пучка в конце сжатия преобразуется в линейную за счет возбуждения в области под выводным каналом целого резонанса, причем возбуждение происходит ударно, за времена единиц наносекунд. Кольцевая форма пучка, трансформируясь в спиральную, попадает в магнитоэкранированный канал и преобразуется в линейную. Длительность выведенного пучка менее 1 нс, а радиус поперечного сечения $\sim 0,4$ см. Схема устройства приведена на рис.4.

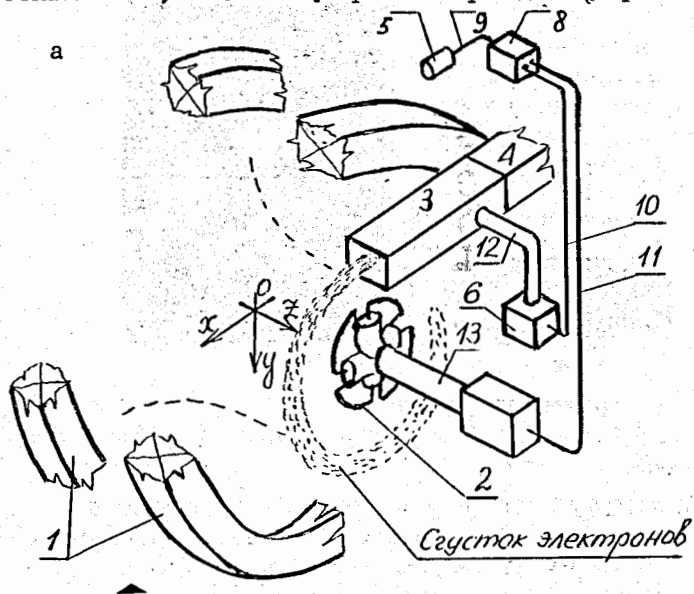
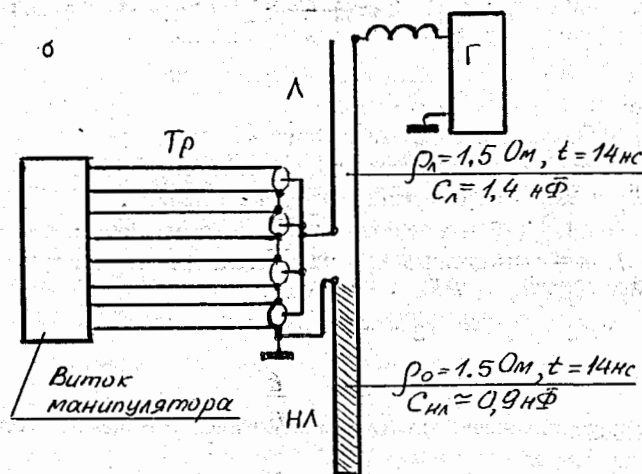


Рис.4. а. Схема устройства формирования сильноточных ультрарелятивистских пучков нс-диапазона.

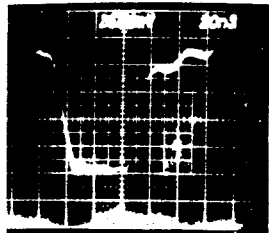
- 1 - катушки последней ступени сжатия ; 2 - виток манипулятора ; 3 - магнитоэкранированный канал ; 4 - мишень ; 5 - датчик ; 6 - генератор для питания канала ; 7 - генератор для питания манипулятора ; 8 - синхронизатор ; 9,10,11,12,13 - фидеры связи.

В § 3 рассмотрена новая система инжекции тяжелых ионов, полученных на выходе коллективного ускорителя, в синхротрон. Система включает в себя отклоняющее устройство и импульсный источник питания. Особенностью системы является: 1) нс-диапазон, воздействующей на ионы, силы; 2) многократная инжекция (пять ступок, следующих через каждые 20 мс). Рассмотренный вариант конструктивного выполнения отклоняющего устройства обеспечивает однородность поля $\pm 2\%$ в апертуре 12×8 см². Генератор для возбуждения отклоняющего устройства обеспечивает одновременное формирование двух импульсов противоположной полярности с длительностью плато ~ 40 нс. В генераторе использована схема формирования с применением отрезков ЛНС. Схема и осциллограмма импульса даны на рис.5.

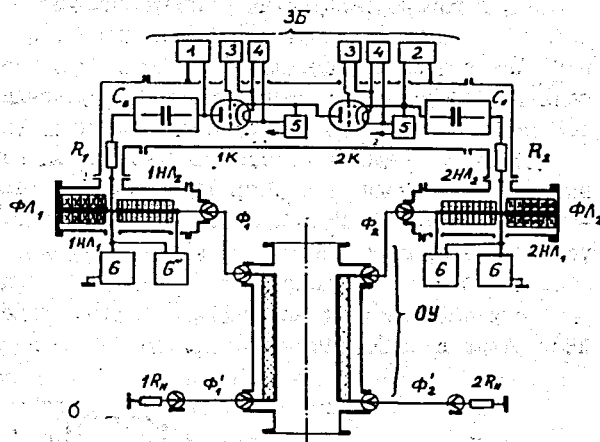


б. Схема (формирующая часть) импульсного генератора для возбуждения витка манипулятора.

- Л - линейный фидер длиной 70 см, заполнен глицерином;
 НЛ - нелинейный фидер длиной 70 см, частично заполнен ферритовыми кольцами К38х24х7 в экранах (используются семь линий, параллельно соединенных между собой);
 Tr - кабельный трансформатор из четырех фидеров с волновым сопротивлением $\rho = 12$ Ом (длина отрезков ~ 300 см);
 Г - задающая часть генератора выполнена с применением тиратрона ТГИИ-2500/50.



а



б

Рис.5.а. Схема системы инъекции тяжелых ионов,

б. Импульс на выходе ФЛ.

ОУ - отклоняющее устройство ;

ЗБ - задающий перепад мощности блок тиратронов ;

ФЛ₁ и ФЛ₂ - формирующие нелинейные линии ;

1,2,3,4,5 и 6 - вспомогательные системы устройства ;

1К, 2К - тиратроны , C₀ - накопительные емкости ;

R₁, R₂, 1R_н и 2R_н - резисторы ;

Ф₁ , Ф₂ , Ф₁' и Ф₂' - фидеры связи.

В заключении приведены следующие основные результаты, полученные в диссертации:

1. Проведенные эксперименты показали, что: а) применение в ускорительной технике сочетания мощного тиратрона с нелинейными ферромагнитными элементами, как с сосредоточенными, включая в звенья сжатия мощности, так и с распределенными параметрами позволяет получить импульсную мощность в наносекундном диапазоне на уровнях нескольких десятков ГВт; достигнут коэффициент передачи энергии из задающей части модулятора в предложенную модифицированную линию на уровне 0,6, что позволяет сформировать импульс длительностью ~30 нс на уровне мощности ~15 ГВт, с частотой повторения 50 Гц при помощи одного тиратрона.

2. За счет использования с модуляторах ЛИУ схем сжатия с нелинейными дросселями на базе крупногабаритных сердечников индукторов получено увеличение мощности в интервале 2+8 в диапазоне длительностей импульсов соответственно 100+1000 нс.

3. Экспериментально установлено, что для нахождения динамического сопротивления ферромагнитных сердечников индукторов ЛИУ пригодна методика инженерного расчета, известная в теории импульсного перемагничивания малогабаритных сердечников для устройств автоматики и вычислительной техники.

4. Предложен и экспериментально исследован вариант индуктора, содержащий нелинейные отрезки линий передач. Показана возможность создания индуктора с напряженностью электрического поля ~10 кВ/см при токах в нагрузке ~10 кА.

5. Экспериментально достигнута рекордная напряженность электрического поля (~50 кВ/см) в твердотельном индукторе, содержащем сикондовую керамику и кремниевый полупроводник.

6. С использованием мощного тиратрона и нелинейных линий передач в устройствах, относящихся: а) к электродинамической системе инъекции в камеру адгезатора достигнут коэффициент захвата на уровне 0,5; б) к электродинамической системе инъекции в синхротрон последовательности сгустков ионов, следующих с частотой 50 Гц, сформирован импульс доворачивающей силы в апертуре 12x8 см² с эффективным полем 370 Э, длительностью фронта плато и спада соответственно 15 нс, 40 нс и 10 нс.

7. Предложена система вывода электронов из адгезатора, осуществляющая получение сильноточных (~1 кА) ультрарелятивистских пучков (γ~30) наносекундного диапазона.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Г.В.Долбилов, А.К.Красных, В.Н.Разувакин. Использование звеньев сжатия и линейных схем формирования в модуляторе ЛИУ. Приборы и техника эксперимента. № 4, 1984, с.26.

2. Г.В.Долбилов, А.К.Красных, В.Н.Разувакин. Экспериментальное исследование варианта модуляторной части линейного индукционного ускорителя. Сообщение ОИЯИ Р9-83-193, Дубна, 1983.

3. А.К.Красных, Р.Халлер. Об оптимизации параметров коаксиальных линий с ферритовыми кольцами. Сообщение ОИЯИ, 9-11588, Дубна, 1978 г.

4. А.К.Красных, Р.Халлер. Об электрическом старении ферритов при нагрузке импульсным напряжением наносекундного диапазона. Сообщение ОИЯИ, 9-12448, Дубна, 1979.

5. А.К.Красных. К анализу схемных решений модуляторов линейных индукционных ускорителей наносекундного диапазона. В кн. Коллективные методы ускорения. Дубна, 1982, Д9-82-664, с.136.

6. С.Н.Доля, А.Ф.Кардо-Сисоев, А.К.Красных. Формирование наносекундных импульсов в низкоомных линиях с помощью твердотельных коммутаторов. В кн. Коллективные методы ускорения. ОИЯИ, Д9-82-664, Дубна, 1982, с.142.

7. В.И.Казача, А.К.Красных. Измерение динамических характеристик ферромагнитных сердечников индукторов ЛИУ. Сообщение ОИЯИ Р9-84-231, Дубна, 1984.

8. Р.Халлер, А.К.Красных. Расчет электрического поля корректора и инфлектора КУТИ. Сообщение ОИЯИ, 9-80-284, Дубна, 1980.

9. Г.В.Долбилов, А.К.Красных, В.Н.Разувакин, Р.Халлер. Исследование свойств нелинейных линий. Сообщение ОИЯИ 9-83-78, Дубна, 1983.

10. Г.В.Долбилов, А.К.Красных, В.П.Саранцев, А.С.Щеулин. Система инжекции электронов ускорителя тяжелых ионов. Труды II-го Симпозиума по коллективным методам ускорения. Дубна 1976, ОИЯИ, Д9-10500, Дубна, 1976, с.57.

11. В.П.Саранцев: В.С.Александров, Л.Н.Белнев, ... , А.К.Красных, ... , А.С.Щеулин. Первый этап наладки прототипа коллективного ускорителя тяжелых ионов. Часть I. Сообщение ОИЯИ Р9-10053, Дубна, 1976.

12. В.И.Аверьянов, О.В.Архипов, А.К.Красных, В.П.Рашевский. Вопросы создания системы инжекции в ТИС. Сообщение ОИЯИ 9-84-697, Дубна, 1984; в кн. IX Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц, т. I, с.436, 1985.

13. О.В.Архипов, А.К.Красных, Э.И.Смирнова. Высоковольтный импульсный генератор с модифицированной двойной формирующей линией. Сообщение ОИЯИ 9-87-172, Дубна, 1987.

14. А.К.Красных. Линейный индукционный ускоритель. Авторское свидетельство № 1263189, кл. H05H, 9/00, 1985 г., ОИ, № 14, 1987, с.272.

15. А.К.Красных, И.В.Кузнецов, Э.А.Перельштейн. Способ формирования сильноточных ультрарелятивистских пучков электронов субнаносекундного диапазона и устройство для его осуществления. Авторское свидетельство № 1266452, кл. H05H, 5/00, 1984 г., ОИ, № 14, 15.04.1987, с.272.

Рукопись поступила в издательский отдел
13 июня 1988 г.