

T-416

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 621.384.6

9-85-799

ТИМОХИН
Вячеслав Афанасьевич

ФОРМИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ
В МАГНИТНОЙ СИСТЕМЕ ПРОТОТИПА
КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРИТЕЛЯ ОИЯИ

Специальность - 01.04-13 - электрофизика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Дубна 1985

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель: кандидат технических наук
Л.С. БАРАБАШ

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Д.П. ВАХРУШИН
кандидат технических наук
А.А. СМИРНОВ

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Институт физики
высоких энергий (Протвино)

Защита состоится " ____ " _____ 198 года
в ____ часов на заседании Специализированного совета
Д-047.01.02 при Лаборатории высоких энергий ОИЯИ, г.Дубна,
Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " ____ " _____ 198 года

Ученый секретарь
Специализированного совета
кандидат физико-математических наук *Ушаков* И.Ф. ЛИХАЧЕВ

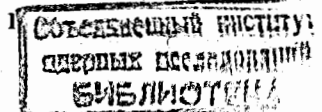
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Пучки ускоренных тяжелых ионов нужны для изучения широкого круга физических проблем, начиная с вопросов физики атома, классических проблем ядерной физики низких и промежуточных энергий, где ядра представляются как совокупность нуклонов, и кончая вопросами физики взаимодействия высокоэнергетических тяжелых ядер, где выделяемые энергии и передаваемые импульсы столь велики, что механизм взаимодействия и свойства явлений будут определяться не нуклонами, а кварками и глюонами.

Для ускорения тяжелых ионов вначале использовались ускорители, параметры которых перестали удовлетворять требованиям физики элементарных частиц. В настоящее время созданы проекты (часть их уже реализована) специальных ускорительных комплексов тяжелых ионов.

Возможность ускорения ионов электронными кольцами изучалась в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ на прототипе коллективного ускорителя тяжелых ионов (ПКУТИ). В ПКУТИ ОИЯИ электронно-ионные кольцевые ступки получают, ускоряют и фокусируют в импульсных магнитных полях индукцией от 0,3 Т до 2,5 Т. При этом магниты прототипа возбуждаются импульсными токами, которые формируются схемами мощной высоковольтной системы питания. Эти схемы и элементная база для их построения должны удовлетворять ряду специфических требований, связанных в основном с особенностями магнитной системы ПКУТИ. Важнейшими из них являются: обеспечение малого уровня искажений импульсного магнитного поля в условиях его экранирования металлическими узлами компрессора прототипа; коммутация импульсных токов амплитудой от 3 кА до 10 кА (миллисекундной длительности) при цикличности работы прототипа 5 Гц в условиях высоких напряжений (до 35 кВ); обеспечение сложного закона изменения во времени формы импульсов тока возбуждения некоторых магнитов; обеспечение компенсации искажений формы импульсных токов в условиях сильной индуктивной связи между магнитами соседних ступеней многоступенчатого компрессора. От степени учета и реализации этих основных требований зависят характеристики ионных пучков.

Цель работы. Целью работы являлось исследование особенностей формирования импульсных токов в магнитной системе ПКУТИ; выявление



особенностей работы элементной базы, необходимой для построения схем формирования импульсных токов, разработка и техническая реализация элементной базы; исследование искажений импульсного магнитного поля на малых радиусах сжатия электронно-ионных колец и техническая реализация способов коррекций этих искажений.

Научная новизна. В диссертационной работе приведены результаты анализа и экспериментальных исследований новых схем формирования импульсных токов в магнитной системе прототипа коллективного ускорителя, применение которых позволяет ограничивать скорость нарастания импульсных токов в электромагнитах в начальные моменты времени; компенсировать искажения формы импульсных токов в разрядных контурах, связанных взаимной индуктивностью; улучшать условия для синхронной работы на индуктивную нагрузку параллельно включенных тиристорных коммутаторов.

Приведено описание образцов новой техники - тиристорных и диодных коммутаторов на базе серийных вентилях, сконструированных в стандартных стойках.

В работе изложены также впервые экспериментально полученные результаты измерения искажений импульсного магнитного поля на участке вывода электронного кольца из компрессора; предложены и исследованы способы и устройства для компенсации этих искажений; исследовано влияние различных устройств фокусировки электронных колец, даны рекомендации по применению этих устройств на прототипе коллективного ускорителя.

Практическая ценность. Предложенные в работе схемы формирования импульсных токов, совместно с разработанной и реализованной элементной базой для их построения, использованы при создании прототипа коллективного ускорителя ОИЯИ. Результаты измерений искажений импульсного магнитного поля использованы в экспериментах по изучению динамики электронного кольца на конечных радиусах его сжатия и вывода из адгезатора.

Схемы формирования импульсных токов, при помощи которых достигается ограничение скорости нарастания тока в электромагнитах в начальные моменты времени, компенсируются искажения формы токов в контурах при наличии индуктивной связи между ними и улучшаются условия для синхротронной работы параллельно включенных тиристорных коммутаторов, могут быть использованы в ускорительной технике и для возбуждения электромагнитов различных электрофизических установок.

Апробация работы. Работы, положенные в основу диссертации, докладывались на научных семинарах Отдела новых методов ускорения и Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Публикации. Основные результаты, вошедшие в диссертацию, опубликованы в виде сообщений и препринтов ОИЯИ.

Объем работы. Диссертация изложена на 137 страницах машинописного текста и иллюстрируется 69 рисунками и тремя таблицами. Работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованной литературы из 82 наименований.

К защите представлены следующие тезисы.

1. В схемах питания электромагнитов прототипа коллективного ускорителя, формирующих импульсные токи с заданными характеристиками:

- амплитудные значения токов (кА) 3+6,
- длительность импульсных токов (мс) 1,2+2,8,
- диапазон изменения напряжения на накопителях (кВ) 3,5+35,
- частота следования импульсных токов (Гц) 0,1+5;

для коммутации энергии используются составные тиристорные (диодные) коммутаторы на базе серийных вентилях типа Т-500 (В-500) с применением для них принудительного двустороннего водяного охлаждения. Основной компоновочной единицей коммутаторов является модуль, состоящий из десяти последовательно включенных вентилях с элементами обеспечения необходимого прижимного усилия, управления, контроля и защиты; узлами подключения и установочными элементами.

2. Ограничение скачков значений показателя спада магнитного поля $\mathcal{R}(\mathcal{R}, t)$ в моменты включения схем питания импульсных магнитов прототипа ускорителя достигается ограничением скорости нарастания токов в обмотках магнитов в начальные моменты времени и осуществляется двумя путями:

- включением последовательно с обмотками магнитов шунтируемых индуктивных дросселей (при условии $L_{др} \gg L_m$, где $L_{др}$ - индуктивность дросселя, L_m - индуктивность магнита);
- включением в схемы питания импульсных магнитов шунтируемых Т - звеньев. В этом случае реализуется режим $dI_m/dt \approx 0$ при $t = 0$ (где I_m - ток магнита).

3. Компенсация искажений формы токов в индуктивно связанных разрядных контурах схем питания I и II ступеней сжатия осуществляется при помощи новой схемы компенсации. Выбором параметров дросселя связи можно получать практически неискаженные формы токов в магнитах, а также осуществлять коррекцию показателя спада магнитного поля, формируемого первой ступенью сжатия.

4. Компенсация искажений медианной плоскости магнитного поля компрессора на радиусах (25+35) см осуществляется пассивным корректирующим соленоидом, установленным симметрично выводному соленоиду.

Допустимый уровень искажений достигается при выбранных значениях параметров корректирующего соленоида: индуктивности ≈ 20 мкГ, активном сопротивлении его обмотки $\approx 10^{-2}$ Ом, геометрических размерах, соответствующих выводному соленоиду.

5. Устройства фокусировки электронного кольца с размерами $\chi < \chi_{э.к.}$, размещенные в импульсном магнитном поле ступеней сжатия и соленоида предварительного ускорения несимметрично медианной плоскости компрессора, незначительно искажают результирующее магнитное поле; допустимо применение этих устройств на прототипе ускорителя (χ - радиус фокусирующего устройства, $\chi_{э.к.}$ - радиус электронного кольца).

6. Элементная база блоков питания импульсных магнитов, наряду с использованием новых схем, разработок и экспериментальных результатов, позволяет формировать импульсное магнитное поле прототипа коллективного ускорителя с заданными проектными характеристиками - индукцией, показателем спада, частотой следования магнитных циклов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведен краткий обзор схем питания (и элементной базы для их построения) импульсных магнитов ускорителей и некоторых электрофизических установок ряда научно-исследовательских центров; приведены характеристики формируемых импульсных токов: формы, длительности, амплитудных значений. Качественно рассмотрены схемы импульсного питания магнитов динамических компрессоров электронных колец (адгезаторов) и применяемые в этих схемах накопители энергии и коммутаторы; сформулированы основные проблемы, исследуемые в диссертации.

В первой главе приведено описание магнитной системы прототипа коллективного ускорителя ОИЯИ, функциональной и принципиальных схем формирования импульсных токов в этой системе.

Магнитная система прототипа ускорителя, при помощи которой осуществляется адиабатическое сжатие и ускорение электронного кольца, состоит из четырех импульсных магнитов ступеней сжатия, пары градиентных соленоидов предварительного ускорения, фокусирующего соленоида ускоряющей секции и импульсного магнита разделения электронной и ионной компонент ускоренного сгустка.

Импульсные токи для возбуждения магнитов и соленоидов прототипа формируются при помощи восьми блоков питания БПИ+БПУШ с источниками электрической энергии ИПЧ+ИПУП. Каждый блок питания содержит емкостной накопитель, коммутаторы, индуктивную нагрузку (обмотки магнитов, дросселей и соленоидов), фидеры связи, электронную аппаратуру управления и контроля параметров блока (рис.1).

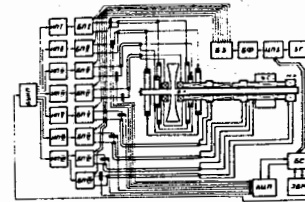


Рис.1. Функциональная схема системы формирования импульсных токов в магнитах прототипа коллективного ускорителя.

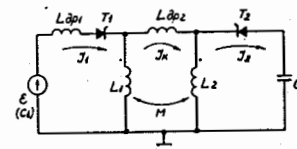


Рис.2. Схема питания магнитов I и II ступеней сжатия с дросселем связи $L_{др2}$ для компенсации наведенного тока.

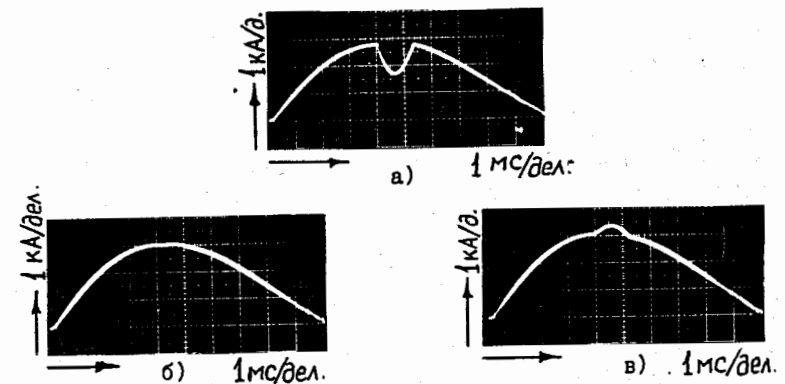


Рис.3. Осциллограммы тока в магните первой ступени сжатия: а - при неполной компенсации наведенного тока ($L_{др2} > 6 \cdot 10^{-3}$ Гн), б - при полной компенсации наводки ($L_{др2} = 6 \cdot 10^{-3}$ Гн), в - при небольшой перекомпенсации наводки ($L_{др2} < 6 \cdot 10^{-3}$ Гн).

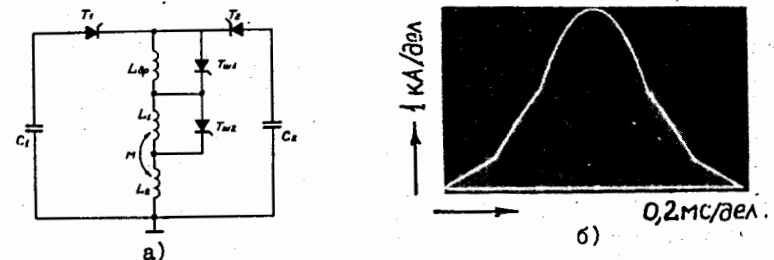


Рис.4. Схема питания магнита IV ступени сжатия с шунтируемыми индуктивными элементами (а) и осциллограмма тока в нешунтируемой обмотке магнита этой ступени (б).

В состав электронной аппаратуры входят задающий генератор, цифровые программируемые задержки, блоки формирователей, блоки запуска тиристорных коммутаторов. Вся информация о состоянии оборудования системы питания и формируемых импульсных токах поступает в ЭВМ для обработки и анализа.

Параметры схем блоков импульсного питания и характеристики токов, формируемых этими схемами в соответствующих магнитах прототипа, приведены в таблице I.

В главе рассмотрены особенности схем импульсного питания магнитной системы прототипа коллективного ускорителя ОИЯИ. Существенной особенностью этой системы является наличие индуктивной связи между обмотками магнитов ступеней сжатия. Направление ЭДС взаимной индукции таково, что происходит вычитание тока наведенного из тока возбуждения в каждом электромагните; при этом искажается магнитное поле компрессора.

Особенно велико искажение тока возбуждения магнита первой ступени при протекании импульсного тока по обмоткам магнита второй ступени: "провал" на кривой тока достигает $\approx 50\%$ от его амплитудного значения.

Компенсировать искажения токов в контурах, связанных взаимной индуктивностью, позволяет способ, описанный в работе [1]. На рис.2 приведена схема питания магнитов первой ($L_1, C_1, L_{др.1}, T_1$) и второй (L_2, C_2, T_2) ступеней компрессора с элементом компенсации наводки - индуктивным дросселем связи $L_{др.2}$.

В диссертационной работе проведен анализ новой схемы, получены аналитические выражения для токов возбуждения магнитов первой и второй ступеней сжатия, получено выражение для нахождения величины индуктивности дросселя связи $L_{др.2}$.

При заданных фиксированных значениях параметров схемы рис.2 произведено осциллографирование тока возбуждения магнита первой ступени при различных значениях величины дросселя связи. Полная компенсация наводки (уровень искажения менее 1%) достигается при $L_{др.2} = 6$ мГн (рис.3б), что хорошо согласуется с расчетом.

Если величина $L_{др.2} > 6$ мГн, то наводка компенсируется не полностью (рис.3а), и на кривой тока остается небольшой "провал".

При $L_{др.2} < 6$ мГн реализуется режим перекомпенсации наводки, и на кривой тока возбуждения магнита первой ступени появляется небольшая добавка по току от схемы питания магнита второй ступени. Изменением величины тока компенсации (т.е. при различных значениях $L_{др.2} < 6$ мГн) можно корректировать показатель спада магнитного поля, формируемого первой ступенью компрессора (рис.3в).

Таблица I. Параметры схем питания и характеристики импульсных токов магнитной системы прототипа коллективного ускорителя

Параметры схем и характеристики импульсных токов	Ступени сжатия				Градиентные соленоиды				Группы обмоток фокусирующего соленоида				
	I	II	III	IV	CI	СИ	III	IV	I	2	III	IV	У
Емкость конденсаторной батареи (мкФ)	3600	90	60	256	128	90			200	250	2250	2250	300
Индуктивность нагрузки (мГн)	0,23	1,8	3,3	2,1	2,1	1,2			6,2	3,2	0,8	0,8	3,4
Величина зарядного напряжения батареи (кВ)	3,2	27,5	20	27,5	18,5	20			4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Амплитудные значения токов в нагрузках (кА)	3,0	6,0	4,5	9,8	6,0	6,0			0,8	1,2	7,5	7,5	1,3
Длительность токовых импульсов (по основанию) (нс)	12,0	1,2	1,6	2,8	1,2	1,1			3,5	2,8	4,2	4,2	3,2

Основное достоинство рассмотренной схемы состоит в том, что она позволяет получать практически неискаженную форму тока возбуждения магнита первой ступени компрессора.

В главе приведены оценки эффективности схемы, использующей принцип компенсации наведенного тока по сравнению с ранее применявшейся схемой подавления наводки, когда последовательно с электромагнитом включался индуктивный дроссель значительной величины ($L_{др} \gg L_m$, где $L_{др}$, L_m – индуктивности дросселя и электромагнита). Показано, что применение новой схемы позволяет снизить напряжение на накопителе в 3,5 раза по сравнению со схемой, в которой использовалось подавление наводки. При этом снижаются требования на изоляцию обмоток магнита первой ступени компрессора и ряда элементов его схемы питания.

Другой важной особенностью магнитной системы прототипа коллективного ускорителя, которую необходимо учитывать в процессе формирования импульсных токов, является искажение показателя спада магнитного поля компрессора при включении схем питания импульсных магнитов ступеней сжатия. Экспериментально установлено, что скачки значений показателя спада $\mathcal{L}(R, t)$ максимальны в моменты коммутации в схемах питания и уменьшаются до допустимых значений по прошествии (300+400) мкс от моментов коммутации, т.е. на фронтах импульсных токов.

Предложены, исследованы и внедрены схемы импульсного питания, позволяющие ограничивать скорость нарастания импульсных токов в магнитах компрессора, в результате чего скачки показателя спада формируемого магнитного поля уменьшаются до допустимых значений.

В настоящее время в эксплуатации находятся две схемы: с шунтируемым индуктивным дросселем, включаемым последовательно с обмотками импульсного магнита четвертой ступени компрессора ^{/2/}, и схема с шунтируемым Т-звеном в цепи питания магнита второй ступени ^{/1/}. На рис.4 а,б представлена схема питания магнита четвертой ступени и осциллограмма тока этого магнита в режиме вывода электронного кольца из компрессора ^{/2/}, при котором половина обмотки электромагнита шунтируется коммутатором $T_{ш2}$ (коммутатор $T_{ш1}$ шунтирует дроссель $L_{др}$). Величина индуктивности $L_{др}$ выбирается из условия $L_{др} \gg L_m$, где L_m – индуктивность магнита. Время включения коммутатора $T_{ш2}$ подбирается экспериментально из условия наименьших потерь (или полного их отсутствия) частиц из электронного кольца при включении питания магнита IV ступени сжатия. Обычно оно составляет (300+400) мкс от момента включения коммутаторов T_1 и T_2 (рис.4а).

На рис.5 а,б представлена схема питания магнита второй ступени с шунтируемым Т-звеном и осциллограмма тока возбуждения этого электромагнита ^{/1/}. Шунтирующий коммутатор $T_{ш}$ включается также по прошествии (300+400) мкс от момента включения коммутатора T_1 . При помощи схемы

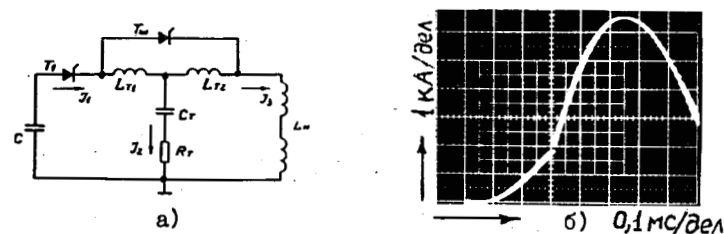


Рис.5. Схема формирования импульсного тока с шунтируемым Т-звеном (а) и осциллограмма тока возбуждения, формируемого при помощи этой схемы (б).

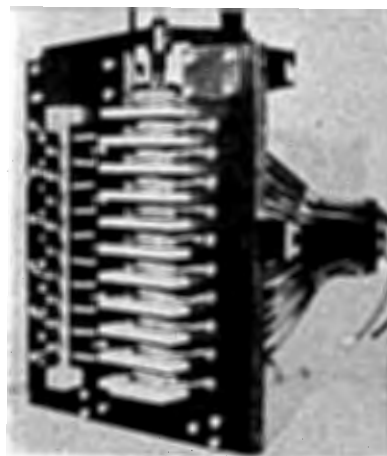


Рис.6. Модуль тиристорного коммутатора.

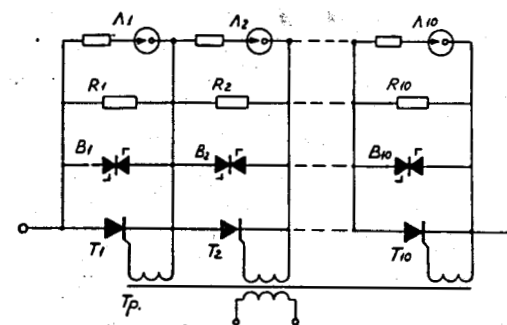


Рис.7. Принципиальная схема модуля тиристорного коммутатора.

рис.5а удается получить плавное нарастание тока в электромагните: скорость нарастания тока в начальный момент времени имеет значение, близкое к нулевому. Параметры элементов Т – звена первоначально рассчитывались, а затем уточнялись в процессе настройки режима сжатия электронного кольца в компрессоре.

Во второй главе рассмотрены вопросы разработки, исследования и технической реализации элементной базы для построения систем формирования импульсных токов в магнитах прототипа ускорителя.

Для коммутации электромагнитов прототипа коллективного ускорителя с емкостными накопителями энергии, а также для формирования импульсных токов со сложным законом изменения во времени, в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ разработаны, исследованы и внедрены составные тиристорные и диодные коммутаторы ^{13/}. Основной компоновочной единицей коммутатора является модуль, который представляет собой конструктивную группу, состоящую из десяти последовательно включенных вентилях (тиристоров или диодов таблеточного исполнения) с системами обеспечения прижимного усилия, охлаждения, запуска, контроля, защиты, узлами подключения и установочными элементами. Фотография модуля представлена на рис.6.

На рис.7 приведена принципиальная схема одного модуля тиристорного коммутатора, где $T1 + T10$ – тиристоры; $V1 + V10$ – симметричные ограничители напряжения; $R1 + R10$ – выравнивающие сопротивления; $Л1 + Л10$ – элементы световой сигнализации состояния вентилях; Tr – импульсный трансформатор запуска тиристоров. Блоки коммутаторов комплектуются тиристорами типа Т-500 или диодами В-500 I2+20 класса по напряжению.

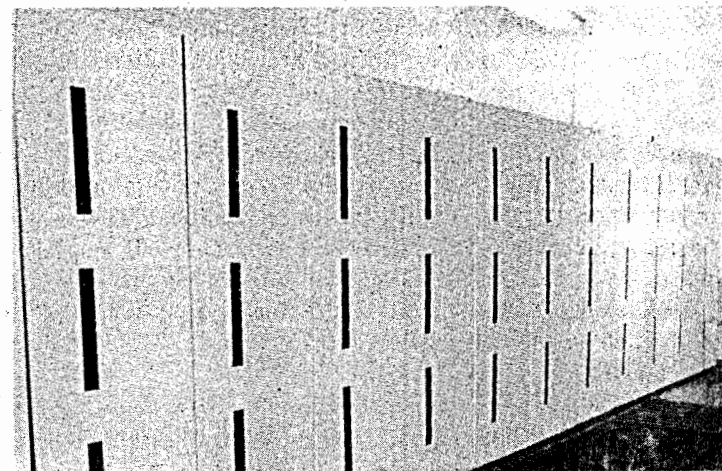
Три модуля объединяются в блок коммутатора и монтируются в корпусе стандартной стойки "Вишня". Количество блоков (стоек "Вишня") в одном составном коммутаторе определяется конкретными условиями работы в системе импульсного питания электромагнитов (напряжением, током, длительностью импульсного тока, частотой срабатывания).

Пример компоновки блоков коммутаторов показан на рис.8 а,б.

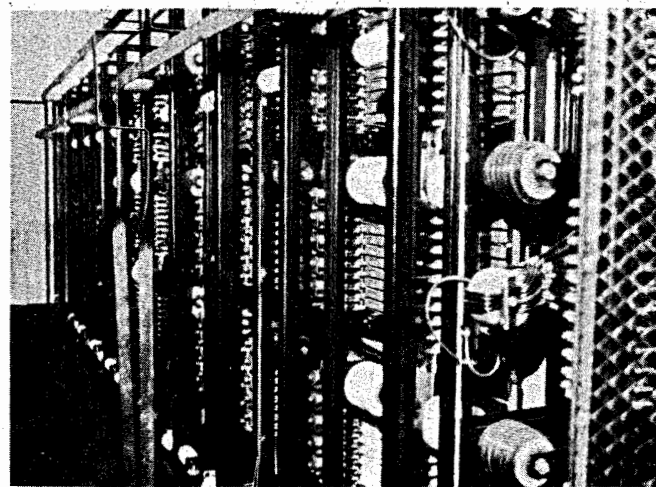
Основными достоинствами данной конструкции коммутатора являются:

1. Симметрия коммутатора относительно анода и катода, что важно в условиях высокого напряжения.
2. Большая мощность коммутатора, достигаемая эффективным двусторонним охлаждением вентилях как со стороны анода, так и катода.
3. Компактность и простота сборки.
4. Технологичность в производстве.

В главе приведены принципиальная схема блока запуска тиристорных коммутаторов и экспериментально полученные нагрузочные характеристики этого блока: зависимость выходного напряжения запускающего импульса



а) лицевая сторона группы коммутаторов;



б) тыльная сторона этой же группы коммутаторов.

Рис.8. Компоновка коммутаторов системы импульсного питания.

$U = f_1(N)$, зависимость амплитуды тока запускающего импульса
 $J_2 = f_2(N)$ и зависимость крутизны переднего фронта импульса запуска
 $dJ/dt = f_3(N)$ от числа тиристоров в коммутаторе. При управлении одним блоком запуска коммутатора, содержащего не более 60 тиристоров (шесть модулей в двух стойках), время открывания коммутатора не превышает 1,5 мкс. Рекомендовано ограничить $N \leq 60$ для устойчивого управления процессом открывания одним блоком запуска ^{13/}.

Питание электромагнита четвертой ступени компрессора и соленоидов предварительного ускорения осуществляется по параллельным ветвям, когда секционированная конденсаторная батарея коммутируется на общую индуктивную нагрузку (схема питания магнита IV ступени), либо вся батарея коммутируется на секционированную индуктивную нагрузку (питание соленоидов). В связи с этим актуальной становится задача обеспечения синхронного срабатывания тиристорных коммутаторов, включенных в параллельные ветви схем питания.

Эффективным является способ синхронизации параллельно включенных коммутаторов, основанный на шунтировании их вспомогательными конденсаторами и использовании дросселей насыщения с малым характерным временем, включаемых последовательно с коммутаторами ^{14/}.

В диссертационной работе проведен анализ предложенной схемы синхронизации включения коммутаторов, построены графические зависимости изменения напряжения на закрытом коммутаторе в зависимости от величины емкости шунтирующих конденсаторов при включении дросселя насыщения с временем входа в насыщение $t_{нас.} \approx 1$ мкс и без него.

Сделаны рекомендации по выбору величины емкостей шунтирующих конденсаторов для обеспечения синхронного открывания тиристорных коммутаторов в параллельных ветвях питания магнита IV ступени компрессора.

Приведены экспериментальные результаты измерения разброса времени открывания параллельно включенных коммутаторов при величине емкости шунтирующих конденсаторов $C = 0,01$ мкФ и характерном времени дросселей насыщения $t_{нас.} \approx 1$ мкс: разброс не превосходил 1,5 мкс в диапазоне изменения напряжения на секциях конденсаторной батареи от 1,5 кВ до 30 кВ.

В третьей главе рассмотрены особенности работы магнитной системы компрессора прототипа коллективного ускорителя с металлической вакуумной камерой и основные результаты работ по формированию и измерению импульсного магнитного поля прототипа на участках сжатия и вывода электронного кольца.

На участке сжатия измерения проводились в двух режимах: при фиксированных значениях радиуса для различных значений азимута и при фиксированных значениях азимута на различных радиусах.

Значения показателя спада $n(R, t)$ приводятся для различных значений начальной энергии инжектируемого в компрессор электронного пучка.

На основании результатов магнитных измерений сделано заключение о пригодности системы формирования импульсных токов в магнитах компрессора на участке сжатия для проведения экспериментов по изучению коллективного метода ускорения.

При выводе электронного кольца за пределы действия магнитного поля пробочной конфигурации компрессора исчезает продольная (в направлении движения) фокусировка кольца. Металлические экраны – цилиндры с разрезами и без них, устанавливаемые вдоль продольного движения кольца, способствуют его фокусировке в этом направлении. Такие приспособления сами вносят искажения в импульсное магнитное поле компрессора, поскольку они располагаются вблизи импульсного магнита IV ступени и градиентного соленоида.

На прототипе коллективного ускорителя исследовалось влияние элементов фокусировки на формируемое импульсное магнитное поле, в том числе таких, как ^{15/}:

1) труб из нержавеющей стали марки Х18Н9Т диаметром 7,2 см с толщиной стенки 0,1 см без разрезов (сплошной) и комбинированной, с шестью продольными разрезами от $Z = 25$ см до $Z = 35$ см;

2) вставка типа "Беличье колесо" из 35 медных струн (диаметр струны 0,1 см) и из 6 медных полос (толщина полосы 0,1 см, ширина 3,0 см) с наружным диаметром 7,2 см;

3) медной трубы с наружным диаметром 3,2 см и толщиной стенки 0,2 см.

На рис.9 показано расположение фокусирующего устройства в магнитной системе ПКУТИ, где оно обозначено как "Центральная труба".

Экспериментально установлено, что наиболее заметные искажения амплитуды и фазы импульсного магнитного поля вносит неразрезанная труба из нержавеющей стали. На рис.10 представлена зависимость продольной составляющей магнитного поля B_z от времени IV ступени сжатия и соленоида. Кривые с индексом А получены при значениях $Z = 0$ и $Z = 60$ см; с индексом Б – при $Z = 0$ и $Z = 60$ см; А1, Б1 – поле внутри сплошной трубы из нержавеющей стали, А2, Б2 – без трубы. Однако величины этих искажений ($\approx 1\%$), если учесть их вклад в суммарное магнитное поле, не могут оказать существенного влияния на параметры электронного кольца.

Результаты измерений искажений импульсного магнитного поля, вносимых отрезком медной трубы, представлены на рис.11, где приведено распределение продольной составляющей магнитного поля по длине выводного участка на радиусе измерений $Z = 4,5$ см для трех моментов вре-

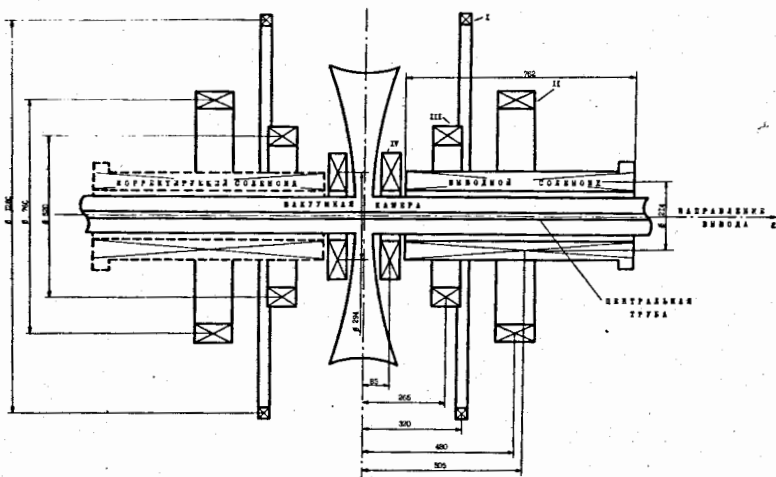


Рис.9. Положение корректирующего соленоида и фокусирующих устройств в магнитной системе ПСУТИ.

Рис.10. Зависимость $B_z(t)$ IV ступени в точке $z=0, Z=0$ (кривые А) и соленоида в точке $z=0, Z=60$ см (кривые В); 1 - поле внутри сплошной трубы из нержавеющей стали, 2 - без трубы.

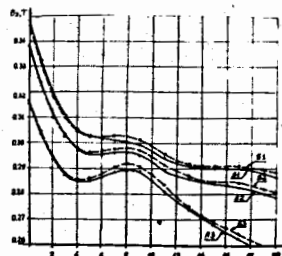
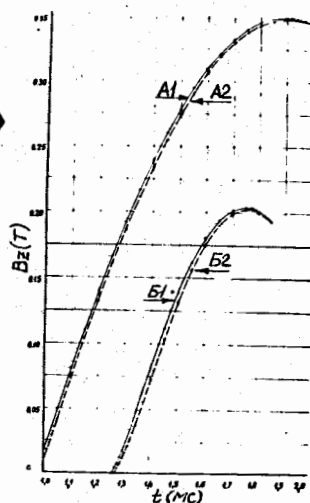


Рис.11. Распределение $B_z(z)$ на выводном участке на $z=4,5$ см при наличии фокусирующей медной трубы диаметром 3,2 см и толщиной стенки 0,2 см (штриховые кривые) и без трубы (сплошные кривые) для трех моментов времени t_1, t_2, t_3 .

мени измерения: $t_1 = t_{\max}$, $t_2 = t_{\max} - 100$ мкс и $t_3 = t_{\max} - 200$ мкс (t_{\max} - время, соответствующее максимуму тока в магните IV ступени компрессора). Штриховые кривые - поле при наличии медной трубы диаметром 3,2 см и толщиной стенки 0,2 см, сплошные кривые - поле без трубы.

Измерение распределения магнитного поля вдоль всего тракта вывода и предварительного ускорения показало, что применение комбинированной трубы нежелательно из-за уменьшения градиентов магнитного поля почти в два раза, по сравнению с расчетными.

Влияние фокусирующих элементов типа "Бадичье колесо", отрезков труб из нержавеющей стали и меди с выбранными размерами на импульсное магнитное поле в конце участка сжатия невелико. Рекомендовано их применение на прототипе коллективного ускорителя ^{15/}.

В главе рассмотрены вопросы компенсации искажения медианной плоскости магнитного поля компрессора многовитковым соленоидом предварительного ускорения и азимутальных искажений на малых радиусах измерения.

Искажение медианной плоскости магнитного поля компрессора (ее сдвиг) происходит за счет вихревых токов, индуцированных в витках первого соленоида предварительного ускорения импульсным магнитным полем ступеней сжатия. Использование для намотки соленоида многожильного кабеля, проводимость которого снижена для вихревых токов по сравнению со сплошным проводником за счет переходных сопротивлений между жилами, оказалось недостаточно эффективным средством.

Измерения искажений, вносимых соленоидом, показали, что аксиальное смещение ямы магнитного поля компрессора в диапазоне радиусов $r = (25 \div 35)$ см достигало ≈ 1 см.

Для компенсации искажений медианной плоскости магнитного поля использовался двухслойный корректирующий соленоид со встречным направлением намотки во внутреннем и внешнем слоях (рис.9). Его геометрические размеры соответствовали первому соленоиду предварительного ускорения. Количество и сечение витков были выбраны таким образом, чтобы постоянная времени τ_k корректирующего соленоида превышала характерное время переходных процессов $\approx 0,5$ мс. Это условие реализовано при 40 витках кабеля сечением 50 мм^2 , при этом индуктивность и сопротивление обмотки составляли соответственно 20 мкГ и 10^{-2} Ом ($\tau_k = 2$ мс). Подстройка амплитуды корректирующего поля и его распределение осуществлялись изменениями величины шунтирующего слоя обмотки сопротивления $R_{ш}$ и положения корректирующего соленоида.

Для экспериментов по изучению динамики электронно-ионных колец были рекомендованы следующие значения этих параметров: $R_{ш} \lesssim 1 \text{ Ом}$, положение центра корректирующего соленоида $Z_k = -47$ см.

Результаты серии экспериментов на прототипе ускорителя показали правильность выбора перечисленных выше параметров.

В приложении содержится акт об использовании результатов диссертационной работы.

Основные результаты работы

1. Разработана, исследована и внедрена элементная база блоков питания импульсных магнитов прототипа коллективного ускорителя ОИЯИ: тиристорные (диодные) коммутаторы в стандартных стойках; батареи накопительных конденсаторов на напряжение до 35 кВ с запасаемой энергией ≈ 40 кДж каждая; блоки управления тиристорными коммутаторами, вспомогательное оборудование.

Основные параметры коммутатора:

- максимальное напряжение (кВ) 35,
- амплитудное значение импульсного тока (кА) 6,
- длительность импульса тока (мс) 1,2+2,8,
- частота срабатывания (Гц) 0,1+5.

Время открывания тиристорных коммутаторов, содержащих до 60 вентилей, не превышает 1,5 мкс при управлении одним блоком запуска; разброс срабатывания коммутаторов во времени не превышает 1,5 мкс.

2. Разработаны, исследованы и внедрены на прототипе коллективного ускорителя схемы импульсного питания магнитов для формирования токов со сложным законом изменения во времени:

- обеспечивающие ограничение скорости нарастания токов возбуждения электромагнитов в начальные моменты времени;

- позволяющие шунтировать в заданной последовательности части обмоток импульсных магнитов и индуктивные дроссели, включаемые последовательно с электромагнитами.

3. Предложена, исследована и внедрена схема синхронизации параллельно включенных тиристорных коммутаторов, работающих на индуктивную нагрузку. Применение дросселей насыщения с малым характерным временем совместно с шунтирующими коммутаторы емкостями уменьшает временной разброс открывания коммутаторов до величины, не превышающей 1,5 мкс. При этом улучшаются стабильность амплитуды и формы импульсного тока в обмотках электромагнита.

4. Предложена, исследована и внедрена схема компенсации наведенного тока в обмотках магнита первой ступени компрессора. Схема компенсации позволяет получать практически неискаженную форму в обмотках магнита первой ступени: уровень искажений импульсного тока менее 1%.

При помощи этой схемы реализуется возможность коррекции показателя спада магнитного поля, формируемого первой ступенью; коррекция осуществляется изменением амплитуды компенсирующего тока от схемы питания импульсного магнита второй ступени компрессора.

5. Экспериментально исследованы искажения импульсного магнитного поля прототипа ускорителя:

а) различными устройствами фокусировки электронного кольца на участке его вывода из адгезатора. Установлено, что устройства фокусировки незначительно искажают результирующее магнитное поле: отклонения амплитуды и фазы не превышают $\pm 1\%$; рекомендовано применение этих устройств на прототипе ускорителя;

б) обмоткой выводного соленоида в диапазоне радиусов (25+35) см. Компенсация этих искажений осуществляется пассивным корректирующим соленоидом. Выбраны параметры и осуществлена техническая реализация этого соленоида (геометрические размеры соответствуют выводному соленоиду, число витков обмотки - 40, сечение обмоточного кабеля - $0,5 \text{ см}^2$, индуктивность обмотки - 20 мкГ, активное сопротивление обмотки - 10^{-2} Ом, постоянная времени - 2 мс). Определено положение корректирующего соленоида в магнитной системе прототипа ускорителя.

6. Использование элементной базы, разработанной, исследованной и реализованной в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ для построения системы формирования импульсных токов, наряду с применением новых схем и экспериментальных результатов, позволяет формировать мягкофокусирующее импульсное магнитное поле прототипа коллективного ускорителя с заданными характеристиками: индукцией от 0,3 Т до 2,5 Т на различных радиусах ступеней сжатия и вывода электронного кольца при частоте следования магнитных циклов прототипа до 5 Гц.

Основные результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в следующих работах:

1. Барабаш Л.С., Саранцев В.П., Тимохин В.А., Чалышев В.В. О некоторых схемах импульсного питания катушек компрессора электронно-ионных колец. Сообщение ОИЯИ, 9-84-4, Дубна, 1984.
2. Барабаш Л.С., Саранцев В.П., Тимохин В.А., Чалышев В.В. Формирование импульсных токов со сложным законом изменения во времени в схемах питания компрессора коллективного ускорителя. Сообщение ОИЯИ, 9-83-772, Дубна, 1983.
3. Барabanова Л.М., Барабаш Л.С., Тимохин В.А., Чалышев В.В., Швецов В.С. Тиристорный коммутатор для схем формирования импульсных магнитных полей. Сообщение ОИЯИ, 9-83-762, Дубна, 1983.
4. Тимохин В.А. Параллельная работа тиристорных коммутаторов на индуктивную нагрузку. Сообщение ОИЯИ, 9-84-2, Дубна, 1984.
5. Александров В.С., Тимохин В.А. и др. Формирование магнитного поля ускоряющей магнитной системы прототипа коллективного ускорителя тяжелых ионов. Сообщение ОИЯИ, Р9-11663, Дубна, 1978.

Рукопись поступила в издательский отдел
11 ноября 1985 года.