

На правах рукописи

ЕРОХИН Александр Иванович

**ВЫВОД И РЕКУПЕРАЦИЯ ЭНЕРГИИ
В ИНДУКТИВНЫХ
И ЕМКОСТНЫХ НАКОПИТЕЛЯХ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

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

НОВОСИБИРСК – 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

МЕДВЕДКО
Анатолий Степанович – кандидат технических наук,
Учреждение Российской академии наук
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
СО РАН, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

КУКСАНОВ
Николай Константинович – доктор технических наук,
Учреждение Российской академии наук
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
СО РАН, г. Новосибирск.

ХОДЖИБАГИЯН
Гамлет Георгиевич – кандидат технических наук,
Объединенный институт ядерных
исследований, г. Дубна.

ВЕДУЩАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ: – Российский научный центр “Курчатовский
институт”, г. Москва.

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2010 г.
в «_____» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.01
Учреждения Российской академии наук Института ядерной физики
им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск-90,
проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск.

Автореферат разослан «_____» _____ 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

А. В. Бурдаков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В электрофизических установках, содержащих индуктивные или емкостные накопители энергии, является актуальной проблема безопасного вывода запасенной энергии. В сверхпроводящих магнитах запасенная энергия потенциально может вызвать серьезные повреждения при срыве сверхпроводимости в случае, если дополнительные меры предосторожности не будут приняты.

Первая часть работы посвящена разработке систем вывода энергии из сверхпроводящих магнитов Большого адронного коллайдера (БАК, Швейцария), являющегося на сегодняшний день самым большим коллайдером в мире. Магнитная система коллайдера, составляющая около 27 км, состоит преимущественно из сверхпроводящих магнитов с рабочей температурой 1,9 К. Энергия, запасенная во всей магнитной системе, составляет порядка 10 ГДж, а максимальный ток варьируется от сотен ампер в цепи корректирующих магнитов до 13 кА в цепи основных магнитов. Большинство сверхпроводящих магнитов коллайдера требуют защиты в случае перехода проводника в резистивное состояние. Это обусловлено тем, что скорость распространения срыва сверхпроводимости не достаточно высока, чтобы избежать локального перегрева и дальнейшего разрушения того участка обмотки, где произошел срыв. При этом основным элементом защиты является система вывода энергии из сверхпроводящих магнитов, включая внешний балластный резистор, размыкатели тока и всю необходимую электронику управления. Основной задачей автора в данной работе, помимо разработки элементов систем вывода энергии, было обеспечение их надежности и необходимого быстродействия систем. При этом важна надежность как с точки зрения предотвращения выхода из строя магнитов БАК, так и с точки зрения бесперебойного функционирования всего комплекса в целом.

Вторая часть работы посвящена системе питания плазменной установки со скрещенными электрическими и магнитными полями. В этой установке, выполненной в виде цилиндрического объема, на торцах размещены две группы электродов, которые задают электрическое поле в плоскости, перпендикулярной оси установки, создавая особые условия для удержания плазмы. Система питания такой установки состоит из 20 четырехквadrантных преобразователей с диапазоном выходных напряжений источников в пределах до ± 600 В и диапазоном токов до ± 500 А, обеспечивая при этом рекуперацию энергии буферных конденсаторных батарей.

Целью работы явилась разработка ключевых элементов систем вывода энергии из 13 кА дипольных и квадрупольных магнитов, а также разработка, производство и испытания 205 систем вывода энергии из 600 А

корректирующих магнитов БАК. Целью второй части работы явилась разработка, производство и испытание 4-квadrантных преобразователей напряжения мощностью 300 кВт для системы питания плазменной установки в г. Сан-Диего (США).

Научная новизна

1. Для 4 кА размыкателей тока, являющихся коммутирующим элементом в 13кА системах вывода энергии, было проведено компьютерное моделирование магнитной цепи размыкателя с учетом динамики подвижных частей электромагнитного привода и совместно с моделью электрических цепей его управления. В компьютерной модели была построена эквивалентная электрическая схема, отражающая все указанные типы элементов, а также проведена оригинальная шивка моделей электрической, магнитной и механической систем размыкателя. На основании проведенного моделирования выработаны и реализованы рекомендации по управлению размыкателем.
2. В качестве коммутирующего элемента (размыкателя) системы вывода энергии из 600 А корректирующих магнитов был предложен промышленно выпускаемый выключатель переменного тока. Его конструкция была изменена на основании разработки автора и по его рекомендации с учетом особенностей цепи питания сверхпроводящих магнитов, а также с учетом требований по надежности размыкания цепи. Как результат модернизации, предложенной автором, в конструкцию размыкателя встроен второй независимый канал расцепления, что существенно повышает надежность всей системы вывода энергии.
3. Для гашения дуги, возникающей между контактами при их размыкании, и для увеличения ресурса размыкателей впервые было предложено установить конденсаторный снаббер в цепи сверхпроводящих магнитов. В отличие от релейных цепей переменного тока, где традиционно используются RC-снабберы, в цепи постоянного тока (в данном случае – цепи сверхпроводящих магнитов) допустимая емкость снабберного конденсатора ограничена не возникающими импульсными токами, а требованием на ограничение времени размыкания цепи. Использование токоограничивающего резистора в данном случае нецелесообразно, а емкость конденсатора выбирается такой, чтобы за время размыкания силовых контактов размыкателя обратное напряжение, возникающее в цепи, не успевало дорасти до величины достаточной для образования дуги.
4. Для систем вывода энергии из корректирующих магнитов электроника, непосредственно управляющая выключателями, разрабатывалась и изготавливалась в ИЯФ. При определяющем участии автора были заложены основные принципы управления выключателями:

использование независимых каналов управления каждым из выключателей; внештатные (аварийные) ситуации приводят к размыканию цепи и дальнейшему выводу энергии из корректирующих магнитов, что не приводит ни к повреждению магнитов, ни к сбросу пучка; обрыв сигнальных и сетевых проводов, а также пропажа напряжения питания собственных нужд не приводят к бездействию системы вывода энергии – в случае замкнутой цепи происходит ее размыкание, в случае разомкнутой цепи замыкание последней невозможно.

5. Для системы питания плазменной установки (г. Сан-Диего, США) была проведена разработка, которая обеспечила устойчивую работу комплекса преобразователей на общую нагрузку в виде плазмы. Для рекуперации энергии конденсаторных батарей на каждую группу преобразователей установлено по одному рекуператору. Решена задача по ограничению коммутационных перенапряжений и минимизации тепловых коммутационных потерь на IGBT.

Практическая значимость работы

1. Проведенное моделирование работы 4 кА размыкателей тока для систем вывода энергии из основных магнитов позволило модифицировать их (размыкатели) с учетом всех требований цепи питания этих магнитов, включая требование на быстрдействие, устойчивую работу в достаточно широком диапазоне токов управления, а также исключение дребезга силовых контактов размыкателей.
2. Автором разработана система вывода энергии из корректирующих магнитов БАК, под его руководством в ИЯФ серийно изготовлены 205 таких систем, которые были испытаны и затем поставлены в ЦЕРН (Женева) на кольцо БАК. Проведенные испытания показали, что предложенные автором конденсаторные снабберы не только существенно уменьшили время размыкания цепи, но и увеличили ресурс размыкателей с 2000 срабатываний под полным током до 13000 срабатываний (гарантируемый заводом ресурс механики) с соблюдением всех требований на возможность их использования в цепи питания сверхпроводящих магнитов. Модифицированные размыкатели, произведенные для ЦЕРН на основе разработок автора, прошли сертификацию в независимом сертификационном центре в Берлине.
3. По второй части работы описано, что в ИЯФ были изготовлены 2 преобразователя (рекуператора) и 22 контроллера, а в 2003г. в Сан-Диего (США) по рекомендациям автора – 20 преобразователей. В целом система питания обеспечивала функционирование установки в течение всего срока эксплуатации (несколько лет).

Автор выносит на защиту следующие результаты проделанной работы:

1. Для систем вывода энергии из основных магнитов БАК проведено моделирование работы электромагнитного привода автоматического размыкателя тока с учетом нелинейности (насыщения) участков магнитной цепи, с учетом изменения зазора в магнитной цепи и с сопряжением электрических цепей управления с магнитной цепью привода. На основании выполненного моделирования выработаны рекомендации, которые позволили обеспечить оптимальный режим работы всех 254 размыкателей ВАБ-49, установленных позднее в тоннель БАК. При этом сами размыкатели были выпущены заводом с учетом результатов моделирования.
2. Разработаны, произведены и испытаны 205 систем вывода энергии из корректирующих магнитов. Было решено использовать в каждой цепи по три, полностью независимых (с независимыми каналами управления), размыкателя, соединенных последовательно, что существенно уменьшает вероятность отказа системы в целом. При этом третий выключатель, оставаясь резервным при штатной работе двух других, срабатывает только тогда, когда появляется информация о сбое при размыкании двух основных выключателей этой цепи. Такая топология существенно увеличила надежность систем вывода энергии.
3. Проведенная автором доработка автоматических выключателей ВА57-35 позволила использовать их в качестве размыкателей тока в системах вывода энергии из корректирующих магнитов. Конструкция выключателей была изменена на основании разработки автора и по его рекомендации с учетом особенностей цепи питания сверхпроводящих магнитов, а также с учетом требований по надежности размыкания цепи. Как результат модернизации, предложенной автором, в конструкцию размыкателя встроены два независимых канала расцепления, что существенно повысило надежность всей системы вывода энергии.
4. Предложенные конденсаторные снабберы позволили минимизировать время горения дуги между контактами, а, следовательно, уменьшить общее время размыкания и увеличить ресурс размыкателей.
5. Для плазменной установки со скрещенными электрическими и магнитными полями проведена разработка, обеспечившая устойчивую работу всего комплекса преобразователей (двадцати штук) на одну общую нагрузку в виде плазмы, являющейся в данном случае нелинейной нагрузкой. Предложенная автором разработка позволила рекуперировать энергию конденсаторных батарей. Устойчивость и стабильность системы обеспечена в полосе частот от режима постоянного напряжения до двухсот герц. Решена задача по ограничению коммутационных пере-напряжений и минимизации тепловых коммутационных потерь на IGBT.

Апробация работы и публикации

Основные результаты диссертационной работы докладывались на семинаре в Институте ядерной физики им. Будкера СО РАН и на конференциях ICAR2000 (Дармштадт, Германия, 2000г.) и IPMC (Лас-Вегас, США, 2001г., 2008г.), а так же опубликованы в виде 9 статей, из них 2 в реферируемых журналах.

Структура работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы из (39) наименований, изложена на (144) страницах машинописного текста, содержит (68) рисунков и (17) таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность применения систем вывода энергии из сверхпроводящих магнитов и четырехквadrантных преобразователей напряжения, а также показана практическая значимость диссертационной работы.

В первой главе показана необходимость использования систем защиты сверхпроводящих магнитов, в частности систем вывода энергии. Показаны различные варианты систем защиты сверхпроводящих магнитов и приведен обзор существующих систем вывода энергии в ведущих ускорительных лабораториях: DESY (Германия), FNAL (США), ИЯФ (Россия).

Во второй главе кратко описывается магнитная система БАК, приведены виды магнитных цепей и их параметры (Таблица 1).

Таблица 1

Тип цепи	Ток	Кол-во цепей
Основные диполи	13 kA	8
Основные квадрупольные	13 kA	16
Индивидуально запитываемые квадрупольные	4 – 6 kA	78
Сепарирующие диполи	6 kA	16
Квадрупольные финальной фокусировки	12 kA	8
Корректирующие магниты с системами вывода энергии	600 A	202
Корректирующие магниты без систем вывода энергии	60 – 600 A	1243

Показана необходимость использования систем вывода энергии для основных (дипольных и квадрупольных) и корректирующих магнитов БАК,

приведены широко используемые принципы и требования для систем защиты сверхпроводящих магнитов:

- разбивка всего кольца на сектора, что позволяет получить цепи с меньшей запасенной энергией магнитного поля;
- быстрое детектирование срыва;
- шунтирование магнита (резистором или диодом в случае необходимости), в котором произошел срыв, от остальной цепи;
- распределение энергии в «сорвавшемся» маните;
- контролируемый вывод энергии из всей цепи магнитов.

Далее приведены особенности регистрации срыва сверхпроводимости для корректирующих магнитов и основных магнитов БАК и описываются системы вывода энергии из основных магнитов, приведены их параметры (для дипольных цепей Таблица 2).

Таблица 2

Параметр	Unit	Величина
Iном	А	11850
Iмакс	А	12840
Lцепи	Гн	15.7
dI/dtмакс	А/с	10.0
N	Шт.	154

Одним из основных элементов системы вывода энергии является размыкатель цепи, коммутирующий цепь питания таким образом, что в нее вводится балластный резистор. В главе приведены требования, которым должен удовлетворять размыкатель тока для обеспечения необходимой надежности системы вывода энергии.

В активном (при ненулевом токе) состоянии магнитной цепи, система всегда должна быть управляемой и готовой к выводу энергии, вне зависимости от состояния какой-либо инфраструктуры. В главе приведены решения, предусмотренные для удовлетворения этим требованиям. Введено понятие сбоя системы вывода энергии, перечислены виды сбоев, их вероятность. Показаны методы минимизации вероятности сбоев при размыкании систем вывода энергии.

В конце главы приводится постановка задачи для автора диссертации.

В третьей главе приводятся параметры выбранного размыкателя тока ВАБ49, описываются принципы его работы и обосновывается необходимость моделирования работы электромагнитного привода размыкателя. Далее в главе описывается модель привода, и приводятся результаты моделирования.

При моделировании обязательным требованием является наглядность представления узлов и элементов привода, наличие возможности проверки правильности составленной или выбранной модели, удобное отображение протекающих в модели процессов. Основную особенность моделирования составила необходимость учесть динамику процессов в механических цепях, в магнитных цепях и в электрических цепях, в строгой связи всех этих процессов.

Основываясь на описании устройства размыкателя и основных принципах его работы, можно сформулировать следующие особенности:

- магнитная цепь содержит участки магнитопровода различного сечения, при этом на некоторых участках магнитопровод приходит в состояние насыщения;
- магнитная цепь содержит воздушные зазоры, величина которых изменяется во времени, что означает изменение во времени и суммарных сил, действующих на ярмо;
- необходимо согласование электрических управляющих цепей с эквивалентным электрическим представлением магнитной цепи и подвижных частей механики, с учетом их масс и геометрии.

В процессе моделирования переходных процессов, возникающих в электромагнитной системе размыкателя, моделировались и регистрировались:

- 1) магнитные потоки во всех цепях;
- 2) движение левого и правого ярма с выводом координаты;
- 3) скорости движения левого и правого ярма;
- 4) результирующие силы, действующие на ярмо;
- 5) токи в удерживающей и импульсной катушках;
- 6) напряжения на катушках.

Далее в главе приводится семейство кривых для времен полного отрыва левого и правого ярма в зависимости от напряжения на зарядном конденсаторе и от тока в удерживающей катушке, а также приводятся рекомендации для оптимального управления приводом размыкателя.

На рис. 1 приведена блок-схема модели электромагнитного привода.

В четвертой главе приведен обзор цепей корректирующих магнитов БАК, приведены их параметры, и сформулированы требования на системы вывода энергии. На рис. 2 показан общий вид цепи питания и защиты корректирующих магнитов.

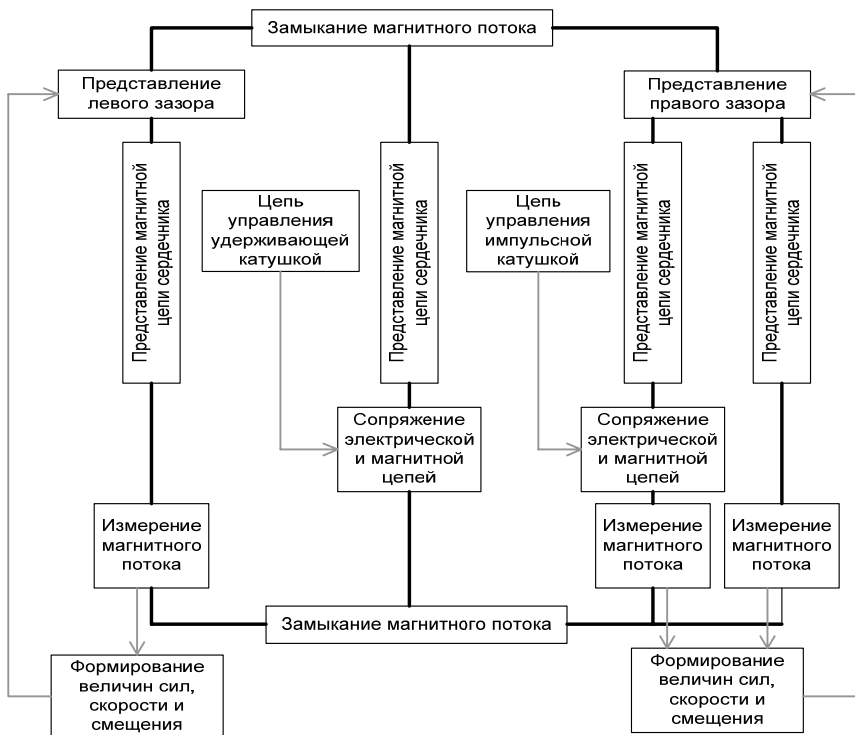


Рис. 1. Блок-схема модели привода.

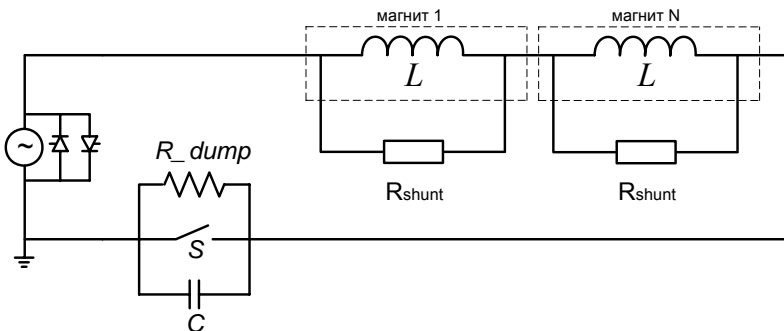


Рис. 2. Схема цепи корректирующих магнитов, включая систему вывода энергии.

Топология системы вывода энергии приведена на рис. 3. Предложено использование трех размыкателей тока последовательно, что увеличивает надежность системы. Вероятность сбоя хотя бы одной из 202 систем вывода энергии за 30 лет эксплуатации БАК составляет менее 10^{-4} . В штатном режиме коммутируются только размыкатели BrA и BrB, а BrZ остается в замкнутом состоянии, размыкаясь только в случае одновременного сбоя первых двух. Такое резервирование существенно увеличивает ресурс системы.

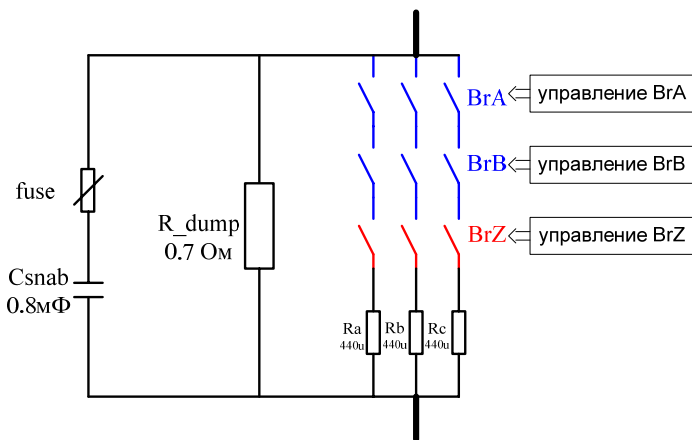


Рис. 3. Элементы системы вывода энергии.

В качестве размыкателя тока был выбран промышленно выпускаемый автоматический выключатель ВА57-35. Однако для удовлетворения всем требованиям автором была предложена доработка выключателей: удалены тепловой и электромагнитный расцепители, а в освободившемся пространстве совместно установлены расцепители на основе импульсной и удерживающей катушек.

Для защиты от возникающей дуги при размыкании силовых контактов под током предложен конденсаторный снаббер, установленный параллельно размыкателю, так, что ток индуктивной цепи, в случае выключения размыкателя, в первый момент времени замыкается через конденсатор. В главе сформулированы критерии выбора величины емкости конденсаторного снаббера.

На рис. 4а) показано, что без использования снаббера при индуктивности нагрузки 10 мГн время горения дуги составляет около 8 мс. На рис. 4б), для сравнения, показан процесс размыкания выключателя при использовании снаббера для цепи с индуктивностью такой же величины. На рисунках приведены время задержки срабатывания расцепителей Δt_1 , время горения дуги Δt_2 , и время зарядки конденсатора снаббера Δt_3 .

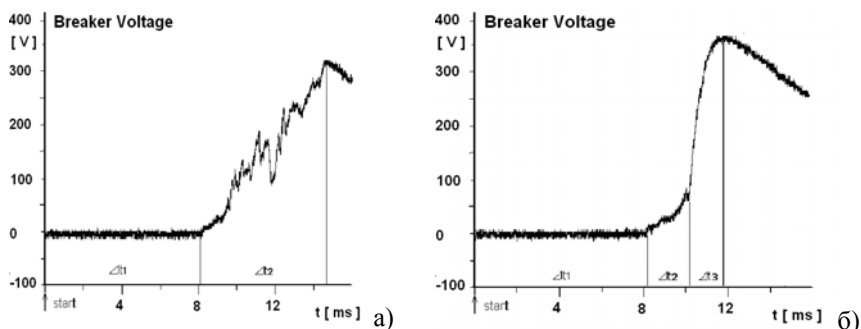


Рис. 4. Напряжение между контактами при токе 600 А:
 а) $C_{sn} = 0$, б) $C_{sn} = 0.8$ мФ.

Далее в главе приводится краткое описание управляющей электроники, часть из которой разрабатывалась в ЦЕРН, а часть – сотрудником ИЯФ Горчаковым К.М. при участии автора.

В пятой главе приводятся результаты испытаний, таких как:

- выбор величины емкости снаббера;
- типовые испытания и испытания на долговременную надежность;
- производственные испытания;
- тепловые испытания;
- испытания на этапе запуска БАК.

Были отработаны решения по выбору автоматических выключателей и по выбору емкости конденсаторного снаббера. Испытания проводились для ряда значений емкости от 0 до 0.96 мФ.

При испытаниях на долговременную надежность были проведены 13000 размыканий под током в 600 А для системы из двух размыкателей. Испытания показали полную работоспособность размыкателей после 13000 циклов. Такие параметры, как времена срабатывания расцепителей и сопротивления контактных групп оставались в пределах статистической погрешности на протяжении всех испытаний.

Далее в главе описываются испытания, проводимые в процессе серийного производства систем, после монтажа систем в ЦЕРН и испытания, проводимые на этапе запуска БАК. Испытания показали надежность и соответствие предъявленным требованиям всех 205 серийно изготовленных и поставленных в ЦЕРН систем.

В шестой главе описывается система питания электродов плазменной установки со скрещенными электрическим и магнитным полями (г. Сан-Диего, США). Обосновывается необходимость разработки системы 4-квартантных преобразователей напряжения с рекуперацией энергии (рис. 5).

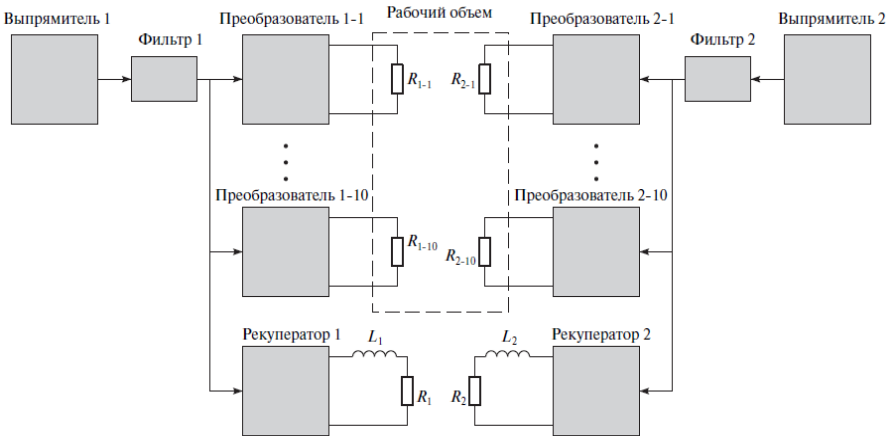


Рис. 5. Система питания электродов.

На рис. 6. приведено схемное решение для 4-квadrантного преобразователя, выходное напряжение которого при симметричном напряжении питания $\pm U_{dc}$ и симметричном ШИМ равно:

$$\langle U_{нагр} \rangle = U_{dc} \cdot \left(1 - \frac{2\tau}{T}\right),$$

где $T = 1/F_{clock}$ период ШИМ; τ – временной интервал, когда $Q2$ открыт.

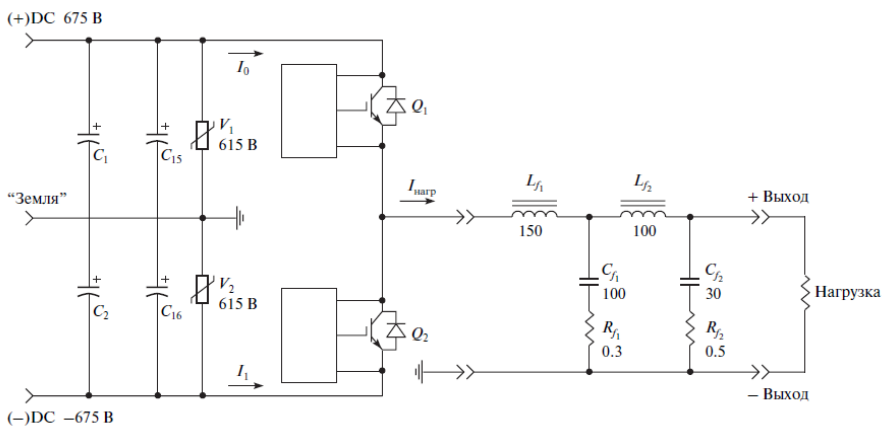


Рис. 6. Силовая схема преобразователя.

Далее в главе описывается возможность возникновения обратных для входной конденсаторной батареи токов, как при коммутации ключей полумоста, так и в силу сложного распределения плотности тока электронов и ионов в плазме. Поскольку напряжение питания преобразователей обеспечивается тиристорными выпрямителями, то, при возникновении в преобразователях токов обратного направления, вполне может возникнуть ситуация, в которой суммарная величина этих токов превышает величину прямого тока, отдаваемого выпрямителем. В этом случае начинает накапливаться излишняя энергия во входных фильтрующих конденсаторах C_1 или C_2 , приводя к перенапряжению на них. Оценочно усредненная величина обратного тока для комплекса из 10 преобразователей составляет порядка 10% от среднего прямого тока. Для компенсации этого тока, а, следовательно, и для предотвращения перенапряжений на батарее, в каждую группу преобразователей включен рекуператор (рис. 7), работающий квазилинейной нагрузкой. Рекуператор перебрасывает излишний заряд, накопленный в фильтрующих конденсаторах одной из полярностей, в конденсаторы источника другой полярности, в котором потребляемый ток преобладает над «возвращаемым».

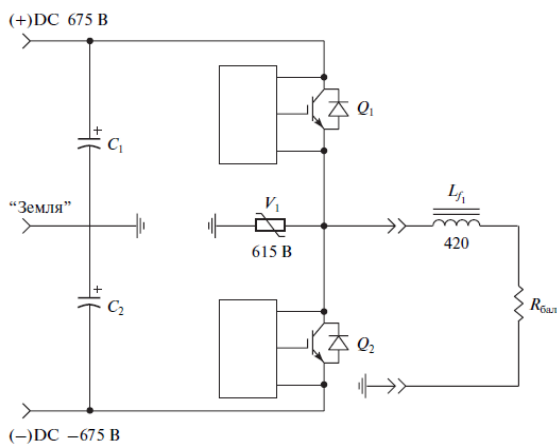


Рис. 7. Силовая схема рекуператора.

Приводится решение проблемы по ограничению коммутационных перенапряжений. В диссертации приведена эквивалентная схема преобразователя (рекуператора) с учетом паразитных индуктивностей шин и с защитными цепями (снабберами). При заданных защитных цепях ожидаемое перенапряжение для данной схемы составляет не более 230 В. При испытании на полном токе коммутационные перенапряжения не превысили 170 В.

Для управления преобразователями и рекуператорами сотрудником ИЯФ Скоробогатовым Д.Н. при участии автора был разработан контроллер, функции которого:

- генерация ШИМ;
- сбор блокировок;
- аналоговые измерения;
- система обратной связи (две петли обратной связи).

Обратная связь позволила обеспечить стабильность работы системы преобразователей и рекуператоров в полосе частот до 200 Гц.

В конце главы приводятся результаты испытаний преобразователей и рекуператоров. Проведенные испытания в ИЯФ и в Сан-Диего показали способность работы преобразователей и рекуператоров при полных токах и напряжениях. Также были проведены испытания системы из нескольких преобразователей и двух рекуператоров при работе на плазму.

Позднее, по завершению монтажа всей установки, была испытана вся система питания из 20 преобразователей и 2 рекуператоров. Испытания проводились при работе на плазму при полном токе до ± 500 А и напряжении до ± 300 В (выше поднять напряжение не удалось по причине пробоев между электродами). При этом была обеспечена необходимая точность регулировки и стабильность не хуже 1%, что вполне достаточно для поддержания необходимых параметров плазмы. Несмотря на нелинейность нагрузки (плазмы), обратная связь преобразователей и рекуператоров обеспечила устойчивую работу во всем диапазоне токов и напряжений.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы, выносимые на защиту.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Ерохин А.И., Медведко А.С. Компьютерное моделирование импульсной цепи управления размыкателя постоянного тока в системе вывода энергии из 13кА сверхпроводящих магнитов. Препринт ИЯФ, 2007г.
2. A. Erokhin, A. Medvedko. Modeling and computer simulation of the pulsed powering of mechanical D.C. circuit breakers for the CERN/LHC Superconducting Magnet Energy Extraction System. 6th ICAP, Darmstadt, Germany, 2000.
3. A. Erokhin, A. Medvedko, K.D. Petersen. Modeling and computer simulation of the pulsed powering of mechanical D.C. circuit breakers for the CERN/LHC Superconducting Magnet Energy Extraction System. LHC PR442, 2001.
4. K. D. Petersen, A. Erokhin et al. Energy extraction in the CERN Large Hadron Collider. IPMC, Las Vegas, 2001.
5. G. J Coelingh, A. Erokhin et al. Design and commissioning of the Energy Extraction systems for the LHC corrector magnet circuits. IPMC, Las Vegas, 2008.
6. Ерохин А.И., Медведко А.С., Скоробогатов Д.Н. Четырехквadrантный преобразователь напряжения, 500В 600А. Препринт ИЯФ, 2006г.
7. Ерохин А.И., Медведко А.С. Компьютерное моделирование импульсной цепи управления размыкателя постоянного тока в системе вывода энергии из 13кА сверхпроводящих магнитов. Вестник НГУ, Серия «Физика», Том 4, №2, 2009, стр. 84-91.
8. А.И. Ерохин и др. Четырехквadrантный преобразователь напряжения 600В, 500А. Приборы и техника эксперимента, 2010, № 2.
9. Erokhin A. et al. A Four_Quadrant Voltage Converter (600 V, 500 A). Instruments and Experimental Techniques, 2010, Vol. 53, No. 2, pp. 240-246.

ЕРОХИН Александр Иванович

**Вывод и рекуперация энергии
в индуктивных
и ёмкостных накопителях**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Сдано в набор .31.03. 2010 г.

Подписано в печать 1.04. 2010 г.

Формат 60х90 1/16 Объем 1.0 печ.л., 0.8 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 10

Обработано на РС и отпечатано
на ротапринтере «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11