

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

На правах рукописи

НЕПОГОДЬЕВ Сергей Васильевич

КОМПЛЕКС ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ СОЗДАНИЯ СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА
ОСНОВЕ СТАТИЧЕСКИХ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и
системы, включая их управление
и регулирование

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Киев - 1992

№ 26.408

Работа выполнена в Институте проблем
энергосбережения АН Украины

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00814508 (Q)

- Научный руководитель - кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
А.В.НОВОСЕЛЫЦЕВ
- Официальные оппоненты - член-корреспондент АН Украины,
доктор технических наук,
профессор
И.В.ВОЛКОВ
- кандидат физико-математических
наук, старший научный сотрудник
В.П.ФЕЩЕНКО
- Ведущая организация - ЭНИИ им.Г.М.Кржижановского

Защита диссертации состоится "29" декабря 1992 г.
в 14 часов на заседании специализированного Совета К 016.63.01
в Институте проблем энергосбережения АН Украины по адресу:
252070, Киев-70, ул. Покровская, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "16" ноября 1992 г.

Ученый секретарь
специализированного Совета
канд. техн. наук

Н.В. Рапцун

Н.В. РАПЦУН

ЛННБ ім. В. Стефаника
АН УРСР

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Развитие криогенной техники, синтез новых высокотемпературных сверхпроводниковых (СП) материалов создают реальные предпосылки для широкого практического освоения СП приборов и устройств. Применение СП материалов в таких областях, как энергетика (системы генерирования, хранения и передачи энергии), транспорт (поезда на магнитной подушке), электроника и вычислительная техника (СП квантовые интерферометры, СП элементы памяти), медицина (ЯМР томографы), физика элементарных частиц (СП ускорители), горнодобывающая промышленность (магнитные сепараторы), служат наглядным доказательством возможности увеличения эффективности производства и экономии электроэнергии.

Неотъемлемой частью большинства перечисленных устройств являются СП магниты постоянного тока (СПМ). Одновременно с проектированием СПМ решаются задачи разработки устройств для их запитки. Такие устройства представляют собой комплексы электротехнического оборудования, предназначенные для создания сильных магнитных полей (КОСМП). КОСМП состоят из преобразователей электрической энергии, блоков защиты, контрольно-измерительных устройств, а также устройств, обеспечивающих поддержание параметров комплекса в заданных пределах, которые объединены общим процессом накопления, регулирования и хранения энергии, запасаемой в магнитном поле СПМ. Специфика КОСМП заключается в том, что часть их элементов и блоков расположена в зоне нормальных температур, а часть - выполнена из СП материалов и расположена в устройстве для поддержания низких температур (криостате).

Удовлетворение повышенных функциональных и энергетических требований, предъявляемых большинством потребителей к КОСМП, состоит как в обеспечении эффективных режимов работы комплекса, так и в принятии специальных мер, связанных со спецификой процесса ввода-вывода энергии СПМ с целью улучшения энергетической эффективности КОСМП и предотвращения аварийных ситуаций в процессе функционирования.

Одним из действенных способов повышения энергетической эффективности КОСМП, удовлетворения повышенных функциональных требований является использование в их составе статических СП преобразователей электрической энергии (СПП). СПП обладают высоким КПД, просты в управлении и обслуживании. Основная сложность в построении КОСМП на основе СПП - совмещение ряда противоречивых требований, обусловленных спецификой функционирования элементов и устройств, входящих в комплекс.

Затраты на эксплуатацию СПМ и КОСМП, выражаемые в основном в коли-

честве выпариваемого х.адогента, во многом зависят от различных видов потерь энергии в криогенной зоне, которые в определенной степени являются неизбежными. Например, стоимость эксплуатации СПМ для ЯМР томографа при использовании для его запитки КОСМП на основе источника тока с прямыми вводами составляет 2,5 долл./ч. Применение для этих целей КОСМП на основе энергетически эффективного СПП позволяет снизить эти затраты практически вдвое.

Таким образом, задача разработки КОСМП на основе СПП, повышения их энергетической эффективности является весьма важной.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планами НИР Совета министров, ГКНТ, и АН Украины по комплексным проблемам "Научные основы электроэнергетики", "Научные основы энергосбережения", а также в рамках международного целевого проекта "Сильноточные устройства с использованием сверхпроводников, работающих при различных температурах" (задание 6.2.4.5), выполненными в рамках темы "Криотрон" (1985-1987 г.г.), Пост. ГКНТ №464 от 05.09.85 г., № Гос. регистр. 01.86.0032911), темой "Трембита" (1988-1990 г.г. Пост. ГКНТ №27 от 20.07.88 г., № Гос. регистр. 01.89.0024480), темой "Доминанта-2" (1988-1991 г.г. Пост. Президиума АН Украины №402 от 11.12.87 г., № Гос. регистр. 01.88.0019095).

Целью диссертационной работы является разработка комплекса электротехнического оборудования для создания сильных магнитных полей на основе установления закономерностей построения статических сверхпроводниковых преобразователей электрической энергии с улучшенными характеристиками.

Поставленная цель потребовала решения следующих основных задач:

- разработка методики системного анализа электромагнитных процессов, протекающих в контурах СПП;
- разработка принципов управления и контроля КОСМП;
- разработка и исследование конструктивных решений энергетически эффективных СПП в составе КОСМП;
- разработка и практическая реализация элементов и блоков КОСМП, их опытная проверка и внедрение.

Методы исследования. При решении поставленной задачи использовались методы тензорного анализа сложных систем, элементы теории полу- и сверхпроводниковых электротехнических устройств, математический аппарат линейных обыкновенных дифференциальных уравнений, элементы теории матриц. Достоверность расчетов подтверждена экспериментально.

Автор защищает следующие основные научные и практические результаты работы: 1. Методика тензорного анализа электромагнитных процессов, протекающих в контурах СПП. 2. Основные закономерности, полученные в

результате анализа схемных решений СПП. 3. Элементы обобщенного подхода к построению алгоритмов работы КОСМП. 4. Эффективные с точки зрения помехоустойчивости и снижения времени ввода тока в обмотку СПМ сочетания схемных решений СПП с алгоритмами их управления. 5. Структурные схемы КОСМП. 6. Результаты экспериментальных исследований КОСМП. 7. Принципы построения высокотемпературных СПП из объемных керамических сверхпроводниковых материалов.

Научная новизна. 1. Предложена методика тензорного анализа электромагнитных процессов, позволяющая рассматривать процессы в различных схемах СПП с единых позиций инвариантной величины. 2. Разработана группа стандартных преобразований на основе уравнений ортогональных электрических цепей, позволяющая по результатам расчета одной схемы получать результаты расчета любой другой схемы СПП, состоящей из тех же элементов. 3. Систематизированы алгоритмы работы КОСМП при условии неизменности амплитуды импульсов напряжения, действующих в первичных обмотках СП трансформаторов, определены наиболее эффективные сочетания схемных решений СПП с алгоритмами их управления с точки зрения помехоустойчивости и снижения времени ввода тока в обмотку СПМ. 4. Предложены новые схемные и конструктивные решения элементов и блоков входящих в КОСМП, в том числе высокотемпературных СПП, конструкции которых основаны на выпрессовывании схем преобразователей в виде монолитных образцов.

Практическая ценность. Использование новых научных положений, обоснованных в диссертационной работе, позволило использовать стереотипные вычислительные операции для каждой схемы исследуемых СПП, и тем самым описать электромагнитные процессы, протекающие в контурах преобразователей формально сходными соотношениями; из многообразия алгоритмов управления КОСМП выделить шесть, отличающихся между собой степенью влияния на выходные характеристики и технико-экономические показатели комплекса, что дает возможность при проектировании КОСМП сузить круг решаемых задач; определить наиболее эффективные сочетания схемных решений СПП с алгоритмами их управления и непосредственно использовать их при разработке КОСМП с улучшенными показателями помехоустойчивости и времени защиты СПМ; разработать новые схемные решения и конструкции элементов и блоков КОСМП с улучшенными характеристиками; снизить количество контактных соединений в конструкции высокотемпературного СПП до минимума, и тем самым повысить величину критического тока в элементах преобразователя.

Внедрение результатов работы. Теоретические положения и практические результаты диссертационной работы положены в основу ряда разработок, выполненных при участии автора в 1986-1991 г.г. по х/д с заинтересован-

ными организациями и предприятиями: №952-88, 683-91 (г.Москва, НИИРФ, г.Донецк, ДонФТИ), №605-88, 607-90 (г.Москва, ЭНИИ), №626-91 (г.Н.Новгород, НПО "Полет"). Малая серия (7шт.) СПП в составе КОСМП для запитки СПМ постоянным током до 120 А изготовлена СКТБ ИПЭ АНУ и используется в радиофизических исследованиях. Всего по теме диссертации имеется 6 актов внедрения.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на IV и V Всесоюзных н/т конференциях "Проблемы преобразовательной техники", г.Чернигов (1987 г., 1991 г.); Всесоюзной н/т конференции "Проблемы нелинейной электротехники", г.Черкаassy (1988 г.); III-Польско-советской н/т конференции "Комплексная автоматизация промышленности", г.Вроцлав (1988 г.); Всесоюзном семинаре "Энергосбережение и проблемы сверхпроводимости", г.Яремча (1990 г.); Международной н/т конференции "Магнитная технология", г.Ленинград (1991 г.); Международной н/т конференции "Комплексные проблемы сверхпроводимости", г.Киев (1992 г.).

Публикации. По результатам работы опубликована одна монография, 8 статей, 2 препринта, 9 тезисов докладов, получено 3 авторских свидетельства СССР на изобретения и два положительных решения по заявкам на изобретения. По смежным вопросам имеется 31 опубликованная работа.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и содержит 144 страниц основного машинописного текста, 4 таблицы, 68 рисунков.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цель и перечислены задачи, возникающие при решении комплексной проблемы построения КОСМП на основе СПП.

Первая глава посвящена особенностям построения КОСМП на основе СПП, предназначенных для питания постоянным током обмоток СПМ. Анализируются известные модели СПП, системы управления и способы защиты криогенной части КОСМП при аварийных режимах работы. СПП или их отдельные элементы могут работать лишь при температурах, обеспечивающих сверхпроводящее состояние материалов, из которых они изготовлены, поэтому они размещаются в устройстве, служащем для поддержания низких температур - криостате. Большинство схем КОСМП на основе СПП могут быть представлены одной обобщенной схемой (рис.1). Комплекс запитывается от первичного источника электроэнергии, который может представлять собой как сеть переменного

тока промышленной частоты, так и автономный источник электроэнергии. Параметры СПМ и первичного источника согласуются с помощью последовательно включенных полупроводникового преобразователя, являющегося частью системы управления (СУ) и СПП. Выход из режима криотрона или переход обмотки СПМ в резистивное состояние могут привести к возникновению аварийного режима работы СПП. Требуемая надежность КОСМП обеспечивается правильным выбором параметров и алгоритмов управления СПП и применением устройств защиты. Необходимое давление в криостате поддерживается регулировкой вентилей В1 и В2. Состояние приборов и оборудования комплекса во время работы контролируется с помощью контрольно-измерительного стенда.

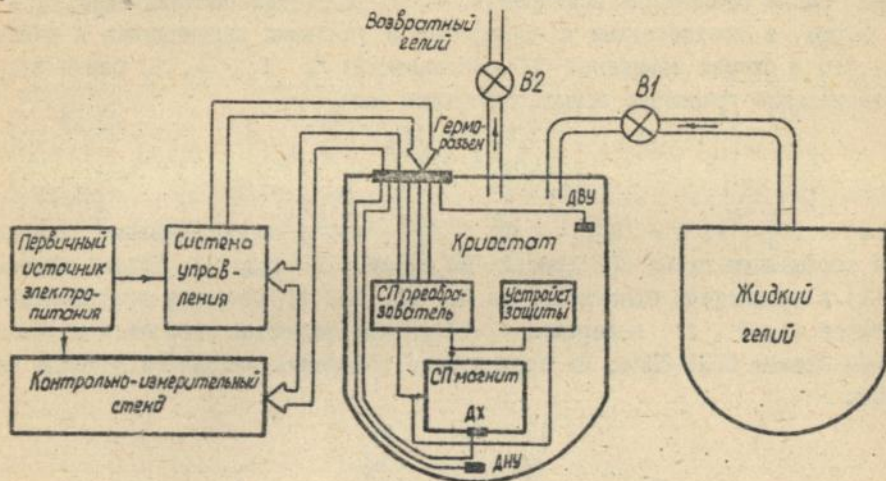


рис. I

Снижение затрат на эксплуатацию комплекса связано с разработкой на основе ВТСП материалов криогенной части КОСМП. Исследование технико-экономических аспектов проблемы применения ВТСП керамики группы Y-Ba-Cu-O позволяет сделать вывод, что ее применение в настоящее время оправдано для относительно слабых магнитных полей при использовании небольшого количества сверхпроводника. В этом случае расходы на эксплуатацию КОСМП снижаются более чем на порядок. На основе проведенного анализа источников научно-технической информации ставится задача проведения исследований.

Во второй главе проводится анализ электромагнитных процессов, протекающих в контурах СПП согласно разработанной методике. Конечной задачей исследования СПП является разработка требуемых режимов и алгоритмов

работы КОСМИ с целью получения эффективных энергетических показателей и выходных характеристик комплекса. При проведении анализа предполагалось, что влияние термодинамических процессов сведено к минимуму путем достаточного захлаживания элементов СПП и их можно не учитывать. Один цикл работы СПП разбивался на два временных интервала - ввода тока в СП нагрузки и коммутации тока нагрузки из одного контура СПП - в другой. Решения отыскивались в операторной форме записи с использованием преобразования Карсона. Для анализа используется чисто-контурное ортогональное уравнение напряжения: $E+e=z(1+I)$, где e и I - заданные и известные значения напряжений и токов в ветвях эквивалентных схем СПП, а E и i - искомые значения напряжений и токов на элементах СПП; z - матрица сопротивлений. После разложения векторов E, e, I, i на две составляющие, а z - на четыре, в соответствии с контурными и узловыми переменными и учитывая, что в схемах замещения СПП составляющие E_1, I_1, I_2, i_2 равны нулю, ортогональное уравнение примет следующий вид:

$$\begin{aligned} e'_i &= z'_i i'_i, \\ E'_2 + e'_2 &= z'_3 i'_1, \end{aligned}$$

где $e' = (C_{\beta}^{\beta})^T e$; $z' = (C_{\beta}^{\beta})^T z C_{\beta}^{\beta}$; C_{β}^{β} - тензор преобразования, изменяющий обобщенную схему СПП (рис.2) на схему СПП (рис.3). Нижние индексы (I-II) в уравнениях означают, что e'_i, e'_2, E'_2, i'_1 являются составляющими векторов e', E', i' , а верхние (I-IV), - что величины относятся к исследуемым схемам СПП-СПП4. Из предыдущего уравнения находятся искомые величины

$$\begin{aligned} i'_i &= (z'_i)^{-1} e'_i, \\ E'_2 &= z'_3 i'_1 - e'_2. \end{aligned}$$

Для расчета внекоммутационных процессов в схемах СПП2-СПП4 в качестве "эталоны" используется схема СПП. После изменения начальных условий и определения тензоров преобразования C_{β}^{β} I-IV, изменяющих схему СПП на СПП2-СПП4, воздействующие величины находятся из следующих обобщенных уравнений:

$$e^{II-IV} = (C_{\beta}^{\beta})^{II-IV} e',$$

$$z^{II-IV} = (C_{\beta}^{\beta})^{II-IV} z' C_{\beta}^{\beta}{}^{II-IV},$$

а величины отклика для схем СПП2-СПП4 определяются из следующих обобщенных уравнений:

$$i_1^{II-IV} = (z_1^{II-IV})^{-1} e_1^{II-IV};$$

$$E_2^{II-IV} = z_3^{II-IV} i_1^{II-IV} - e_2^{II-IV}.$$

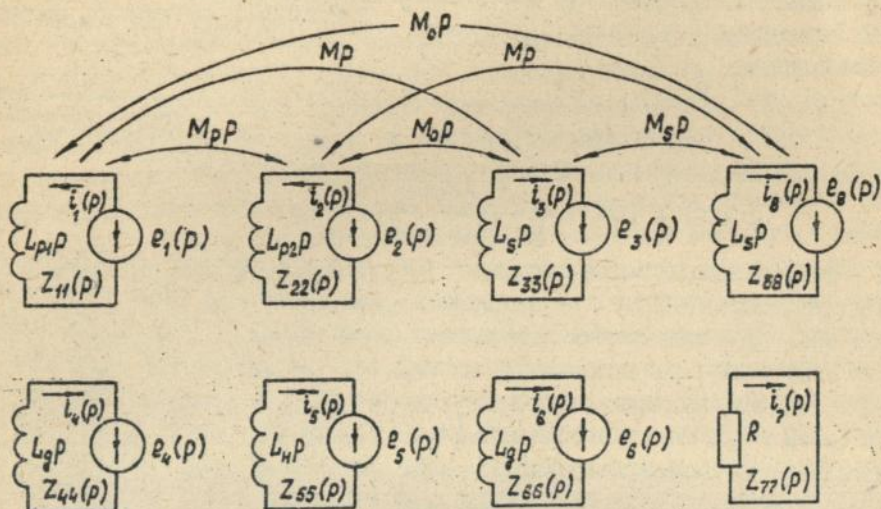


Рис. 2

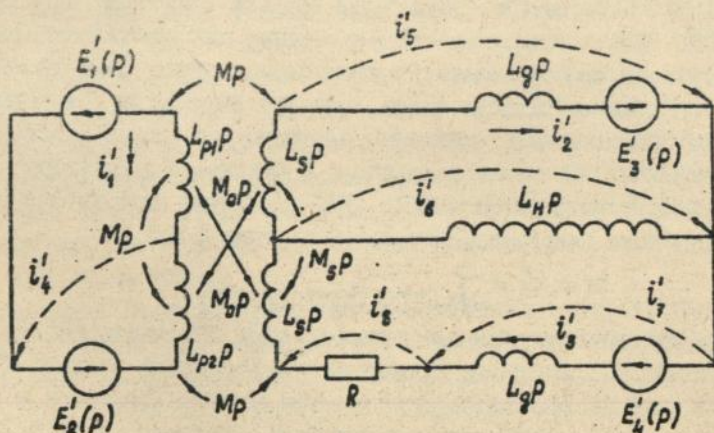


Рис. 3

Схема замещения СПП2, на временных интервалах ввода и коммутации, приводится к схеме СПП1. Выражения, описывающие процессы в схемах СПП1, СПП2 на этих временных интервалах будут иметь одинаковый вид. Для токов СП нагрузки получим

$$i''_h(t) = i''_h(t) = \frac{MU}{L_p R [L_h + L_s(1-k^2) + L_g]^2} (1 - e^{-\alpha_1' t}) + \frac{MU}{L_p} \frac{1}{L_h + L_s(1-k^2) + L_g} t e^{-\alpha_1' t}$$

Выражение для напряжений на СП нагрузки имеет следующий вид:

$$u''_h(t) = u''_h(t) = \frac{MU L_h}{L_p [L_h + L_s(1-ks) + L_g]} (1 - e^{-\alpha_1' t}),$$

где M - взаимоиנדукция между первичной обмоткой и вторичной полуобмоткой СП трансформатора (СПТ); U - напряжение, действующее в цепи первичной обмотки СПТ; L_p - индуктивность первичной обмотки СПТ; R - сопротивление клапана криотрона в резистивном состоянии; L_h - индуктивность СП нагрузки; L_s - индуктивность вторичной полуобмотки СПТ; k - коэффициент магнитной связи между первичной обмоткой и вторичной полуобмоткой СПТ; L_g - индуктивность клапана криотрона; $A' = 2L_h [L_s(1+ks-2k^2) + L_g] + L_s(1+2k^2ks - 2k^2-ks) + L_g^2 + 2L_s L_g(1-k^2)$; ks - коэффициент магнитной связи между вторичными полуобмотками СПТ; $\alpha_1' = [L_h + L_s(1-ks) + L_g]R/A'$. Аналогичные выражения получены для схем СПП3, СПП4.

Анализ электромагнитных процессов в схемах СПП1-СПП4 на временных интервалах коммутации отличает то обстоятельство, что воздействующие величины не претерпевают изменений вследствие неизменности структурных связей, меняются лишь их компоненты. Это обстоятельство делает удобным использование в качестве "эталонов" для расчета коммутационных процессов в схемах СПП1-СПП4 собственных схем замещения для внекоммутационных интервалов. Тензоры преобразования в этом случае будут представлять собой единичные матрицы, а следовательно конечные выражения для определения искомых величин сохраняют свой вид. Согласно специфике коммутационных процессов меняются начальные условия, а в матрице Z компонента Z_{77} становится равной нулю. В схемах СПП1, СПП2 выражение для времени коммутации в функции тока нагрузки будет иметь следующий вид

$$t_k = t_k'' = \frac{L_p}{MU} \frac{A'}{[2L_h + L_s(1-ks) + L_g]} I_h.$$

В большинстве практических использований СПП индуктивность СПМ на несколько порядков превышает индуктивность вторичной обмотки СП трансформатора и клапана криотрона, поэтому при анализе процессов в СПП проводилась редукция решений путем исключения слагаемых низшего порядка, что позволило использовать полученные выражения для инженерных расчетов.

Третья глава посвящена режимам работы КОСМП и алгоритмам управления СПП. Под режимом работы КОСМП подразумевается совокупность электромагнитных процессов, протекающих в контурах СП нагрузки и цепях питания СПП, определяемая заданным алгоритмом работы комплекса. При этом под алгоритмом работы КОСМП понимается последовательность подачи импульсов питания, вырабатываемых системой управления на элементы СПП, их продолжительность, форма и законы регулирования. При работе КОСМП в режимах ввода (вывода) энергии СПМ временной интервал рабочего цикла рассматривается как сумма входящих в него временных интервалов. Временной интервал ввода используется непосредственно для передачи энергии от внешнего источника энергии в контур СП нагрузки. Изменяя его длительность можно регулировать величину прибавки энергии в СП нагрузке за один рабочий цикл. Интервал коммутации служит для перевода тока из одного контура СПП в другой. Его длительность является функцией тока, накопленного в СП нагрузке к моменту коммутации, и отражает величину энергии, затрачиваемую на коммутацию. Временные интервалы пауз необходимы для перевода криотронов в резистивное и сверхпроводящее состояние. Изменение энергии в СП нагрузке за один рабочий цикл рассматривается как разность энергии, введенной в контур СП нагрузки за внекоммутационный интервал времени, и энергии, выведенной из контура СП нагрузки в процессе коммутации. Процесс накопления энергии в СП нагрузке носит ступенчатый характер, а количество энергии, запасенной в СП нагрузке, зависит от числа циклов работы СПП. Основное назначение режимов вывода энергии СПМ - эвакуация энергии, накопленной в магнитном поле СПМ; регулирование величины тока обмотки СПМ; ускорение установления тока, когда после запитки, перед переводом СПМ в режим "замороженного потока" требуется на несколько процентов снизить величину тока в его обмотке. В работе рассматривается автономный режим вывода с использованием способа коммутации сопротивлением; режим вывода энергии с использованием способа коммутации сопротивлением и изменением фазы импульсов управления на 180° по отношению к режиму ввода; режим вывода энергии с использованием способа коммутации ЭДС. Получены соотношения для величин убавки энергии за один рабочий цикл и тока СП нагрузки.

Разработке системы управления предшествует выбор алгоритма управления СПП. В работе рассматриваются алгоритмы, соответствующие варианту регулирования коммутации ЭДС изменением продолжительности интервала коммутации при неизменной амплитуде напряжения на первичной обмотке СП трансформаторов. Известные к настоящему времени алгоритмы можно разделить на две группы: с постоянной рабочей частотой КОСМП ($f_{\text{II}} = \text{const}$) и

частотой, изменяемой в процессе работы комплекса ($f_{\text{II}} - \text{var}$). В последнем случае частота работы КОСМП является функцией тока СП нагрузки. Возможны варианты регулирования с неизменными и изменяемыми в процессе работы амплитудами токов первичных обмоток СП трансформаторов. Сочетание этих параметров определяет вид алгоритма. В работе также исследованы сочетания схемных решений СП с алгоритмами их управления. Эти сочетания могут отличаться между собой степенью влияния на технико-экономические показатели КОСМП, надежность его работы и выходные характеристики. Их выбор обусловлен требованиями, предъявляемыми СП нагрузкой к КОСМП, а также характеристиками и назначением всего комплекса. В работе определены два наиболее эффективных сочетания схемных решений СП с алгоритмами их управления. Показано влияние этих сочетаний на выходные характеристики КОСМП.

В четвертой главе приведены результаты разработки элементов и блоков КОСМП, а также их экспериментальное исследование. Для лабораторной модели и мелкосерийного образцов КОСМП использовались криотроны с тепловым управлением, клапаны у которых выполнены на основе одножильного ниобий-титанового провода в медной матрице диаметр m 0,33 мм. Величина критического тока клапана в нулевом магнитном поле составляла 245 А. На рис.4 приведен общий вид конструкции лабораторной модели СП. При ее разработке учитывалось, что взаимное расположение отдельных элементов, а также тип используемых материалов не только оказывают существенное влияние на его параметры, но и во многих случаях могут влиять на его работоспособность. Для исследования распределения результирующего магнитного поля и его влияния на величину критического тока элементов СП пространство вокруг конструкции условно разделялось на ряд цилиндрических поверхностей и отсекалось по вертикали в плоскости максимального сечения. Плоскость сечения разбивалась на квадраты со стороной в 1 см и в них записывались компоненты матрицы величины индукции результирующего магнитного поля. Исследования показали, что величина критического тока клапанов криотронов в продольном поле с индукцией 1 Тл снижалась приблизительно на 10%. Общий вид серийного образца СП приведен на рис.5. Все элементы СП и блок защиты установлены на пластине из нержавеющей стали, которая через переходные кронштейны укреплена на СП магните.

Для управления работой лабораторной модели СП разработана система управления на базе мостового инвертора напряжения (А.с. СССР №1531779), которая выполняет следующие функции: обеспечивает питание первичной обмотки СП трансформатора прямоугольными импульсами напряжения с заданной амплитудой и частотой; выполняет алгоритмы включения и выключения СП;

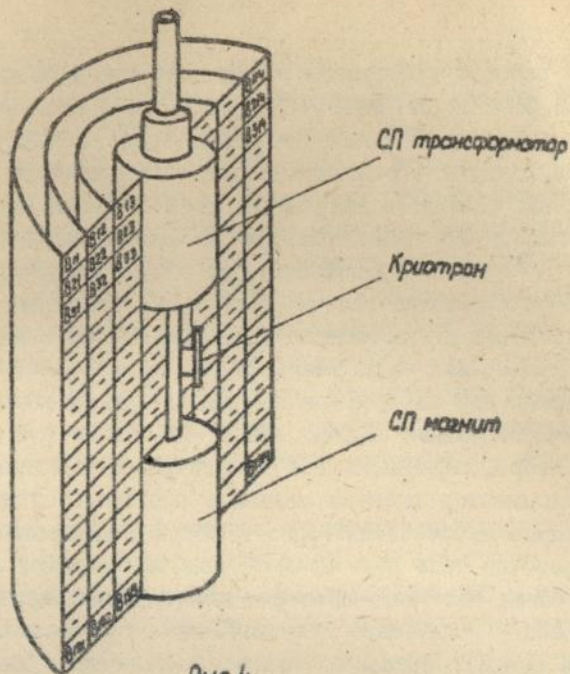


Рис. 4

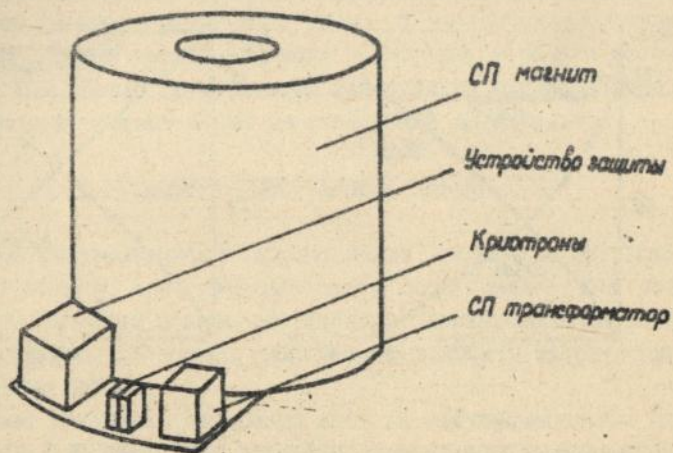


Рис. 5

управляет работой криотронов в процессе ввода-вывода энергии СПМ. Для управления работой серийного СПП разработана система управления на базе мощного операционного усилителя (Полож. реш. №4810312/07 от 29.08.91г.), содержащая следующие основные блоки: стабилизатор тока датчика Холла; измерительный усилитель напряжения датчика Холла; блок анализа тока первичной обмотки СП трансформатора на равенство нулю; выходной драйвер первичной обмотки СП трансформатора; блок формирования зависимости $t_K = f(U_{ДХ})$; блок алгоритма работы; блок пуска-останова; блок выходных драйверов нагревателей криотронов; пульт управления и индикации.

Для проведения экспериментальных исследований лабораторного и серийного КОСМП был разработан контрольно-измерительный стенд, включающий в себя вычислительные машины МЕРА 660 и СМ 1300, анализатор спектра (Брюль и Кьер), содержащий два самописца, блок оперативной памяти и собственно анализатор спектра сигналов произвольной формы. Криостат типа КГ-150 подключается стационарно к общей магистрали сбора газообразного гелия. Криостат типа КГ-7 по мере надобности может передвигаться по помещению. Стенд содержит также ряд измерительных приборов и вспомогательных устройств, количество и назначение которых зависит от цели эксперимента. На рис.6,7 приведены экспериментальные кривые ввода-вывода тока обмотки СПМ, а также "замороженного потока" для лабораторного и серийного КОСМП.

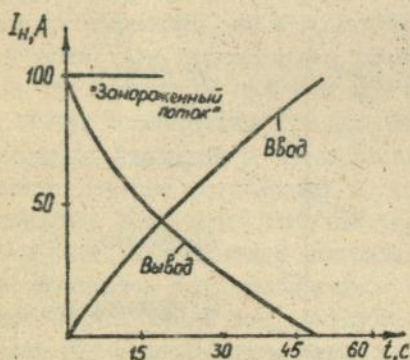


рис.6

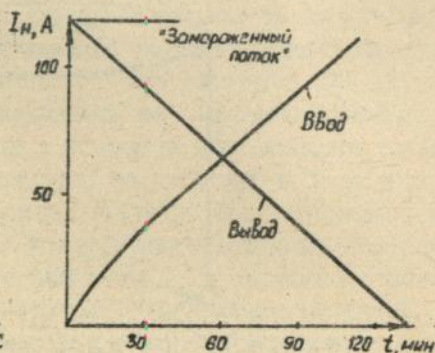


рис.7

Пятая глава посвящена разработке, изготовлению и исследованию высокотемпературного СПП. Для ВТСП криотронов, изготовленных из керамики Y-Ba-Cu-O характерны невысокие значения критических параметров (при 77К). Как показали исследования ВТСП криотронов, магнитное управление

здесь осуществляется в микросекундном диапазоне, а тепловое - в миллисекундном. Затраты энергии на магнитное управление ниже, чем на тепловое. Наиболее важным параметром ВТСП ключей является критическая плотность тока (I_c). Контакты являются одним из факторов, существенно снижающих I_c . При этом мощность, выделяющаяся на контактах, снижает энергетические показатели СПП. В работе исследуются вольт-амперные характеристики серебрянных контактов к керамике I-Ba-Cu-O и степень их влияния на величину критического тока образцов ВТСП криотронов. Использование керамических ВТСП материалов накладывает свои особенности на изготовление СП трансформаторов. Известны способы изготовления ВТСП трансформаторов и СПМ небольшой индуктивности путем проточки керамических цилиндров по спирали. Однако такие катушки недостаточно прочны. Предложена конструкция ВТСП плоского керамического трансформатора, обладающего достаточными прочностными свойствами.

В работе рассматриваются три способа изготовления высокотемпературных СПП из объемных керамических сверхпроводников: изготовление СПП путем соединений из отдельных элементов; выпрессовывание СПП в виде законченной конструкции; выпрессовывание СПП в виде полуфабриката и последующей доработки конструкции путем механической обработки. Конструкция СПП, исследуемого в диссертационной работе, изготавливалась с помощью третьего способа. Перед ее изготовлением проводились контрольные испытания отдельных элементов из ВТСП керамики, исследовалась степень влияния на их характеристики внешнего магнитного поля. С учетом результатов этих испытаний и распределения магнитного поля по образцу керамики рассчитывалась конструкция СПП. После изготовления конструкция высокотемпературного СПП испытывалась в составе КОСМП на стенде ИПЭ АН Украины.

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Выполнены систематические исследования свойств и закономерностей, присущих комплексу электротехнического оборудования для создания сильных магнитных полей на основе статических сверхпроводниковых преобразователей электрической энергии, разработаны элементы теории, принципы построения и расчета КОСМП.

2. Предложена методика тензорного анализа электромагнитных процессов, протекающих в контурах СПП. Расчет согласно этой методике сводится к построению обобщенной модели СПП, которая рассматривается как тензор, а модели исследуемых СПП рассматриваются как проекции тензора в частных системах координат. Это дает возможность использовать стереотипные вычис-

лительные операции для каждой схемы исследуемых СПП, что позволяет описать электромагнитные процессы, протекающие в контурах СПП формально сходными соотношениями и, тем самым снизить трудоемкость вычислительных операций.

3. По результатам исследования известных схем и конструкций КОСМП выделены четыре схемы двухполупериодных СПП, составляющих основу комплекса, способного длительное время функционировать с минимальной диссипацией энергии в криогенной зоне, получены упрощенные соотношения и определен частотный диапазон их использования, что дает возможность применять эти соотношения для инженерных расчетов блоков КОСМП.

4. Систематизированы алгоритмы управления СПП при условии неизменности амплитуды импульсов напряжения, действующего в цепях первичных обмоток СП трансформаторов. Из многообразия алгоритмов управления выделены шесть, отличающиеся между собой степенью влияния на выходные характеристики и технико-экономические показатели КОСМП, что при проектировании комплекса позволило сузить круг решаемых задач. Определены наиболее эффективные сочетания схемных решений СПП с алгоритмами их управления с точки зрения помехоустойчивости и снижения времени ввода тока в обмотку СПП, позволяющие непосредственно использовать их при разработке КОСМП с улучшенными энергетическими показателями.

5. Предложены новые схемные и конструктивные решения элементов и блоков, входящих в КОСМП, которые использовались при разработке и конструировании КОСМП на основе низкотемпературных СПП, способных функционировать в условиях сильных магнитных полей. Предложены конструктивные решения элементов высокотемпературного СПП, позволяющие повысить его энергетическую эффективность и прочностные показатели. Проведены экспериментальные исследования вольт-амперных характеристик серебряных контактов к ВСП керамике, изготовленной из материала Y-Ba-Cu-O методом твердофазных реакций и определено их влияние на величину критического тока криотронов.

6. Разработана и изготовлена малая серия КОСМП (7шт.). Эффективность разработанных устройств подтверждена новыми научными и практическими результатами, полученными от их использования при выполнении ряда государственных и хозяйственных тем. Основные узлы и блоки КОСМП защищены авторскими свидетельствами на изобретения.

Основные публикации по теме диссертации:

1. Токаль В.Е., Новосельцев А.В., Налогодьеv С.В., Самулевич И.В., Засильев А.В. Оптимизация сверхпроводящих преобразовательных систем //

Проблемы преобразовательной техники: Тез. докл. IV Всесоюз. научн.-техн. конф., Чернигов, сент. 1987 г.-Киев, 1987.-Ч. 4.-С. 227-229.

2. Непогодьеv С.В., Самулевич И.В. Совершенствование систем защиты сверхпроводящих электромагнитных устройств // Проблемы преобразовательной техники: Тез. докл. IV Всесоюз. научн.-техн. конф., Чернигов, сент. 1987 г.-Киев, 1987.-Ч. 5.-С. 175-177.

3. Сизоненко В.П., Непогодьеv С.В. Математическая модель сверхпроводникового индуктивного преобразователя // Проблемы нелинейной электротехники: Тез. докл. III Всесоюз. научн.-техн. конф., Черкассы, сент. 1988 г.-Киев, 1988.-Ч. 3.-С. 25-27.

4. Новосельцев А.В., Скобарихин Ю.В., Непогодьеv С.В. Анализ инверторных режимов работы сверхпроводникового преобразователя // Техн. электродинамика.-1989.-№1.-С. 35-40.

5. Непогодьеv С.В., Скобарихин Ю.В., Кузьмин А.В., Кодрянский В.М. Снижение времени ввода тока в обмотку сверхпроводникового магнита // Силовые полупроводниковые преобразователи и электрооборудование для энергосберегающих технологий.-Киев: Наук. думка, 1988.-С. 163-169.

6. Чернавский Ю.П., Непогодьеv С.В. Распределение тока по параллельно включенным сверхпроводниковым цепям.-Киев, 1988.-24с.- (Препр./АН УССР. Ин-т электродинамики; №11).

7. Тонкаль В.Е., Новосельцев А.В., Скобарихин Ю.В., Кузьмин А.В., Непогодьеv С.В. Принципы построения сверхпроводниковых преобразовательных систем.-Киев, 1988.-49 с.- (Препр./АН УССР. Ин-т электродинамики; №12).

8. Тонкаль В.Е., Новосельцев А.В., Васильев А.В., Васильев В.В., Непогодьеv С.В., Кодрянский В.М. Система автоматизации исследования сверхпроводниковых преобразователей энергии // Комплексная автоматизация промышленности: Тез. докл. III Польско-советской научн.-техн. конф., Вроцлав, 1988.-Ч.3.-С.270-274.

9. Тонкаль В.Е., Новосельцев А.В., Скобарихин Ю.В., Непогодьеv С.В. Введение в теорию статических сверхпроводниковых преобразователей.-Киев. Наук. думка, 1990.- 180 с.

10. Непогодьеv С.В., Бурчак О.Т. Энергетически эффективный сверхпроводниковый преобразователь // Энергосбережение и проблемы сверхпроводимости.-Киев: Наук. думка, 1990.-С.27-32.

11. Непогодьеv С.В., Новосельцев А.В., Клепов Ю.М., Скобарихин Ю.В., Моисеев Д.П. Особенности построения высокотемпературных сверхпроводниковых преобразователей // Высокотемпературная сверхпроводимость.- Москва: ВИИИ, 1990, №2, С.91-98.

12. Кузьмин А.В., Чернавский Ю.П., Непогодьев С.В. Определение потерь энергии в сверхпроводниковых устройствах // Техн. электродинамика.-1990.-№2.-С.27-32.

13. Непогодьев С.В., Васильев А.П. ВТСП керамический плоский трансформатор // Энергосбережение и проблемы сверхпроводимости: Тез. докл. Всесоюз. научн.-техн. семинара, Яремча, окт., 1990.-С.12.

14. Скобарихин Ю.В., Непогодьев С.В. Принципы построения рабочих алгоритмов двухполупериодного сверхпроводящего преобразователя // Техн. электродинамика.-1991.-№5.-С.31-36.

15. Непогодьев С.В. Тензорный анализ электромагнитных процессов в статических сверхпроводниковых преобразователях // Проблемы преобразовательной техники: Тез. докл. V Всесоюз. научн.-техн. конф., Чернигов, сент. 1991, г.Киев, 1991.-Ч.3.-С. 116-118.

16. Верлань А.А., Непогодьев С.В. Проблемы разработки силовых криотронов ВТСП преобразователей // Проблемы преобразовательной техники: Тез. докл. V Всесоюз. научн.-техн. конф., Чернигов, сент.1991.-Ч.5.-С.175-177.

17. Башкиров А.А., Скобарихин Ю.В., Чернавский Ю.П., Иванов В.М., Новосельцев А.В., Непогодьев С.В. Криотронные преобразователи для питания сверхпроводящих магнитов // Магнитная технология: Тез. докл. Международ. научн.-техн. конф., Ленинград, июнь, 1991, С.140-144.

18. Тонкаль В.Е., Новосельцев А.В., Бурчак О.Т., Скобарихин Ю.В., Непогодьев С.В. Сверхпроводниковые преобразователи для питания СП магнитов // Комплексные проблемы сверхпроводимости: Тез. докл. Международ. научн.-техн. конф., Киев, июнь, 1992 г.-С.83.

19. Bashkirov Yu.A., Skobarikhin Yu.V., Chernavski Yu.P., Ivanov V.M., Novoseltsev A.V., Nepogodyev S.V. Cryotron converters for the supply of superconducting magnet windings // IEEE Trans. on Magn.- 1992.-28, №1.-P. 422-425.

Личный вклад автора в работах опубликованных в соавторстве, состоит в следующем: (1,7) - исследованы свойства сверхпроводящих преобразовательных систем; (2) - предложено устройство защиты, функционирующее в условиях влияния помех; (3,8) - построена эквивалентная схема замещения КОСМП на основе двухполупериодного СПИ; (4) - рассмотрен автономный режим вывода; (5) - предложено использование корректирующих устройств; (6,12,14) - экспериментальное подтверждение теретических положений; (9) - написаны глава 3, параграфы 2.2, 2.4, 5.3; (10,11,13,16) - предложены конструкции отдельных элементов и СПИ; (17-19) - исследование отдельных элементов КОСМП.

Создатель

Подписано к печати 27.10.92

Формат 60x84/16

Бумага офсетная №2. Усл. печ. л. I.O. Усл.-кр. отт. I.O

Уч.-изд. л. I.O. Тираж 150 экз. Заказ № 58 . Бесплатно.

Институт проблем энергосбережения АН Украины

252070, Киев-70, ул. Покровская, II.

Полиграфический участок

Института проблем энергосбережения АН Украины

252070, Киев- 70, ул. Покровская, II

469 839

AB 26.408

AB 26.408