

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

На правах рукописи

ВЕРЛАНЬ Андрей Анатольевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ
СИСТЕМ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ВВОДА-ВЫВОДА
ЭНЕРГИИ СВЕРХПРОВОДНИКОВОГО НАКОПИТЕЛЯ

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой с. дени
кандидата технических наук

Киев - 1993

AB 28.216

Работа выполнена в Институте проблем энергосбережения АН Украины.

Научный руководитель:

- доктор технических наук,
заведующий лабораторией
НОВОСЕЛЫЦЕВ А.В.

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук,
профессор
СТЕНАНОВ А.Е.
- кандидат технических наук,
заведующая лабораторией
СЕМАГУЧА Э.П.

Ведущая организация:

- Институт электродинамики
Академии наук Украины

Защита диссертации состоится "18" октября 1993 г.
в _____ часов на заседании специализированного совета К 016.63.01
при Институте проблем энергосбережения АН Украины по адресу:
254070 Киев 70, ул. Покровская, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "8" октября 1993 г.

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00810631 (J)

Учений секретарь
спеціалізованого совета
канд. техн. наук

Григорук

Р.П.П.Н.В.

ЛННБ ім. В. Стефаніка
АН України

В-28.216

3

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Развитие криогенной техники, создание высокотемпературных сверхпроводниковых (СП) материалов, разработка устройств, использующих явление сверхпроводимости, создают реальные предпосылки для широкого практического освоения СП энергетических устройств. Актуальность применения СП устройств в энергосберегающих технологиях обусловлена рядом их специфических преимуществ, таких как: отсутствие электрического сопротивления; высокие уровни критических токов и магнитных полей; идеальные экранрующие свойства; фазовый переход, вентовые эффекты и др. Использование 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 (томографы), физика элементарных частиц (СП ускорители), горнодобывающая промышленность (магнитные сепараторы) позволяет увеличить эффективность производства и снижать затраты электроэнергии. Использование сверхпроводимости в первую очередь целесообразно в качестве новых образцов техники, которые не могут быть созданы на полупроводниковых элементах. В области энергетике - это устройства на базе СП накопителей, основное экономическое преимущество применения которых - отсутствие активных потерь в материале обмотки и резкое снижение энергозатрат на их запитку.

Одной из актуальных задач, связанной с созданием СП накопителей и, в частности, магнитов постоянного тока, является разработка систем их энергообеспечения. Среди известных устройств такого рода наиболее экономичными являются статические сверхпроводниковые преобразовательные системы (СППС), основанные на принципе "насоса потока", для ввода, вывода, хранения, регулирования и стабилизации параметров электромагнитной энергии СП накопителя. Структурно СППС состоят из полупроводниковых (ПП) и СП подсистем, подсистем криостатирования и рефрижерации блоков защиты, контрольно-измерительных устройств, обеспечивающих поддержание параметров системы в заданных пределах.

В целом СППС представляет собой сложный комплекс, часть блоков и элементов которого расположена в области нормальных температур, а часть - в низкотемпературной (криогенной) зоне. Эффективность работы криогенной подсистемы оказывает решающее влияние на энергетическую эффективность всего комплекса, поскольку удельные рефрижераторные затраты энергии на компенсацию I R_т потерь в криогенной зоне (СП подсистема) составляют 400-1500 Вт в нормальной зоне (ПП подсистема). Поэтому крайне важно, включая оценку тепловых потерь в системе и разработку методов их

минимизации, являе^тся одним из наиболее действенных способов повышения эффективности такого рода систем.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планами НИР Кабинета министров, ГКНТ и АН Украины по комплексным проблемам "Научные основы электроэнергетики", "Научные основы энергосбережения" по темам "Криотрон" (1985-1987гг., Пост.ГКНТ №464 от 05.09.85г., ЖГос. регистр. 01.86.0032911), "Трембита" (1989-1990гг., Пост.ГКНТ №27 от 20.07.88, ЖГос.регистр.01.89.0024480), "Доминанта-2 (1988-1991гг. Пост. Президиума АН Украины №402 от 11.1287г. ЖГос.регистр. 01.88.0019095).

Целью диссертационной работы является улучшение энергетических и динамических показателей электротехнических систем ввода-вывода энергии сверхпроводниковых накопителей путем исследования взаимосвязи электрических и тепловых режимов работы и управления ее полупроводниковой и сверхпроводниковой подсистем и рационального выбора на этой основе параметров конструкции и управления ключевыми элементами системы.

Поставленная цель потребовала решения следующих основных задач:

- адаптация существующих методов и способов повышения энергетической эффективности электротехнических систем в условиях СП состояния материалов отдельных подсистем и элементов;
- разработка экспериментального стенда, методики и пакета программ для определения мощности тепловых потерь в элементах СП подсистемы;
- анализ составляющих потерь и методов их регистрации в СП подсистеме СППС;
- экспериментальное определение параметров теплового управления криотронами - силовыми вентиляльными элементами СП подсистемы СППС;
- разработка математической модели режима теплового управления СППС с учетом взаимосвязи электрических, тепловых и конструктивных параметров криотронов;
- экспериментальная проверка и внедрение полученных результатов.

Методы исследования. При решении поставленной задачи использовались элементы теории электротехнических систем с СП и СП управляемыми вентилями, элементы теории статических СП преобразователей, calorиметрические методы измерения тепловых величин в такого рода системах, методы конечных разностей решения нестационарных задач теплопроводности.

Автор записывает следующие научные и практические результаты работы: 1. Методику повышения энергетической эффективности СППС и разработанный для этой цели экспериментальный стенд. 2. Основные закономерности, полученные в результате экспериментального исследования режимов теплового управления СППС. 3. Результаты математического моделирования нестационар-

ных режимов работы криотронов. 4. Результаты сопоставительного анализа различных конструкций и режимов теплового управления СППС.

Научная новизна. 1. Разработана оригинальная модель и на ее основе создана методика, позволяющая уменьшить энергетические потери в электротехнических системах ввода-вывода энергии с ПП и СП вентилями (криотронами) за счет снижения потерь от обратного тока вентиляей и учета специфики несинусоидальных режимов работы СППС. 2. Проведены исследования режимов теплового управления СППС с криотронами цилиндрического типа, получены экспериментальные зависимости интенсивности теплового потока с единицы длины и единицы поверхности криотронов от температуры, определены коэффициенты теплоотдачи. 3. Предложена оценочная модель, учитывающая дополнительные потери в СП подсистеме, вызванные отклонением формы управляющих импульсов, получены оригинальные зависимости времени восстановления (выключения) криотронов от величин тока удержания и тока помехи, установлена их взаимосвязь с динамическими показателями СППС, в том числе со скоростью ввода энергии в накопитель. 4. Разработана оригинальная математическая модель режима теплового управления процессами ввода-вывода энергии СППС, отличающаяся использованием эмпирических зависимостей, полученных в стационарном режиме работы криотронов, проведен численно-аналитический расчет нестационарных режимов работы СППС связывающий электрические, тепловые и конструктивные параметры криотронов с показателями эффективности функционирования СППС.

Практическая ценность работы. Проведенные в работе исследования позволили: разработать и создать оригинальный измерительный стенд для оперативной оценки энергетических потерь в силовых вентильных элементах ПП подсистемы СППС и тем самым определить взаимосвязь их электрических и тепловых параметров в условиях динамических режимов работы СППС; на основе разработанной оригинальной методики оценки энергетических потерь в ПП подсистеме выработать рекомендации по обоснованному подбору ее элементов и режимов их работы и управления по критерию минимума энергетических потерь в СППС; экспериментальным путем определить зависимости электрических параметров от температуры для используемых в СППС цилиндрических криотронов с тепловым управлением; на основе разработанной модели нестационарного режима теплового управления криотронами за полную цикл работы СППС получить распределение полей температур по поверхности криотронов в заданные моменты времени и изменения температуры криотронов за время цикла и тем самым определить время восстановления (выключения) криотронов, провести сопоставительный анализ разработанных образцов криотронов, установить их конструктивные параметры и режимы управления, обеспечивающие улучшенные энергетические и динамические

показатели работы СПС.

Реализация результатов работы. Теоретические положения и практические результаты диссертационной работы положены в основу ряда разработок, выполненных при участии автора в 1985-1992 гг. по х/д с заинтересованными организациями и предприятиями: ПО1.83389-3П73/959-89 (г.Запорожье, п/я А-7952), №225-89 (г.Горький, п/я В-2194), №605-88, 607-90 (г.Москва, ЭНИИ), №5.53.08/143-92 (г.Кривой Рог, Механобрчермет). Всего по теме диссертация имеет 4 акта внедрения результатов НИР.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на IV Всесоюзной н/т конференции "Проблемы преобразовательной техники", г.Киев(1987г.); III Всесоюзной н/т конференции "Проблемы нелинейной электротехники" (1988г.); Всесоюзном семинаре "Энергоэкономия и проблемы сверхпроводимости", г.Яремча (1990г.); V Всесоюзной н/т конференции "Проблемы преобразовательной техники", г. Чернигов(1991г.).

Публикации. По результатам работы опубликованы 3 статьи, 1 препринт, 4 тезиса докладов, получено положительное решение по заявке на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и содержит 14 страниц основного машинописного текста, 11 таблиц, 74 рисунка, а также 30 страниц приложения.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, определена цель работы, сформулированы научная новизна и практическая ценность, освещены основные результаты диссертации, ее апробация, публикации и структура.

Первая глава посвящена обзору, классификации и сопоставительному анализу электротехнических систем (ЭС) ввода-вывода энергии СП накопителя, особенностям построения и функционирования СПС, постановке задачи комплексного исследования электромагнитных и тепловых процессов в СПС с целью улучшения их энергетических и динамических показателей.

ЭС для питания СП накопителей, и в частности магнитов постоянного тока, подразделяются на две группы: расположенные в "теплой" зоне ("прямой ввод") и расположенные в криогенной зоне при температуре, обеспечивающей СП состоящие материалов и элементов. Системы "прямого ввода" содержат многоамперный источник питания и токовводы большого сечения. Они обладают наибольшей мощностью, однако характеризуются низкой экономичностью ввиду значительных затрат на компенсацию потерь в криогенной

зоне от теплопритоков по тоководам. Ко второй группе относятся системы типа "насосов потока" — топологические генераторы и ЭТО со статическими СП преобразователями (СПП). Проведенный анализ различных типов систем ввода-вывода энергии СП накопителя показал, что наиболее экономичными являются ЭТО типа "насосов потока" с применением СПП (СППС), имеющие такие преимущества, как наличие тоководов малого сечения, отсутствие механически подвижных частей, реализация режима непрерывной стабилизации тока СП накопителя, быстродействующая система аварийного вывода энергии, высокий КПД в криогенной зоне. Однако возникающие в СППС дополнительные потери в СП вентилях (криотронах), составляющие до 80% суммарных потерь в системе, могут сравниться с потерями ввода. Кроме того, скорость ввода-вывода тока в СП накопитель (0,1-30 Гц) ограничивается временем переключения (восстановления) теплоуправляемых криотронов и определяется протекающими в криотронах тепловыми процессами. Влияние температуры как одного из основных дестабилизирующих факторов, определяющих энергетические и динамические показатели ЭТО, особо существенно в системах типа СППС, поскольку на компенсации 1 Вт потерь в СП подсистеме, находящейся в зоне высоких температур, необходимо затратить на 2-3 порядка больше энергии в подсистеме, расположенной в "теплой зоне". В то же время вопрос анализа электрических и тепловых режимов элементов и устройств СППС до сих пор решался отдельно, без учета их взаимосвязи.

В работе поставлена задача комплексного исследования электромагнитных и тепловых процессов в структурных единицах СППС, включающая разработку методов определения их тепловых характеристик и установление их взаимосвязи с электромагнитными параметрами, что позволило определить способы снижения энергетических потерь в структурах с наибольшим тепловыделением и улучшить их динамические показатели.

Описана структура СППС и ее основные подсистемы (рис.1): ПП и СП преобразовательные, подсистема криостатирования и рефрижерации (ПРС). Нагрузкой СППС является СП-вентильная система (СПВС).

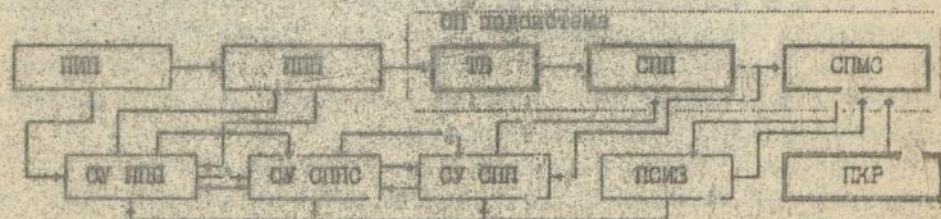


Рис. 1

На ПРС подсистему (ПРС) возлагается функция преобразования и регули-

рования переменного напряжения (тока), а на СП подсистему - создание в обмотке СП Э тока с постоянной составляющей определенной полярности. При этом ток в СПМС вводится (выводится) небольшими порциями за относительно длительный временной промежуток до уровня, определяемого количеством циклов запитки. Приведена классификация СППС по четырем основным признакам: схеме преобразования, способу коммутации, характеру электромагнитных процессов, способу управления. Силовой блок ППС выполнен по схеме ПП преобразователя с промежуточным преобразованием переменного тока в постоянный с последующим его инвертированием. ПКР включает в себя совокупность ключенного оборудования для обеспечения заданного температурного режима работы СППС, а также сбора паров хладагента, ожижения и повторного их использования. Подсистема измерения и защиты (ПСИЗ) обеспечивает «аварийную» работу СППС, осуществляет контроль за функционированием СП элементов, защищает СППС и СПМС от разрушения при потере сверхпроводящего состояния.

Раскрыта специфика организации и функционирования СП подсистемы, обеспечивающей преобразование (выпрямление) силового сигнала от ППС, а также ввод-вывод энергии в СП нагрузку. Выпрямление осуществляет СП преобразователь (СПП), большинство используемых схем которого аналогичны схемам традиционных ПП выпрямителей, в которых ПП вентильные элементы заменены СП ключами (криотронами). Приведена классификация СПП по типам схем выпрямления и способам коммутации токов в контурах вторичной обмотки СП трансформатора (СТ) СПП. Описаны преимущества и алгоритмы работы исследуемой СППС с двухполупериодной схемой выпрямления со средней точкой с использованием режима коммутации ЭДС. Каждый период работы СППС включает два цикла с продолжительностью каждого $t_{\text{ц}} = (2f)^{-1}$. На интервалах цикла имеют место внекоммутационный и коммутационный процессы, а также паузы для переключения криотронов.

Вторая глава посвящена методам аналитического расчета и минимизации энергетических потерь в элементах ППС. Показано, что влияние тепловых процессов на параметры элементов и показатели работы ППС является существенным, требующим разработки оригинальных моделей элементов с учетом фактора потерь. Приведены методики расчета тепловых потерь в конденсаторном оборудовании и индуктивных элементах.

Показано, что одним из факторов, определяющих показатели качества и надежности ППС, является тепловой режим силового ПП прибора, на который приходится основная доля потерь в подсистеме. Нагрев вызывает изменение характеристик прибора, в частности рост прямых и обратных токов в закрытом состоянии, токов утечки и времени выключения, снижение управляющих токов и напряжений, уменьшение помехоустойчивости и критической

скорости нарастания напряжения в закрытом состоянии. На основании анализа термоэлектрического взаимодействия в силовых приборах ППС и учета таких факторов, как температурная зависимость ВАХ приборов, динамическая теплостойкость, кумуляция энергии и "шнурованн" тока, ставится и решается задача создания аппарата расчета потерь энергии в рассматриваемых элементах ППС, анализа допустимых режимов ее работы и управления с учетом взаимосвязи электромагнитных и тепловых процессов. Приведено описание разработанной методики аналитического расчета суммарной мощности потерь в силовых ПП приборах с учетом замены импульса мощности произвольной формы эквивалентным импульсом прямоугольной формы.

Пренебрегая потерями от токов утечки и в цепи управления ввиду их малости, суммарная мощность потерь определяется как

$$P_c = P_{вкл} + P_{выкл} + P_{уст} + P_{осн}, \quad (I)$$

где $P_{вкл}$, $P_{выкл}$, $P_{уст}$ - мощности потерь на этапах включения, установления и выключения; $P_{осн}$ - мощность основных потерь, значение которой определяет нагрев структуры при заданном среднем токе.

Приведено описание пакета программ расчета энергетических потерь в элементах ППС в соответствии с разработанной методикой, включающего подпрограммы расчета потерь в конденсаторах и дросселях. Исходными данными пакета являются тип элемента, справочные параметры, а также функции токов и напряжений элементов, заданные таблично или функциональными зависимостями в установившемся режиме. Выходными данными является величина энергии, выделяемой в виде тепла, для каждого элемента ППС, а также суммарная энергия потерь за период во всей подсистеме.

Третья глава посвящена разработке экспериментального метода оценки энергетических потерь в силовых элементах ППС и установления взаимосвязи их электрических и тепловых параметров. Показана затрудненность теоретических расчетов тепловых режимов силовых ПП приборов вследствие сложной формы импульсов энергии, рассеиваемой в рабочем переходе и нестационарного характера протекающих в приборах теплофизических процессов, а также погрешность расчетов из-за необходимости введения упрощений, основана целесообразность применения оперативных экспериментальных методов определения тепловых параметров исследуемых приборов. На основании проведенного сопоставительного анализа существующих (электрических и термических) методов измерения потерь в силовых ПП приборах в качестве оптимального предложен метод, основанный на сравнении величины потерь в идентичных эталонном и исследуемом приборах при рассеянии в них соответственно мощности постоянного и переменного тока заданной формы. Показано, что данный метод обладает рядом преимуществ: простота реализации,

оперативность получения результатов, отсутствие температурной погрешности, повышенная точность и расширенные функциональные возможности. В работе приведено описание разработанного на основе данного метода измерительного устройства на базе автоматического дифференциального калориметра, обеспечивающего измерение мощности потерь в диапазоне $5 \cdot 10^{-3} - 80$ Вт с погрешностью 6.5% и временем одного измерения не более 60 с.

Исходная формула для определения мощности потерь в силовом ПП приборе имеет вид

$$P_{\text{и}} = P_{\text{э}} \frac{t_{\text{в}}}{t_{\text{и}}} \quad (2)$$

где $P_{\text{и}}$ - мощность тепловых потерь в исследуемом приборе;

$P_{\text{э}}$ - известное значения мощности потерь в эталонном приборе;

$t_{\text{и}}$ и $t_{\text{э}}$ - интервалы времени нагрева исследуемого и эталонного приборов.

Показано, что использование данного устройства позволяет повысить точность измерений суммарной мощности потерь на 4-5% по сравнению с известными решениями за счет учета составляющей потерь от обратных токов приборов, расширить функциональные возможности путем задания несинусоидальных режимов работы исследуемых приборов, производить сравнительный анализ этих режимов по величине теплотерь. Приведены результаты измерений мощности потерь в различных типах силовых приборов ППС, проведенных с целью анализа влияния формы и частоты тока на величину потерь.

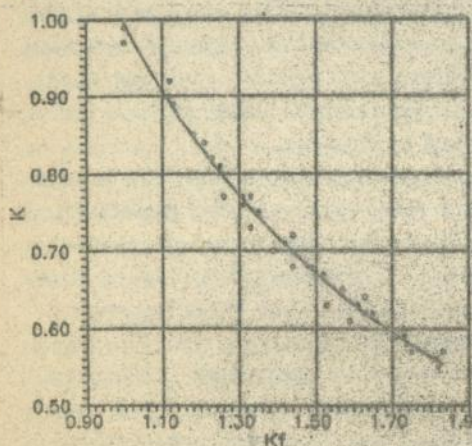


Рис. 2

В четвертой главе рассмотрены вопросы энергетической эффективности СП подсистемы, проведен анализ методов исследования тепловых режимов работы и управления, показана специфика высокотемпературных (ВТСП) подсистем. Показано, что потери энергии при работе СП подсистемы, оказывающей решающее воздействие на КПД системы и ее экономичность, обусловлены

выделением тепла при протекании тока различной частоты по СП цепям и цепям, имеющим резистивные участки (сопротивление криотрона в резистивном состоянии, спая и др.), а также гистерезисными потерями из-за дефектов СП материала. Приведен обзор калориметрических и электрических методов определения энергетических потерь в СП устройствах и системах, указаны их преимущества и недостатки.

Рассмотрены особенности проблемы оценки энергопотерь в СППС, устройства и элементы которых выполнены на основе ВТОН материалов. Предложена методика и на ее основе разработано измерительное устройство, в котором величина энергии тепловых потерь определяется по изменению уровня хладагента:

$$E(t) = E_{\Sigma}(t) - E_{\Phi}(t), \quad (3)$$

$$E_{\Sigma}(t) = \alpha \cdot S \cdot \sigma(t) \cdot (R(t) - R), \quad \alpha = \frac{\Delta l}{\Delta H},$$

где $E_{\Sigma}(t)$ - суммарные потери от времени; $E_{\Phi}(t)$ - величина фоновых потерь; l - высота уровня хладагента; S - площадь дна сосуда; R - сопротивление датчика уровня; $\sigma(t)$ - коэффициент теплового парообразования азота.

Применительно к низкотемпературным СППС приведен подробный анализ составляющих потерь и эффективности работы СП подсистемы. Для оценки эффективности определяется КПД СППС в криогенной зоне:

$$\eta_n = \frac{W_{\text{ин}}}{W_{\text{ин}} + \Sigma W_{\text{пн}}}, \quad W_{\text{ин}} = \frac{L_n \cdot (I_{\text{нн}})^2}{2}, \quad (4)$$

где $W_{\text{ин}}$ - энергия, запасенная в СП нагрузке за n циклов работы СППС;

$I_{\text{нн}}$ - ток в нагрузке в n -м цикле; L - индуктивность нагрузки;

$\Sigma W_{\text{пн}}$ - суммарные потери в криогенной зоне СППС за процесс запитки.

В общем случае суммарные потери в криогенной зоне за 1 цикл запитки содержат следующие основные составляющие:

$$\Sigma W_{\text{пн}} = \Sigma W_{\text{пнэ}} + \Sigma W_{\text{пнф}}, \quad (5)$$

где $\Sigma W_{\text{пнэ}}$ - электротехнические потери, связанные с функционированием СП подсистемы; $\Sigma W_{\text{пнф}}$ - фоновые потери, определяемые теплофизическими свойствами элементов конструкции криогенной части СППС.

Величина $\Sigma W_{\text{пнэ}}$ определяется как сумма составляющих:

$$\Sigma W_{\text{пнэ}} = W_{\text{к}} + W_{\text{кк}} + W_{\text{у}} + W_{\text{р}} + W_{\text{внхр}} + W_{\text{т}} + W_{\text{вибр}} + W_{\text{врез}} + W_{\text{пр}} \quad (6),$$

где $W_{\text{к}}$ - потери в клапанах криотронов от обратных токов; $W_{\text{кк}}$ - коммутационные потери в клапанах криотронов; $W_{\text{у}}$ - потери в элементах управления криотронов; $W_{\text{р}}$ - гистерезисные потери в обмотках СПТ; $W_{\text{внхр}}$ - потери от вихревых и вкранирующихся токов; $W_{\text{вибр}}$ - вибрационные потери; $W_{\text{врез}}$ - потери на стыках и спае криогенной части; $W_{\text{пр}}$ - прочие (неучтенные) потери.

Для СППС, работающей в режиме коммутации ЭДС, из всех видов потерь наиболее ощутимыми (порядка 80% от суммарной величины) являются потери W_R в криотронах, теплофизические свойства которых определяют такие их важнейшие характеристики, как ВАХ и время восстановления, от которых, в свою очередь, зависят величина минимального тока существования "нормальной зоны" (тока удержания) и длительность режима стабилизации тока. Показано, что тепловые свойства криотронов оказывают решающее воздействие на величину энергопотерь и динамические свойства СППС. Обоснована правомочность сведения задачи повышения эффективности СП подсистемы к задаче исследования теплофизических процессов в их взаимосвязи с электромагнитными для СП ключевых элементов.

Пятая глава посвящена исследованию режима теплового управления ключевыми элементами СП подсистемы, установлению зависимости их электрических, тепловых и конструктивных параметров. Рассмотрены конструктивные особенности применяемых в СППС криотронов, переключающий элемент (клапан) которого в зависимости от величины управляющего фактора принимает одно из двух стабильных состояний - сверхпроводящее или нормальное (резистивное). Раскрыта специфика магнито- и теплоуправляемых криотронов. Энергетические параметры применяемых криотронов находятся в диапазоне токов от десятков ампер до десятков килоампер, обеспечивая мощность ввода энергии в СП накопитель от долей до тысячи вольт-ампер.

Указана необходимость оценки и снижения времени восстановления t_R (времени перехода криотрона в СП состояние). Данный параметр, зависящий от теплофизических процессов в криотроне и параметров его конструкции, в свою очередь, определяет быстродействие ввода-вывода энергии СП накопителя. Показана неоднозначность задачи определения оптимальной конструкции криотронов с целью минимизации энергопотерь в СППС вследствие существования противоречия между данной задачей и задачей выбора параметров конструкции криотронов, отвечающих максимальному быстродействию СППС (минимальному значению t_R). Отмечена необходимость проведения сопоставительного анализа криотронов различной конструкции. Приведены результаты экспериментального и аналитического исследования характеристик образцов криотронов, выполненного в соответствии с поставленной задачей.

Лабораторный образец криотрона цилиндрического типа с тепловым управлением представляет собой отрезок СП проволоки из сплава Nb-Ti (клапан), на который бифилярно намотана управляющая нагревательная обмотка из манганина, покрытый слоем теплоизоляции. По составу теплоизоляции исследовались три типа криотронов: с изоляцией в виде хлопчатобумажно-ноклеявого слоя, с хлопчатобумажной и оксидной изоляциями. Для измерений тепловых параметров использовалась медь-константановая термоспара,

один спай которой находился в контакте с клапаном криотрона. Получена таблица-сетка измерений напряжений $U_{кр}$ на силовых выводах криотронов и напряжений $U_{тп}$ на выводах термопар при различных значениях транспортного тока $I_{тр}$ через криотрон и тока I_n нагревателя. Приведены экспериментальные зависимости $R(T)$ сопротивления клапанов от температуры (рис.3), необходимые для точного расчета энергии, выделяющейся в криотроне. По данным измерений построены оригинальные зависимости $Q(\Delta T)$ и $q(\Delta T)$ плотностей теплового потока с единицы длины и поверхности криотронов от разности температур криотронов и хладагента (рис.4).

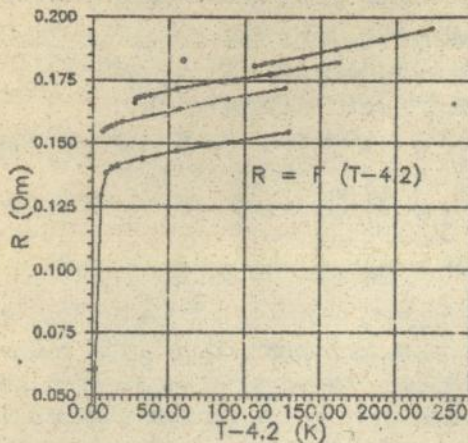


Рис.3

Определены коэффициенты теплоотдачи $\alpha = \frac{q}{\Delta T}$ исследуемых типов криотронов. Величины Q определены по формуле

$$Q = W_{кр} + W_n, \quad (6)$$

где $W_{кр}$ - мощность энергопотерь в криотроне от протекания тока $I_{тр}$; W_n - мощность, выделяющаяся в результате нагрева управляющей обмотки током I_n . Для единицы длины криотрона

$$W_{кр} = \frac{I_{тр}^2 R_{кр}}{l_{кр}}, \quad W_n = \rho \frac{l_n}{D_n} \pi (D_{кр} + D_n) (I_n)^2, \quad (7)$$

где $l_{кр}$ - длина клапана криотрона; ρ - удельное сопротивление нити нагревателя; D_n и $D_{кр}$ - диаметры нагревателя и клапана криотрона.

С целью определения параметра t разработана оценочная модель тепловых процессов в криотроне на основе аналитического решения уравнения теплового баланса с использованием экспериментальных данных.

Общее уравнение теплового баланса для криотрона имеет вид

$$W = W_n + W_{тр}, \quad (8)$$

где $W_{\text{вн}}$ - тепло, расходуемое на нагрев клапана $W_{\text{вн}} = C \frac{dT}{dt}$;
 $W_{\text{н}}$ - тепло, выделяемое в окружающую среду $W_{\text{н}} = Q(T) \approx \alpha T$.
 Здесь C - удельная теплоемкость единицы длины криотрона; α - коэффициент теплоотдачи, полученный экспериментально.

Таким образом, уравнение (8) приобретает вид

$$C \frac{dT}{dt} = W - \alpha T, \quad \alpha = \frac{\bar{\alpha}}{l} \quad (9)$$

Решением данного уравнения для единицы длины криотрона является

$$T(t) = \frac{W}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) + T_0 e^{-\alpha t}, \quad (10)$$

где T_0 - температура криотрона в момент времени $t=0$ начала остывания, определяемая из выражения для потерь от прохождения тока удержания $I_{\text{уд}}$ ($I_{\text{уд}}^2 R(T_0) = \bar{\alpha} T_0$ с использованием полученной зависимости $R(T)$).

Величина W определяется как $W = (I_{\text{уд}})^2 R + (I_{\text{в}})^2 R_{\text{в}}$. Время $t_{\text{в}}$ достижения криотроном критической температуры $T_0 = 9.5$ К вычисляется как

$$t_{\text{в}} = \frac{1}{\alpha} \ln \left(\frac{T_0 - \frac{W}{\alpha}}{T_0 - \frac{W}{\alpha}} \right) \quad (11)$$

Приведены полученные с помощью данной оценочной модели зависимости времен $t_{\text{в}}$ от величины $I_{\text{уд}}$ для трех типов криотронов (рис.5) при условии идеального остывания ($W = 0$). Установлены оригинальные зависимости времени $t_{\text{в}}$ криотронов от величины тока помехи $I_{\text{н}}$ при различных значениях тока удержания (рис.6), что дает возможность учесть дополнительные потери, вызванные неидеальностью формы управляющих импульсов СЧЭС ($W \neq 0$).

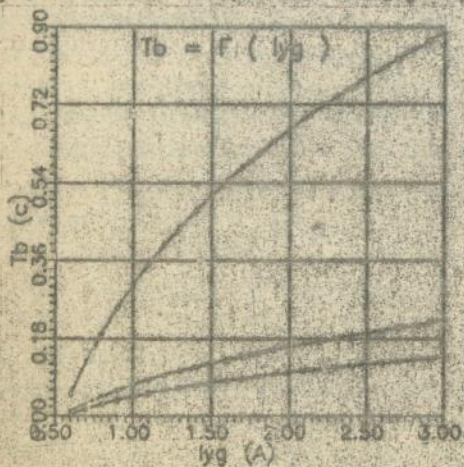


Рис.5

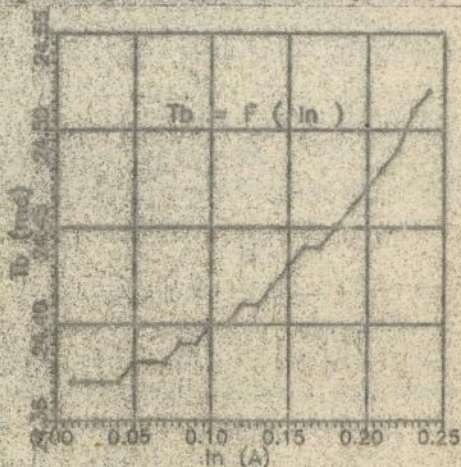


Рис.6

Применение данной модели позволило оперативно оценить в первом приближении динамические свойства криотронов и выбрать оптимальные параметры их конструкции исходя из максимального быстродействия и минимальных потерь в криогенной зоне СПП.

С целью более точного расчета режимов теплового управления криотронов и установления зависимости их конструктивных, электрических и тепловых параметров разработана адекватная тепловая модель криотрона на основе уравнения нестационарной теплопроводности с использованием экспериментальных данных, полученных в стационарном режиме. Приведено описание пакета программ, реализующих модель.

Криотрон представлен в виде осесимметричной цилиндрической системы, состоящей из трех слоев (s-клапан, n-нагреватель, i-изоляция), поле температур в поперечном сечении которой аппроксимируется уравнениями

$$\begin{aligned} \rho_s c_s \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r \lambda_s \frac{\partial T}{\partial r} \right\} + W_s(t), & 0 < r < R_s, \\ \rho_n c_n \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r \lambda_n \frac{\partial T}{\partial r} \right\} + W_n(t), & R_s < r < R_s + d_n, \\ \rho_i c_i \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r \lambda_i \frac{\partial T}{\partial r} \right\}, & R_s + d_n < r < \frac{D}{2}. \end{aligned} \quad (12)$$

Здесь $2R_s$, d_n и D - диаметры СП провода, нагревателя и изоляции; $W_n(t)$ и $W_s(t)$ - импульсы мощности прямоугольной формы, выделяющейся на интервалах нагрева (инициализации) и удержания (стабилизации).

Уравнения (12), дополненные соответствующими начальными и граничными условиями на оси симметрии, поверхности изоляции и на границах раздела материалов решались неявным методом конечных разностей второго порядка точности, а полученная система уравнений в конечных разностях - методом прогонки.

Приведены результаты моделирования в виде графиков температурных полей по сечению криотронов в моменты смены режимов в течение цикла работы СПП, а также кривые изменения температуры криотронов за время полного цикла, устанавливающие взаимосвязь электрических, тепловых и конструктивных параметров криотронов. Выполнен сопоставительный анализ различных типов криотронов.

Графики, приведенные на рис.7,

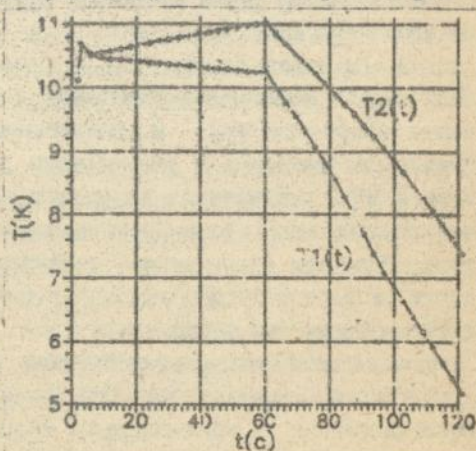


Рис.7.

соответствуют наилучшему ($t_{\text{в}} = 9.8$ мс) и наихудшему ($t_{\text{в}} = 28.5$ мс) вариантам при $f=4$ Гц. Полученные результаты позволили выбрать параметры конструкции, тип изоляции, величину тока удержания $I_{\text{уд}}=0,27$ А, обеспечивающие сближение $t_{\text{в}}$ на 18.7 мс по сравнению с криотронами с эпоксидной изоляцией при неизменной величине тепловых потерь в криотроне $\approx 0,02$ Вт/см, что соответствует повышению быстродействия СПС на 15.6%.

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В результате теоретико-экспериментального исследования электрофизических процессов, протекающих в подсистемах и элементах СПС, установлены основные источники потерь тепловой и электрической энергии в системе. Показано, что проблема улучшения энергетических и динамических показателей такого рода систем может быть в значительной степени решена путем комплексного выбора конструктивных параметров и режимов управления элементов ПП и СП подсистем с учетом взаимосвязи их электрических и тепловых параметров.

2. Разработан пакет программ расчета энергопотерь в различных элементах ППС. Разработана методика и на ее основе предложен и создан высокоточный испытательный стенд для оперативного определения мощности теплопотерь в силовых ПП приборах ППС, отличающийся учетом составляющей потерь от обратных токов и широким диапазоном задания испытательного тока. Построены зависимости, устанавливающие взаимосвязь величины потерь в заданном типе прибора от электрических параметров задаваемого режима. Обоснован выбор типов элементов и режимов их работы по критерию минимума энергопотерь в ППС.

3. На основании анализа составляющих энергопотерь в криогенной зоне СПС задача повышения эффективности СП подсистем сведена к задаче улучшения энергетических и динамических показателей силовых криотронов. Предложена методика и разработано устройство для определения энергопотерь в ВТОП подсистемах по уровню хладагента. Проведены экспериментальные исследования режимов теплового управления криотронами различного типа. Получены оригинальные температурные зависимости $J(T)$ и $q(T)$ плотности теплового потока с единицы длины и поверхности криотронов, определены коэффициенты теплоотдачи α .

4. Разработана аналитическая модель режима теплового управления криотронами, с помощью которой получены оригинальные зависимости времени восстановления $t_{\text{в}}$ криотронов от величины $I_{\text{уд}}$ тока удержания, позволяющие оперативно оценивать динамические свойства криотронов и выбрать оптимальные типы их конструкции. Проведены экспериментальные исследования

зависимости времени t_b от величины тока помехи и дополнительных потерь, вызванных неидеальностью формы управляющих импульсов, которые подтверждают результаты аналитических расчетов.

5. Разработана численная модель, описывающая нестационарные режимы работы криотронов, создан пакет программ, реализующих данную модель. Получены графики распределения температурных полей криотронов и кривые изменения их температуры за время цикла работы СППС для различных типов криотронов и режимов их управления. Установлены закономерности, отображающие взаимосвязь электрических, тепловых и конструктивных параметров силовых криотронов, определены параметры конструкции, тип изоляции и величина тока удержания, обеспечивающие снижение t_b на 18.7 мс по сравнению с известными образцами криотронов, что соответствует повышению быстродействия СППС на 15.6%, а также снизить на 13% уровень энергопотерь в криотронах от обратного тока на интервале стабилизации.

6. На основе проведенных в работе аналитических и экспериментальных исследований разработаны и изготовлены малые серии низко- и высокотемпературных ключевых элементов, которые внедрены в СППС для запяжки высокостабильной магнитной системы, в системе управления СП магнитным сепаратором, а также в системе ввода-вывода энергии автономного СП накопителя.

Основные публикации по теме диссертации:

1. Верлань А.А., Костиш В.О., Сизоненко В.П. Применение метода сопряженных урачений при моделировании и оптимизации преобразовательных устройств // Проблемы преобразовательной техники: Тез.докл. IV Всесоюз. науч.-техн. конф., Чернигов, сент. 1987 г. - Киев, 1987. - Ч.4. - С.31-33.

2. Заболотный А.П., Верлань А.А. Использование редукиии при опти и зации вентиляных преобразователей // Проблемы нелинейной электротехники: Тез.докл. III Всесоюз. науч.-техн. конф., Черкаасы, сент. 1988 г. - Киев, 1988. - Ч.2. - С. 250-252.

3. Заболотный А.П., Верлань А.А., Войтик В.В. Оценка энергетических потерь в ключевых элементах преобразовательных устройств // Силовые полупроводниковые преобразователи и электрооборудование для энергосберегающих технологий: Сб. науч. тр./ АН УССР. Ин-т пробл. энергосбережения, Ин-т электродинамики. - Киев, 1988. - С. 160-163.

4. Заболотный А.П., Верлань А.А. Математическое моделирование электромагнитных процессов в системе АИ-АД// Проектирование и исследование полупроводниковых и электромеханических преобразователей: Сб. тр. молодых ученых ИЭД АН УССР. - Киев: Наук. думка, 1988.

5. Верлань А.А., Заболотный А.П. Оценка тепловых потерь в элементах полупроводниковых преобразователей // Загл. отчет по теме "Конус", НТС

ЛНБ им. В. Стефаники
АН Украины

02.89.0036371.- Киев, 1988.- Ч.2.

6. Клэпов Ю.М., Кодрянский В.М., Верлань А.А. Исследование высоко-температурных криотронов с магнитным управлением // Энергосбережение и проблемы сверхпроводимости.- Киев: Наук. думка, 1990.- С. 39-43.

7. Верлань А.А. Измерение тепловых потерь в высокотемпературных сверхпроводниковых устройствах// Энергосбережение и проблемы сверхпроводимости: Тез. докл. Всесоюз. научн.-техн. семинара, Яремча, сент.1990г.- С.13-14.

8. Положительное решение с выдаче А.с. 4744405/21 от 18.06.91, МКИ G 01 R 22/04. Устройство для измерения тепловых потерь в вентильных полупроводниковых приборах / А.В.Новосельцев, А.А.Верлань, А.П.Заболотный.

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

10. Новосельцев А.В., Скобарихин Ю.В., Верлань А.А. Энергетические процессы в сверхпроводниковом преобразователе.- Киев, 1991.- 55 с.- (Препр./АН УССР. Ин-т пробл. энергосбережения; 91-4).

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, состоит в следующем: [1-5] - разработка методик аналитического расчета и экспериментальной оценки энергетических потерь в элементах ПП устройств и систем; [6] - результаты экспериментального исследования вольтамперных характеристик ВТСП криотронов с магнитным управлением; [6] - предложен и разработан измерительный стенд для оценки тепловых потерь в вентильных ПП приборах; [9] - результаты экспериментального исследования характеристик контактов ВТСП криотронов; [10] - анализ составляющих энергетических потерь и оценка энергетической эффективности работы ПП преобразователя.

Осискатель *AS*

Подписано в печать _____ 93

Формат 60x84/16

Бумага офсетная #2. Усл. печ. л. 1.0 Усл.-кр. отт. 1.0

Уч.-изд. л. 1.0. Тираж 120 экз. Заказ . Бесплатно

Институт проблем энергосбережения АН Украины

254070 Киев 70, ул. Покровская, 11.

Полиграфический участок

Института проблем энергосбережения АН Украины

254070 Киев 70, ул. Покровская, 11.

463694

AB 28.216