

На правах рукописи

Лобынцев Владимир Васильевич

**СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ ОГРАНИЧИТЕЛИ ТОКОВ
КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ ТЯГОВОГО
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

специальность 05.09.03 - «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

МОСКВА - 2009

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московском государственном университете путей сообщения» (МИИТ).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Пупынин В.Н.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Высоцкий В.С.
кандидат технических наук,
Литовченко В.В.

Ведущая организация: Петербургский государственный
университет путей сообщения (ПГУПС)

Защита диссертации состоится « » _____ 2009г .в ____ час. ____ мин.
на заседании диссертационного совета Д218.005.02 при Московском
государственном университете путей сообщения (МИИТ), по адресу: 127994, Москва,
ул. Образцова, 9, стр.9, ауд. _____

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного
университета путей сообщения (МИИТ).

Автореферат разослан « » _____ 2009г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

д.т.н., старший научный
сотрудник Сидорова Н.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы:

Актуальность работы связана с тем, что интенсивная электрификация многих участков железных дорог производилась преимущественно во второй половине прошлого века, поэтому большая часть силового электротехнического оборудования уже выработала свой ресурс, и нуждается в замене. Вместе с тем темпы модернизации хозяйства электроснабжения таковы, что для замены только понизительных трансформаторов тяговых подстанций, эксплуатируемых на сегодняшний день сверх нормативного срока службы, понадобится минимум 100 лет. В основном ухудшению технического состояния трансформаторов способствует высокая частота возникновения коротких замыканий в тяговых сетях, которая примерно на два порядка выше, чем в распределительных сетях общепромышленного назначения аналогичного уровня напряжения (6-35кВ). При коротких замыканиях в обмотках трансформаторов возникают пондермоторные силы, многократно превышающие максимально допустимые значения, которые приводят к интенсивному старению изоляции. От коротких замыканий страдает и сама контактная сеть (пережоги и отжиг проводов), поэтому требуются срочные меры, позволяющие продлить сроки службы понизительных и преобразовательных трансформаторов, а также сократить число пережогов проводов контактной сети. Защитить обмотки понизительных трансформаторов от динамического действия токов короткого замыкания, а провода контактной сети от пережогов, могут единственные в своём роде безинерционные коммутационные устройства – сверхпроводниковые ограничители тока, позволяющие не только срезать амплитуду ударного тока короткого замыкания, но и ограничить его квазиустановившееся значение.

Особо следует отметить, что сейчас, в период глобальной модернизации хозяйства электроснабжения железных дорог, как никогда открывается прекрасная возможность начать его техническое перевооружение с применением новейших технологий, в том числе, согласно Энергетической стратегии ОАО «РЖД» на период до 2010г. и на перспективу до 2030г., основанных на использовании явления сверхпроводимости. Эти технологии позволят вывести работу систем тягового электроснабжения (СТЭ) на новый качественный уровень и в полной мере способствовать реализации высокоскоростного и тяжеловесного движения.

Цель работы:

Целью диссертационной работы является разработка сверхпроводниковых ограничителей токов короткого замыкания и исследование их токоограничивающего действия в системах тягового электроснабжения постоянного и переменного тока.

Основные задачи:

1. Исследование тепловых процессов в секции токоограничивающего элемента сверхпроводникового ограничителя токов короткого замыкания (СОТ).
2. Разработка математической модели высокотемпературного сверхпроводникового (ВТСП) ограничителя токов короткого замыкания резистивного типа.
3. Экспериментальное исследование физических свойств ВТСП проводников второго поколения различных производителей и комплексные испытания модельной секции ВТСП токоограничивающего элемента резистивного типа в активно-индуктивной цепи переменного тока.
4. Верификация математической модели ВТСП ограничителя токов короткого замыкания резистивного типа на основе полученных экспериментальных данных.
5. Выбор параметров токоограничивающих элементов, разработка конструкции основных узлов и системы криогенного обеспечения будущих прототипов промышленных СОТ для систем тягового электроснабжения постоянного и переменного тока.
6. Имитационное моделирование токоограничивающего действия СОТ в тяговых сетях постоянного и переменного тока.

Методика исследования:

Для исследования тепловых процессов в секции токоограничивающего элемента сверхпроводникового ограничителя токов короткого замыкания использовалась программная среда COMSOL Multiphysics 3.4, ориентированная на решение широкого спектра инженерно-физических задач методом конечных элементов. Экспериментальные исследования физических свойств ВТСП проводников различных производителей и комплексные испытания модельной секции ВТСП токоограничивающего элемента резистивного типа проводились на экспериментальном стенде Института сверхпроводимости и физики твёрдого тела РНЦ «Курчатовский институт». Исследование токоограничивающего действия СОТ в тяговых сетях постоянного и переменного тока производилось при использовании специально разработанной для этих целей компьютерной программы основанной на решении методом итераций линейных и нелинейных алгебраических уравнений, записанных, как в явном, так и в неявном виде.

Научная новизна работы заключается в том, что:

- предложен метод расчёта времени перехода неидеальных сверхпроводников второго рода в нормальное состояние;

- доказана возможность существенного упрощения нестационарного уравнения теплопроводности используемого при расчёте температуры перегрева ВТСП проводников второго поколения за счёт перехода от двумерной (расчёт распределения температуры перегрева по сечению) к одномерной модели (расчёт температуры перегрева в центральной точке сечения);

- предложена математическая модель ВТСП ограничителя токов короткого замыкания резистивного типа;

- впервые в России проведены комплексные испытания модельной секции ВТСП токоограничивающего элемента резистивного типа, на основе которых произведена верификация математической модели ВТСП ограничителя токов короткого замыкания резистивного типа;

- предложен метод расчёта электрической изоляции криогенной части токовводов ВТСП электротехнических устройств различного рода тока и уровня напряжения;

- предложен метод расчёта токоограничивающего действия СОТ при его установке в силовых цепях действующих электроустановок (тяговых подстанций) постоянного и переменного тока.

Достоверность полученных результатов

Все экспериментальные исследования проводились с использованием высокоточной измерительной аппаратуры: цифрового запоминающего осциллографа АКТАКОМ АСК-3107 и многоканальной измерительной системы Agilent 34970А. Эффективность работы ВТСП токоограничивающего элемента резистивного была доказана предварительным моделированием переходных процессов в электрической цепи с его использованием. Точность моделирования подтверждена экспериментально (расхождение составляет не более 10%).

Практическая ценность работы заключается в том, что:

- разработаны инженерные методы расчёта и проектирования ВТСП токоограничивающих элементов резистивного типа;

- разработаны конструктивные решения будущих прототипов СОТ ориентированных на использование в тяговых сетях постоянного и переменного тока ОАО «РЖД»;

- разработана схема универсальной системы криогенного обеспечения СОР;
- показана возможность размещения в стандартной ячейке постоянного тока СОР и быстродействующего выключателя (ВАБ-49);
- разработана ячейка ввода в распределительное устройство 27,5кВ с однофазными СОР;
- дан план размещения оборудования на территории типовой тяговой подстанции переменного тока с первичным напряжением 110кВ, а также ячеек ввода с однофазными СОР и системы их криогенного обеспечения;
- разработан порядок взаимодействия СОР с устройствами автоматики и защиты при его установке на вводах в распределительное устройство 27,5кВ.

Внедрение результатов:

Разработанные методы расчётов и теоретических исследований носят новаторский характер, поэтому нашли своё применение при выполнении научно-исследовательских работ в таких организациях как: ООО «Центр«Атом-инновации» и Государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП). С использованием метода расчёта электрической изоляции криогенной части тоководов ВТСП электротехнических устройств различного рода тока и уровня напряжения разработаны тоководные муфты для прототипа первой в России сверхпроводниковой кабельной линии, которые внедрены на испытательном полигоне ОАО НТЦ «Электроэнергетики».

Апробация работы

Основные результаты работы были представлены на VI научно-практической конференции «Безопасность движения поездов» 26-27 октября 2005г., Москва, МИИТ; на третьем международном симпозиуме Eltrans2005, 15-17 ноября 2005г., Санкт-Петербург, ПГУПС; на международной конференции Siemens AG, 5 апреля 2006г., Москва; на заседании секции «Электрификация и электроснабжение» научно-технического совета ОАО «РЖД» «Перспективные технические средства и технологии для систем тягового электроснабжения железных дорог» 26-27 сентября 2006г. и 19-21 сентября 2007г. Москва, ОАО «РЖД»; на заседании совета по реализации генерального соглашения о сотрудничестве между Российской Академией Наук и ОАО РАО «ЕЭС России» по определению направлений развития ЕЭС России, 15 мая 2007г. Москва, РАН; VIII научно-практической конференции «Безопасность движения поездов» 1-2 ноября 2007г., Москва, МИИТ; на четвёртом международном симпозиуме Eltrans2007, 23-26 октября 2007г.,

Санкт-Петербург, ПГУПС; на конференции по физике конденсированного состояния, материаловедению и сверхпроводимости, посвящённой 50-ти летию исследовательского ядерного реактора ИРТ, 26-30 ноября 2007, Москва, РНЦ «КИ»; на всероссийском семинаре по прикладной сверхпроводимости, 14 января 2009г., Москва, РНЦ «КИ».

Публикации

По теме диссертационной работы имеется 17 публикаций, из них один патент на изобретение, одно свидетельство о регистрации программы для ЭВМ и две публикации в издании, рекомендуемом ВАК:

«Электричество », №2, 2007г., «НТТ – наука и техника транспорта», №4, 2008г.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объём диссертации составляет 198 страниц, включая 107 рисунков, 12 таблиц и списка литературы из 103 наименований и 5 приложений на 14 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель, задачи исследования, научная новизна и практическая ценность диссертационной работы. Отмечено, что над проблемой ограничения токов короткого замыкания работали такие специалисты, как Бочев А.С., Герман Л.А., Кейлин В.Е., Овласюк И.Я., Пупынин В.Н., Фигурнов Е.П., и др.

В первой главе представлены физические свойства и динамика развития, а также проанализированы технологические аспекты современного промышленного производства низко- и высокотемпературных сверхпроводников (рис. 1) используемых для создания электротехнических и электрофизических установок различного назначения. Рассмотрены основные типы СОР, обладающие реальной коммерческой перспективой: индуктивный, выпрямительный и резистивный. Отражены последние мировые достижения и успешно завершённые проекты в сфере создания СОР. Дан обзор современного состояния дел в области систем криостатирования и тепловой изоляции. Приведены основные типы микрорифрежераторов (криокулеров), в том числе поршневых машин работающих по циклу Стирлинга, входящих в состав, как систем циркуляционного охлаждения, так и компактных воздухоразделительных установок.

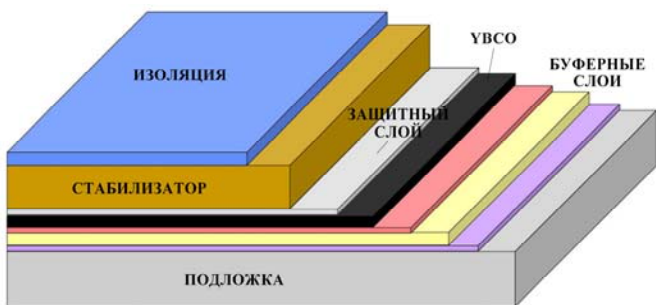


Рис. 1 – Структура ВТСП проводника второго поколения и его внешний вид

Во второй главе предложен метод расчёта времени перехода неидеальных сверхпроводников второго рода, к которым относятся ВТСП проводники второго поколения, в нормальное состояние, основанный на двух выдвинутых в рамках данной диссертационной работы гипотезах:

- 1) основной причиной перехода в нормальное состояние ВТСП проводников второго поколения в случае бифилярной конструкции токоограничивающего элемента является рост их температуры, возникающий при превышении током некоторого порогового значения, называемого критическим;
- 2) сверхпроводник переходит в нормальное состояние равномерно по всей длине при увеличении тока в нём сверх критического значения.

Выдвинутые гипотезы позволяют представить процесс перехода ВТСП проводов второго поколения в нормальное состояние схемой замещения (рис. 2), состоящей из двух параллельно включенных нелинейных сопротивлений, и рассматривать в адиабатическом приближении. Данное приближение имеет место потому, что отвод тепла в жидкий азот за характерные времена перехода в нормальное состояние ВТСП проводов второго поколения крайне затруднён ввиду образования газообразной плёнки с низкой теплопроводностью вблизи нагреваемой поверхности. С учётом вышесказанного, для использованного ВТСП проводника второго поколения марки *SF12050* производства компании *SuperPower* было записано нестационарное уравнение теплопроводности при переходе его сверхпроводящего слоя в нормальное состояние:

$$m_{\text{сн}} C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{Q} \quad (1)$$

где: $m_{\text{сн}}$ – масса погонного метра ВТСП проводника второго поколения, кг/м;

$C_p(T) = \eta_{\text{YBaCuO}} \cdot C_{p(\text{YBaCuO})}(T) + \eta_{\text{Ag}} \cdot C_{p(\text{Ag})} + \eta_{\text{h}} \cdot C_{p(\text{h})}(T)$ – удельная объёмная теплоёмкость ВТСП проводника второго поколения, вклад в которую вносит каждый из слоёв, Дж/(кг·К)⁻¹;

$\eta_{\text{YBaCuO}} = S_{\text{YBaCuO}}/S_{\Sigma}$, $\eta_{\text{Ag}} = S_{\text{Ag}}/S_{\Sigma}$, $\eta_{\text{h}} = S_{\text{h}}/S_{\Sigma}$ – соответственно коэффициенты заполнения ВТСП слоя, слоя серебра и хастеллоя марки C_4 ;

$C_{p(\text{YBaCuO})}(T) = 2,0228 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 7,8163 \cdot 10^{-9} \cdot T^4$, $C_{p(\text{Ag})} = 235$, $C_{p(\text{h})}(T) = 345,18145 + 0,2205 \cdot T$ – температурные зависимости удельной теплоёмкости ВТСП, серебра и хастеллоя марки C_4 , Дж/(кг·К)⁻¹;

$Q = (\Delta U_{\text{сн}}(I))^2/R_3(I, T)$ – мощность тепловыделений в ВТСП и серебряном слоях проводника, Вт/м;

$\Delta U_{\text{сн}}(I) = \Delta U_{\text{к}}(I/I_{\text{к}})^n$ – падение напряжения на ВТСП проводе, В/м;

$\Delta U_{\text{к}} = 10^{-5} \div 10^{-12}$ В/м; $n \sim 27 \div 35$;

$R_3(I, T) = (\Delta U_{\text{сн}}(I) \cdot R_{\text{Ag}}(T)) / (\Delta U_{\text{сн}}(I) + R_{\text{Ag}}(T) \cdot I)$ – эквивалентное сопротивление параллельно включенных слоёв: ВТСП и серебра в функции тока и температуры, Ом/м;

$R_{\text{Ag}}(T) = -0,02035 + 0,00124 \cdot T - 4,52933 \cdot 10^{-7} \cdot T^2$ – аппроксимация экспериментально измеренного сопротивления серебряного слоя ВТСП проводника второго поколения, Ом/м;

I – величина тока в цепи, А.

Для ВТСП проводника *SF12050* общей длиной 24м: $m_{\text{сн}} = 0,0055$ кг/м; $S_{\text{YBaCuO}} = 1,2 \cdot 10^{-8}$ м²; $S_{\text{Ag}} = 4,8 \cdot 10^{-8}$ м²; $S_{\text{h}} = 6 \cdot 10^{-5}$ м²; $S_{\Sigma} = 6,6 \cdot 10^{-5}$ м².

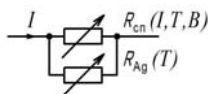


Рис. 2 – Схема замещения ВТСП проводника второго поколения

Приняв допущение, что проводник *SF12050* изолирован от внешнего поля и работает лишь в собственном поле отличном от нуля, влияние которого на величину $I_{\text{к}}$ учитывает экспериментально измеренная вольтамперная характеристика (рис. 3), численное решение уравнения (1) позволяет рассчитать время его перехода в нормальное состояние в зависимости от амплитуды, формы и скорости нарастания тока (рис. 4-6). Отсчёт времени начинается с момента появления первого теплового возмущения в ВТСП проводнике при $I > I_{\text{к}}$ и заканчивается с достижением температуры порядка 88К,

которая ниже критической температуры характерной для соединения $YBaCuO$ ввиду технологических особенностей производства сверхпроводников на его основе.

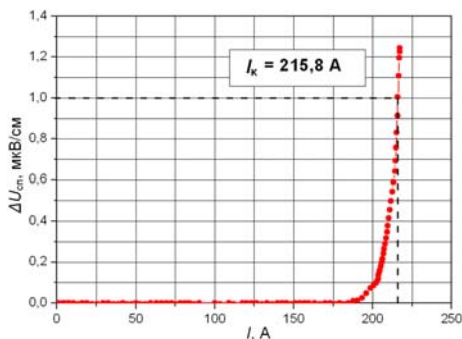


Рис. 3 – Вольтамперная характеристика

ВТСП проводника 2-го поколения $SF12050$

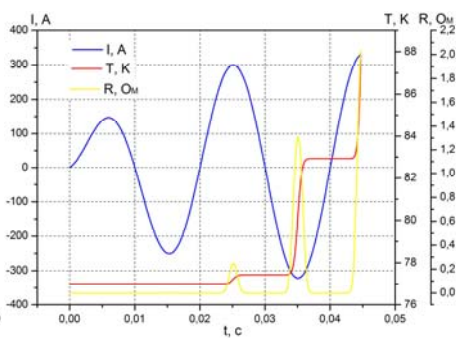


Рис. 4 - Время перехода ВТСП проводника

второго поколения $t = 0,03112c$

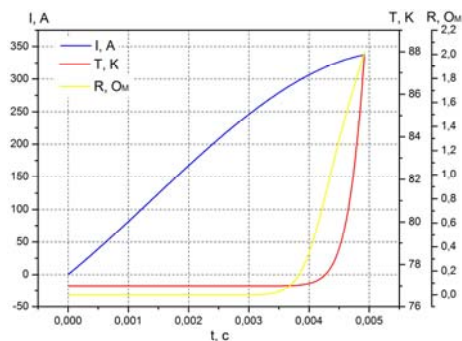


Рис. 5 - Время перехода ВТСП проводника

второго поколения $t = 0,00232c$

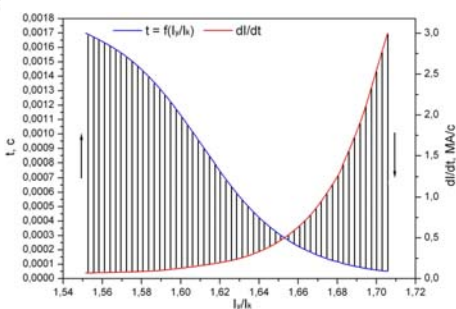


Рис. 6 - Время перехода $SF12050$ в нормальное состояние и достигаемая кратность тока в зависимости от di/dt

Расчёт распределения температуры перегрева по сечению использованного ВТСП проводника второго поколения – $SF12050$ в режиме ограничения тока короткого замыкания показал, что по истечении, как промежуточных, так и заданного отрезка времени разность температур между наиболее и наименее нагретыми точками его поперечного сечения не превышает 0,3К. Это обстоятельство является основным доказательством того, что распределение температуры по сечению проводника $SF12050$, получаемое посредством решения нестационарного уравнения теплопроводности (2), можно считать

равномерным, а это позволяет перейти к расчёту температуры перегрева в центральной точке его поперечного сечения, используя уравнение (3):

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(-k\nabla T) = \dot{Q}; \quad (2)$$

$$m_{\text{сн}} C_p \frac{dT}{dt} = \dot{Q}; \quad (3)$$

где: $\dot{Q} = U^2 / (R_{\text{Ag}}(T) \cdot L^2 \cdot S)$ – мощность джоулевого тепловыделения, отнесенная к объёму серебра в проводе (для хастеллоевой подложки $\dot{Q} = 0$), Вт/м³; U – допустимое падение напряжения на ВТСП проводе; L – длина ВТСП провода, м; S – суммарная площадь поперечного сечения серебряных слоёв, м²; ρ , C_p и k – плотность, удельная теплоемкость и тензор теплопроводности вещества в каждой рассматриваемой подобласти/

Также было выяснено, что тепловые постоянные времени *SF12050*, в силу малой толщины образующих этот ВТСП провод слоёв, существенно меньше постоянных времени переходных электрических процессов развивающихся в цепи при его переходе в нормальное состояние, вследствие чего резистивный нагрев последнего происходит от квадрата мгновенного значения тока (рис. 7).

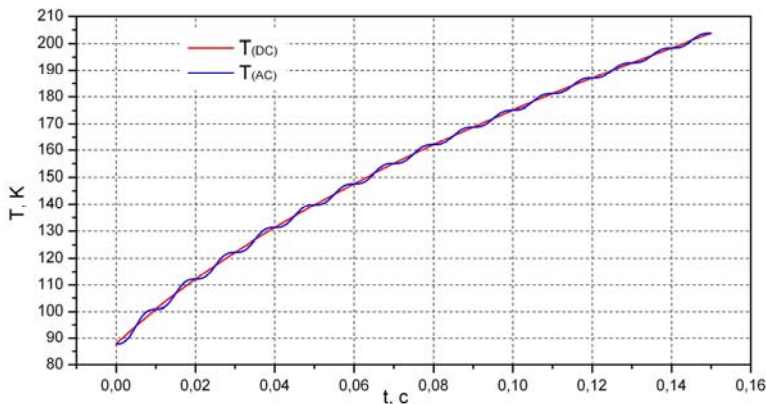


Рис. 7 – Временные зависимости температуры центральной точки сечения ВТСП проводника 2-го поколения длиной 24м на постоянном и переменном токе при амплитуде падения напряжения на нём 380В и $\sqrt{2} \cdot 380 = 537,4$ В соответственно

При моделировании восстановления секцией ВТСП токоограничивающего элемента сверхпроводящих свойств, основанном на решении уравнения (2) в отсутствии джоулева тепловыделения ($\dot{Q} = 0$), было выяснено, что в мировой практике нет единого мнения каким из граничных условий (рис. 8), определяющим величину теплового напора с нагретой поверхности в жидкий азот пользоваться. Однако это не помешало сделать вывод о том, что для сокращения времени восстановления секцией ВТСП токоограничивающего элемента сверхпроводящих свойств нужно прибегать к конструктивным решениям, максимально развивающим площадь охлаждаемой поверхности.

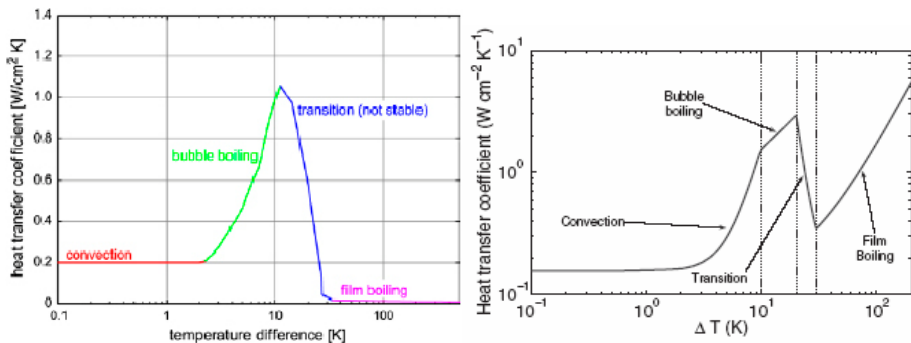


Рис. 8 – Зависимости коэффициента теплопередачи в жидкий азот от температурного напора с нагретой поверхности

Ответной реакцией ВТСП токоограничителя резистивного типа (СОТ) на изменение величины тока в электрической цепи является изменение его активного сопротивления, соответственно основные режимы его работы:

- 1) нулевое сопротивление – величина тока в цепи с СОТ не превышает его критического значения – $I < I_k$;
- 2) переход в нормальное состояние – величина тока в цепи с СОТ – $I \in [I_k; I_y]$;
- 3) токоограничивающее действие – величина тока в цепи больше или равна току уставки – $I \geq I_y$;
- 4) восстановление сверхпроводящего состояния – после отключения быстродействующего выключателя, установленного в цепи последовательно с СОТ (величина тока в цепи равна нулю – $I = 0$).

Из режимов работы ВТСП токоограничителя резистивного типа вытекает общая математическая модель его работы (4), которая, как было показано выше, в основном базируется на решении нестационарного уравнения теплопроводности (3). Однако для моделирования токоограничивающего действия СОТ в силовых цепях реальных электроустановок необходимо получить совместное решение модифицированного нестационарного уравнения теплопроводности (5), и дифференциальных уравнений, описывающих изменение электрического тока в такой цепи.

$$\begin{cases} R_{\text{СОТ}} = 0, & I < I_{\text{к}}, \\ R_{\text{СОТ}} = \frac{\Delta U_{\text{сн}}(I) \cdot R_{\text{Аг}}(T)}{\Delta U_{\text{сн}}(I) + R_{\text{Аг}}(T) \cdot I}, & I_{\text{к}} \leq I < I_{\text{у}}, \\ R_{\text{СОТ}} = R_{\text{Аг}}(T), & I \geq I_{\text{у}}, \\ R_{\text{СОТ}} = f(T)^*, & I = 0. \end{cases} \quad (4)$$

*Изменение сопротивления токоограничивающего элемента СОТ – $R_{\text{СОТ}}$ при восстановлении им сверхпроводящего состояния представлено в функции температуры по той причине, что конечные выкладки определяются особенностями теплоотдачи в жидкий азот зависящей также от конструкции токоограничивающего элемента.

Модифицированное нестационарное уравнение теплопроводности, описывающее изменение температуры токоограничивающего элемента СОТ от времени и величины тока в цепи:

$$T(t) = T_{\text{нач}} + \Delta T(t) = T_{\text{нач}} + \frac{i^2(t) \cdot R_{\text{СОТ}}(T)}{c_p(T) \cdot m_{\Sigma}}, \quad (5)$$

где: $T_{\text{нач}} = 77\text{К}$ – начальная температура токоограничивающего элемента СОТ; $\Delta T(t)$ – температура перегрева токоограничивающего элемента СОТ, К; m_{Σ} – суммарная масса ВТСП провода в токоограничивающем элементе, кг; $c_p(T)$ – удельная теплоемкость ВТСП провода, Дж·(кг·К)⁻¹; $R_{\text{СОТ}}(T)$ – сопротивление токоограничивающего элемента СОТ, Ом.

В диссертации были получены совместные решения модифицированного нестационарного уравнения теплопроводности (5), и дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы в электрических цепях постоянного тока, как при работе СОТ в случае отказа быстродействующего выключателя (ВАБ), так при совместной работе СОТ и ВАБ, однако ввиду большого объема эти выкладки не представлены.

Рассмотрен случай использования СОТ на переменном токе, при его установке на фазах ввода в распределительное устройство и отказе выключателя или устройства защиты на одном из фидеров (рис. 9).

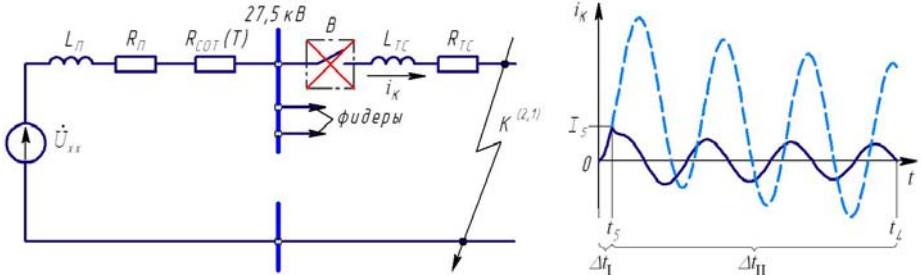


Рис. 9 – Схема замещения для случая возникновения короткого замыкания в тяговой сети переменного тока при отказе фидерного выключателя и наличии СОТ, и зависимости изменения тока в ней

На схеме замещения (рис. 9) приняты следующие обозначения элементов: \dot{U}_{xx} – действующее значение напряжения холостого хода на шинах тяговой подстанции (ТП); $L_{П}$, $R_{П}$ – эквивалентное сопротивление и индуктивность ТП, определяемые параметрами первичной питающей системы, мощностью и числом включенных понижающих трансформаторов; $R_{СОТ}(T)$ – сопротивление вводимое СОТ в цепь протекания тока; $R_{ТС}$, $L_{ТС}$ – удельное сопротивление и индуктивность тяговой сети (суммарные значения последовательно соединенных и индуктивно связанных контактной и рельсовой сетей); $K^{(2,1)}$ – место короткого замыкания.

Все элементы схемы замещения (рис. 9) считаются линейными, кроме $R_{СОТ}(T)$, проявляющего себя в на втором этапе длительностью Δt_{Π} .

Для схемы (рис. 9) и первого этапа длительностью Δt_1 линейное дифференциальное уравнение записанное по второму закону Кирхгофа:

$$L_{\Sigma} \frac{di}{dt} + R_{\Sigma} i = \sqrt{2} U_{xx} \sin(\omega t + \psi), \quad (6)$$

где: $L_{\Sigma} = 2L_{П} + L_{ТС}$; $R_{\Sigma} = 2R_{П} + R_{ТС}$; ω – угловая скорость, рад·с⁻¹; ψ – начальная фаза напряжения, эл. град.,

решение которого выглядит так:

$$i = \frac{\sqrt{2}U_{xx}}{\sqrt{R_{\Sigma}^2 + (\omega L_{\Sigma})^2}} \cdot (\sin(\omega t + \psi - \varphi_{\kappa}) - \sin(\psi - \varphi_{\kappa})) \cdot e^{-\frac{R_{\Sigma}}{L_{\Sigma}} t}, \quad (7)$$

где: $\varphi_{\kappa} = \arctg(\omega L_{\Sigma} / R_{\Sigma})$ – угол сдвига фазы между током и напряжением, эл. град.

Для схемы (рис. 9) и второго этапа длительностью Δt_{II} по второму закону Кирхгофа запишем нелинейное дифференциальное уравнение:

$$L_{\Sigma} \frac{di}{dt} + (R_{\Sigma} + R_{\text{СОТ}}(T))i = \sqrt{2}U_{xx} \sin(\omega t + \psi), \quad (8)$$

решение которого, справедливое для интервала линеаризации Δt , выглядит так:

$$i = \frac{\sqrt{2}U_{xx}}{\sqrt{(R_{\Sigma} + R_{\text{СОТ}}(T))^2 + (\omega L_{\Sigma})^2}} \cdot \begin{pmatrix} \sin(\omega t + \psi - \varphi_{\kappa}) \\ -\sin(\psi - \varphi_{\kappa}) \end{pmatrix} \cdot e^{-\frac{R_{\Sigma} + R_{\text{СОТ}}(T)}{L_{\Sigma}} t}. \quad (9)$$

С использованием полученных уравнений, в том числе и на постоянном токе, было выполнено математическое (имитационное) моделирование токоограничивающего действия СОТ в тяговых сетях постоянного и переменного тока.

В третьей главе описаны задачи и представлены схемы проведённых экспериментальных исследований свойств ВТСП проводников второго поколения различных производителей, в частности вольтамперных характеристик и температурной зависимости их погонного сопротивления, а также комплексные лабораторные испытания модельной секции ВТСП токоограничивающего элемента резистивного типа (рис. 10).

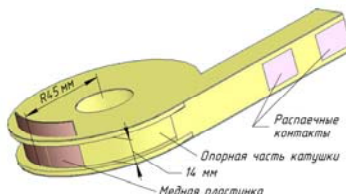


Рис. 10 – Конструкция модельного ВТСП токоограничивающего элемента

Проведён анализ полученных экспериментальных данных, на основе которых построены кривые уровня потерь в модельном ВТСП токоограничивающем элементе (рис. 11) и времени восстановления им сверхпроводящих свойств (рис. 12).

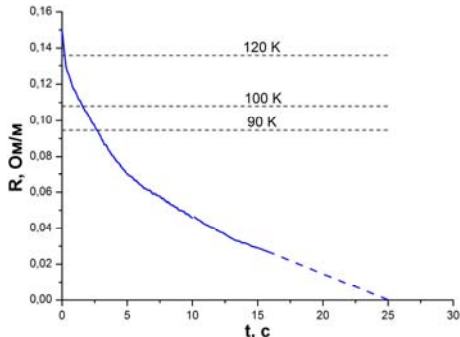
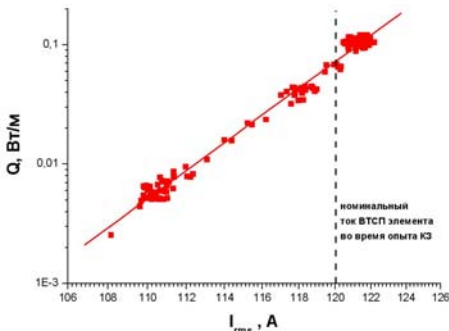


Рис. 11 – Зависимость погонной величины потерь на переменном токе от действующего значения рабочего тока в модельном ВТСП токоограничивающем элементе

Рис. 12 – Временная зависимость погонного сопротивления модельного ВТСП токоограничивающего элемента в ходе восстановления им сверхпроводящих свойств

Представлены совмещённые осциллограммы ограниченного тока короткого замыкания, падения напряжения на ВТСП токоограничивающем элементе и температуры его перегрева снятые при разной начальной фазе короткого замыкания (рис. 13, 14).

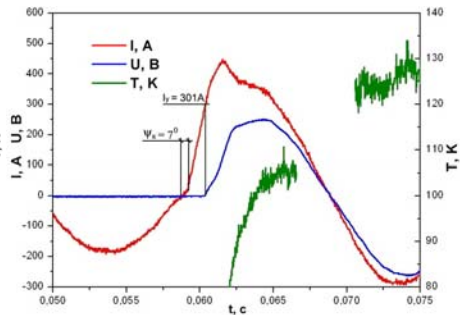
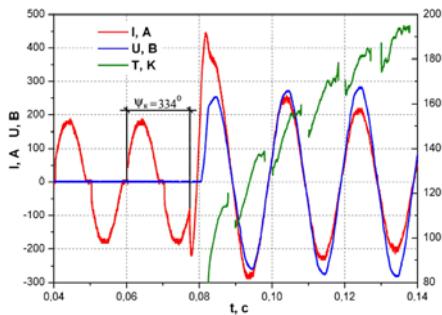


Рис. 13 – Осциллограммы снятые при начальной фазе тока короткого замыкания $\psi_k = 334^\circ (-26^\circ)$

Рис. 14 – Осциллограммы снятые при начальной фазе тока короткого замыкания $\psi_k = 7^\circ$

Произведена верификация математической модели СOT, полученные данные по результатам моделирования при прочих равных условиях были сопоставлены в одних координатных осях (рис. 17, 18).

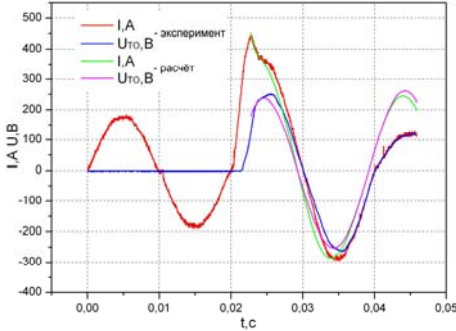


Рис. 17 – Сравнение расчётных данных с результатами эксперимента при начальной фазе тока короткого замыкания $\psi_{\kappa} = 7^{\circ}$

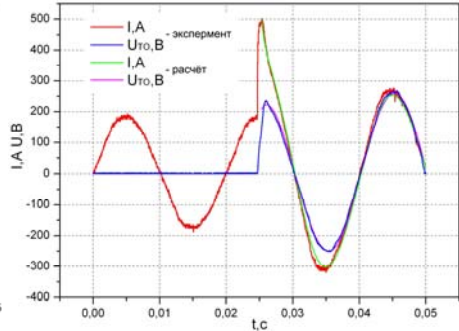


Рис. 18 – Сравнение расчётных данных с результатами эксперимента при начальной фазе тока $\psi_{\kappa} = 84^{\circ}$

Ввиду невозможности проведения на имеющемся экспериментальном стенде опыта глухого короткого замыкания (к.з.) с целью определения амплитуды ударного и установившегося токов короткого замыкания, последние были получены расчётным способом при начальной фазе короткого замыкания $\psi_{\kappa} = 334^{\circ}$ (рис. 19) и $\psi_{\kappa} = 7^{\circ}$ (рис. 20).

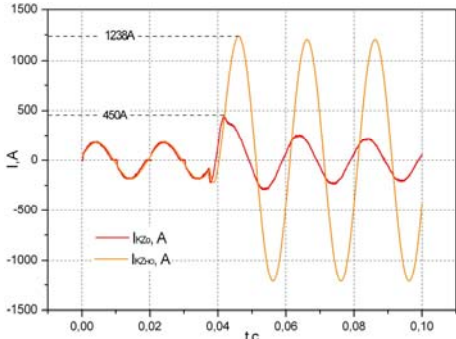


Рис. 19

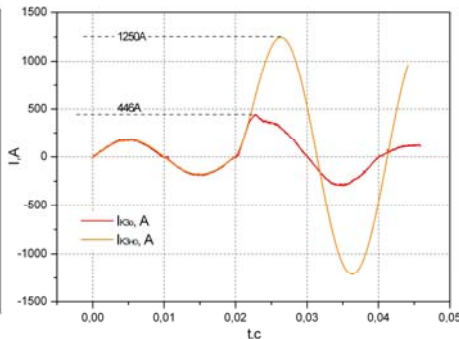


Рис. 20

Характер изменения тока к.з. в преимущественно активной цепи с модельным ВТСП токоограничивающим элементом и без него при $L = 0,492\text{мГн}$, $R = 0,0782\text{Ом}$

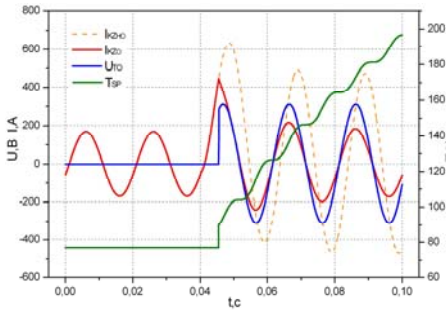


Рис. 21

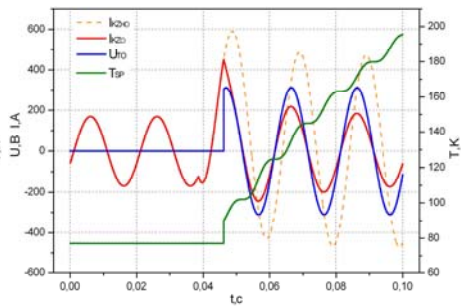
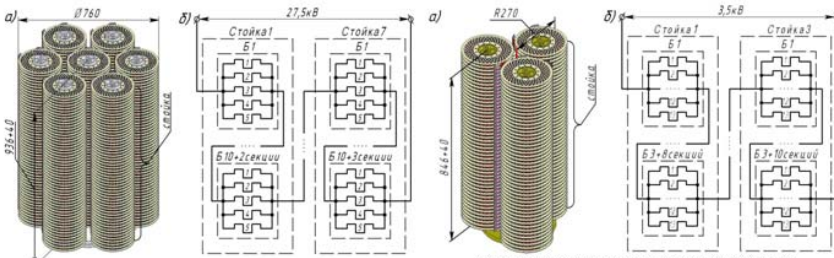


Рис. 22

Характер изменения тока к.з. в преимущественно индуктивной цепи с модельным ВТСП токоограничивающим элементом и без него при $L = 2,46\text{мГн}$, $R = 0,0782\text{Ом}$

Ввиду невозможности проведения экспериментов по определению достигаемого эффекта от токоограничивающего действия модельной секции ВТСП токоограничивающего элемента в цепи с преобладанием индуктивного сопротивления оно было смоделировано при начальной фазе короткого замыкания $\psi_k = 7^\circ$ (рис. 21) и $\psi_k = 334^\circ$ (рис. 22).

В четвертой главе выполнена разработка схемы и конструкции токоограничивающих элементов СОТ для тяговых сетей постоянного и переменного тока (рис. 23).



Токоограничивающий элемент однофазного ВТСП СОТ переменного тока и его принципиальная схема

$$\begin{aligned}
 I_{\text{ном}} &= 840 \cdot 1,5 = 1260\text{А}; \\
 N_k &= 27500/380 = 73\text{шт.}; \\
 N_{\text{п}} &= 1260/250 = 5\text{шт.}; \\
 L_{\Sigma} &= 2 \cdot 24 \cdot 365 = 17520\text{м}; \\
 R_{\text{СОТ}} &= 150\text{Ом}.
 \end{aligned}$$

Общий расход сверхпроводника SF12050 с максимальной токонесущей способностью в 215,8А составит 17,5км, при этом первоначально вводимое в цепь протекания тока СОТ сопротивление составит 150Ом.

Токоограничивающий элемент ВТСП СОТ постоянного тока для установки на фидер питания депо и его принципиальная схема

$$\begin{aligned}
 I_{\text{ном}} &= 840 \cdot 1,5 = 1260\text{А}; \\
 N_k &= 27500/380 = 73\text{шт.}; \\
 N_{\text{п}} &= 1260/250 = 5\text{шт.}; \\
 L_{\Sigma} &= 2 \cdot 24 \cdot 365 = 17520\text{м}; \\
 R_{\text{СОТ}} &= 150\text{Ом}.
 \end{aligned}$$

Общий расход сверхпроводника SF12050 с максимальной токонесущей способностью в 215,8А составит 6,9км, при этом первоначально вводимое в цепь протекания тока СОТ сопротивление составит 0,87Ом.

Собственное время токоограничивающих элементов СОТ порядка 0,1-1мс

Рис. 23 – Токоограничивающие элементы прототипов промышленных СОТ

Предложена схема системы принудительного перевода в нормальное состояние токоограничивающего элемента СОТ по сигналу от микропроцессорной защиты (СППНС), позволяющая регулировать его уставку в широком диапазоне. Выполнен расчёт электрической прочности изоляции криогенной части токовводов ВТСП электротехнических устройств (рис. 24).

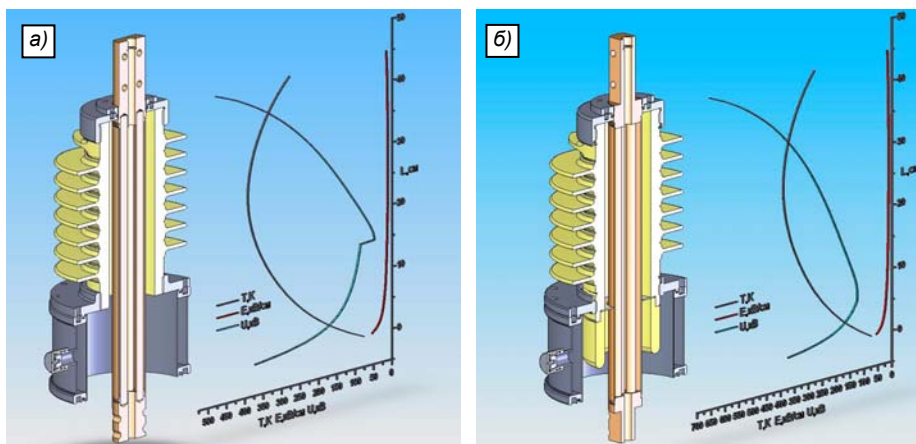


Рис. 24 – Уровни пробивного напряжения в токовводах прототипа ВТСП кабельной линии: *а)* – без изоляционных барьеров; *б)* – с изоляционными барьерами

Проведен расчёт тепловых потерь в СОТ постоянного и переменного тока, на основе которых осуществлялся выбор производительности компактной воздухоподелительной установки и объёма буферной ёмкости. Разработана универсальная система криогенного обеспечения СОТ. Показана возможность размещения СОТ в стандартной ячейке постоянного тока совместно с быстродействующим выключателем (ВАБ-49). Дан план размещения оборудования типовой тяговой подстанции переменного тока с первичным напряжением 110кВ и разработанных ячеек вводов в распределительное устройство тягового напряжения.

В пятой главе выполнено имитационное моделирование токоограничивающего действия СОТ при его установке на фидере питания депо тяговой подстанции «Ожерелье» Московской железной дороги (рис. 25, 26). Разработан порядок взаимодействия СОТ с существующими системами защиты и автоматики тяговых подстанций переменного тока при его установке на вводах в распределительное устройство тягового напряжения.

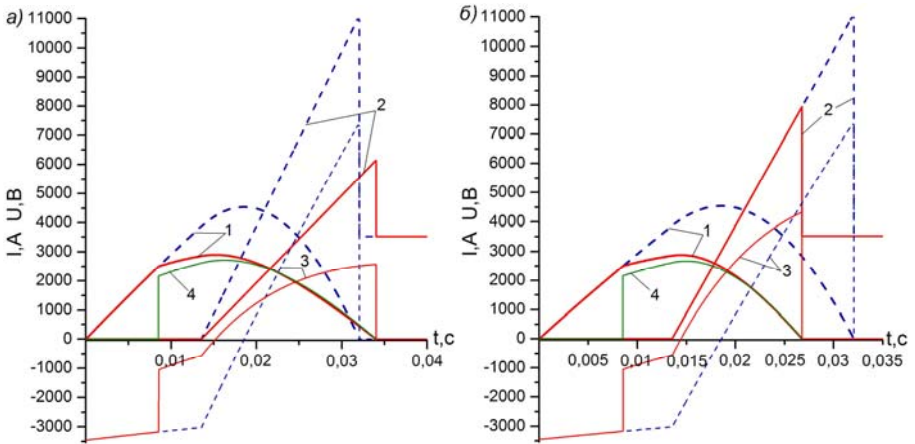


Рис. 25 – Временные зависимости процессов отключения близких токов к.з. (для СОР использовалась СППНС, действующая по сигналу от ЦЗАФ-3,3), где: 1 – отключаемый ток к.з., 2 – напряжение на дуге выключателя, 3 – перенапряжения на индуктивности цепи, 4 – падение напряжения на активном сопротивлении СОР вводимом в цепь; а – (—) 1×ВАБ-49+СОТ, (---) 2×ВАБ-49; б – (—) 2×ВАБ-49+СОТ, (---) 2×ВАБ-49.

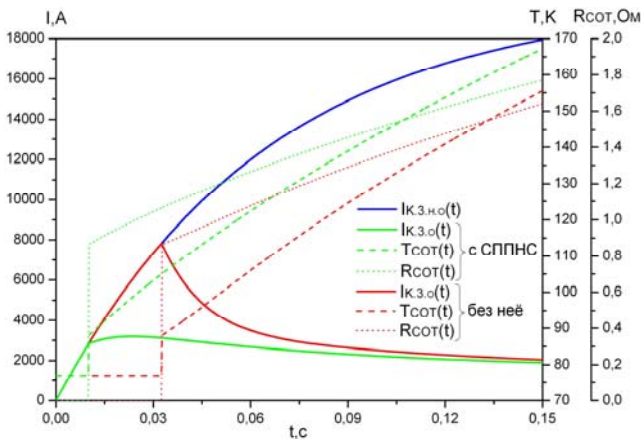


Рис. 26 – Изменение тока к.з. при отказе быстродействующего выключателя

Выполнено имитационное моделирование токоограничивающего действия СОР при его установке на вводах в распределительное устройство 27,5кВ тяговой подстанции «Грязи» для случая отказа фидерного выключателя (рис. 27).

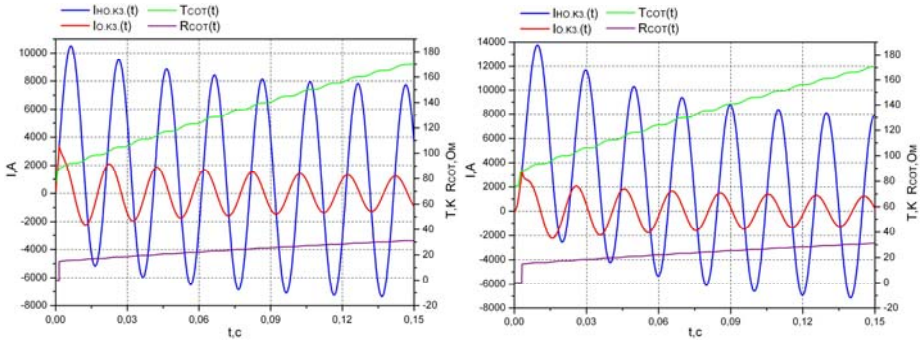


Рис. 27 – Токоограничивающее действие СОТ на вводах РУ-27,5кВ ТП «Грязи» при от-
казе фидерного выключателя и начальной фазе к.з. $\psi_k = 30$ и 90 эл.град. соответственно

Приведены соображения о технико-экономической эффективности использова-
ния СОТ в системе тягового электроснабжения переменного тока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исследование процесса перехода неидеальных сверхпроводников второго рода по-
казало, что характерные времена, за которые происходит этот переход, действи-
тельно малы, по сравнению с характерными временами переходных режимов ко-
роткого замыкания.
2. Исследование температуры перегрева ВТСП проводников второго поколения в ре-
жиме ограничения тока короткого замыкания не выявило по истечении, как проме-
жуточных, так и заданного отрезка времени значительного перепада температур
между наиболее и наименее нагретыми точками его поперечного сечения, что сви-
детельствует о равномерном распределении температуры и возможности существен-
ного упрощения расчётной модели.
3. Исследование процессов остывания токоограничивающих элементов в азотной ван-
не после их перехода в нормальное состояние позволило выявить существенные не-
достатки в существующих методиках расчёта этих процессов, требующих глубоко-
го экспериментального и теоретического изучения.
4. Проведены экспериментальные исследования физических свойств ВТСП проводни-
ков второго поколения различных производителей.
5. Изготовлен и испытан модельный ВТСП токоограничивающий элемент резистив-
ного типа.

6. Математическая модель СОТ проверена путём сопоставления в одних координатных осях экспериментальных данных и полученных с её помощью временных зависимостей при прочих равных условиях. Расхождение составляет менее 10%.
7. Ввиду отсутствия возможности проведения экспериментальных исследований токоограничивающего действия модельного ВТСП токоограничивающего элемента в активно-индуктивной цепи переменного тока было выполнено его математическое моделирование.
8. Спроектированы полномасштабные прототипы СОТ для тяговых сетей постоянного и переменного тока, а также разработана универсальная система их криогенного обеспечения, которая при необходимости может быть доукомплектована буферной ёмкостью.
9. Разработана схема системы принудительного перевода токоограничивающего элемента СОТ в нормальное состояние по сигналу от микропроцессорной защиты, открывающая возможность регулирования его ток уставки в широком диапазоне.
10. Разработан метод расчёта электрической изоляции криогенной части токовводов ВТСП электротехнических устройств различного рода тока и уровня напряжения.
11. Показана возможность размещения в стандартной ячейке постоянного тока СОТ и автоматического быстродействующего выключателя.
12. Разработана ячейка ввода в распределительное устройство 27,5кВ с использованием однофазных СОТ и дан план размещения этих ячеек на территории типовой тяговой подстанции магистральных железных дорог переменного тока с первичным напряжением 110кВ совместно с электротехническим оборудованием традиционного исполнения.
13. Выполнено имитационное (математическое) моделирование токоограничивающего действия СОТ в тяговой сети постоянного тока при его установке на фидере питания депо.
14. Разработан порядок взаимодействия СОТ с существующими устройствами автоматики и защиты, при его установке на вводах в распределительное устройство тягового напряжения – 27,5кВ.
15. Выполнено математическое моделирование токоограничивающего действия СОТ в тяговой сети переменного тока в случае отказа фидерного выключателя при различной начальной фазе короткого замыкания.

16. Показана технико-экономическая эффективность различной компоновки СОР на тяговой подстанции переменного тока, потому как на тяговой подстанции постоянного тока использование СОР полезно, но не так необходимо как на переменном токе.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1) Лобынцев В.В., Оценка эффективности использования сверхпроводникового оборудования в системах тягового электроснабжения // Труды шестой научно-практической конференции "Безопасность движения поездов", том 2, 26-27 октября 2005г., Москва, с. VI-56–VI-57

2) Лобынцев В.В., Перспективы использования сверхпроводимости в системах тягового электроснабжения // Тезисы докладов третьего международного симпозиума Eltrans2005, 15-17 ноября 2005г., Санкт-Петербург, с. 315-318

3) Шевлюгин М.В., Лобынцев В.В., Сверхпроводимость притормозила на пороге подстанций // "Мир транспорта", №1, 2006г., с. 44-47

4) Лобынцев В.В., Система тягового электроснабжения постоянного тока с использованием сверхпроводящего кабеля // Труды международной конференции Siemens AG, 5 апреля 2006г., Москва, 6 стр.

5) Лобынцев В.В., Моделирование процесса ограничения токов короткого замыкания сверхпроводящим токоограничителем в тяговых сетях постоянного тока // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2006611592, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 12 мая 2006г., 21стр.

6) Лобынцев В.В., Сверхпроводниковые трансформаторы // Информационный бюллетень "Сверхпроводники для электроэнергетики", том 3, В 4, сентябрь 2006г., с. 4-8

7) Лобынцев В.В., Пупынин В.Н., Система тягового электроснабжения постоянного тока с использованием сверхпроводящего кабеля // "Электричество", №2, 2007г., с. 20-22

8) Лобынцев В.В., Сверхпроводниковые динамические синхронные компенсаторы // Информационный бюллетень "Сверхпроводники для электроэнергетики", том 4, выпуск 2, апрель 2007г., с. 7

9) Лобынцев В.В., Ильин А.А., Сверхпроводниковый ограничитель токов короткого замыкания как принципиально новый способ защиты понижающих трансформаторов от динамического действия токов к.з.// Труды восьмой научно-практической конференции "Безопасность движения поездов", том 1, 1-2 ноября 2007г., Москва, с. V-41

10) Лобынцев В.В., Щербаков В.И., Необходимость использования СТУ в тяговых сетях // "Мир транспорта", №4, 2007г., с. 60-63

11) Лобынцев В.В., Щербаков В.И., Сверхпроводниковое оборудование для систем тягового электроснабжения железных дорог // Информационный бюллетень “Сверхпроводники для электроэнергетики”, том 4, выпуск 5, октябрь 2007г., с. 8-9

12) Лобынцев В.В., Щербаков В.И., Сверхпроводниковый трансформатор готов к установке на подвижной состав // Информационный бюллетень “Сверхпроводники для электроэнергетики”, том 4, выпуск 5, октябрь 2007г., с. 9-10

13) Лобынцев В.В., Пупынин В.Н., Система тягового электроснабжения постоянного тока (варианты) // Патент на изобретение №2307036, 27.09.07

14) Лобынцев В.В., Щербаков В.И., Сверхпроводниковые ограничители токов короткого замыкания резистивного типа в тяговых сетях переменного тока // Тезисы докладов третьего международного симпозиума Eltrans 2007, 23-26 октября 2007г., Санкт-Петербург, с. 58-59

15) Лобынцев В.В., Щербаков В.И., Сверхпроводящий ограничитель токов короткого замыкания резистивного типа в сетях переменного и постоянного тока // Тезисы докладов конференции по физике конденсированного состояния, материаловедению и сверхпроводимости, посвящённой 50-ти летию исследовательского ядерного реактора ИРТ, 26-30 ноября 2007, Москва, РНЦ «КИ», с. 235

16) Лобынцев В.В., Щербаков В.И., Криогенное оборудование для сверхпроводниковых электротехнических устройств // Информационный бюллетень “Сверхпроводники для электроэнергетики”, том 5, выпуск 1, февраль 2008г., с. 7-11

17) Лобынцев В.В., Пупынин В.Н., Силовое оборудование систем тягового электроснабжения завтрашнего дня // Наука и техника транспорта, №4, 2008, с. 21-24

Лобынцев Владимир Васильевич

СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ ОГРАНИЧИТЕЛИ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

специальность 05.09.03 - «Электротехнические комплексы и системы»

Подписано в печать

Формат 60 × 84/16

Тираж – 80

Заказ №

Усл. печ. л. – 1,5

127994, Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9
Типография МИИТА