

государственный научный центр российской федерации ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

> ИФВЭ 2008–26 ИФО

И.В. Богданов, В.В. Зубко, С.С. Козуб, П.И. Слабодчиков, Л.М. Ткаченко, Л.С. Ширшов, П.А. Щербаков

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ СИЛЬНОТОЧНОГО СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ТОКОНЕСУЩЕГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ МАГНИТОВ УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Протвино 2008

Аннотация

Богданов И.В., Зубко В.В., Козуб С.С. и др. Исследование стабильности сильноточного сверхпроводящего токонесущего элемента для магнитов ускорителей заряженных частиц: Препринт ИФВЭ 2008–26. – Протвино, 2008. – 14 с., 10 рис., 3 табл., библиогр.: 15.

Для сверхпроводящих магнитов с полем 6 Тл и скоростью изменения поля свыше 1 Тл/с необходима разработка стабильного токонесущего элемента, обладающего низкими кабельными потерями. В качестве токонесущего элемента можно использовать сверхпроводящий кабель Резерфордовского типа с различным резистивным покрытием проводов. Для таких типов кабеля проведены расчетные и экспериментальные исследования минимальной энергии перехода. Разработана методика численного расчета и создана экспериментальная установка для исследования минимальной энергии перехода в нормальное состояние сверхпроводящего кабеля. Измерены контактные сопротивления между проволоками для кабеля с различным резистивным покрытием проводов. Проведенные исследования показали, что сверхпроводящий кабель с резистивным покрытием проводов обладает достаточной стабильностью для работы в быстроциклирующих магнитах.

Abstract

Bogdanov I.V., Zubko V.V., Kozub S.S. et al. Study of Stability of High-Current Superconducting Current-Carrying Element for Magnets of Accelerators: IHEP Preprint 2008 –26. – Protvino, 2008. – p. 14, fig. 10, tables 3, refs. 15.

Development of stable current-carrying element, having low cable losses, is necessary for superconducting magnets with a field up to 6 T and field ramp rate more 1 T/s. As a current-carrying element it is possible to use superconducting cable Rutherford type with a various resistive covering of wires. Numerical and experimental studies of the minimum quench energy were carried out for such types of cable. A method of numerical calculation is developed and experimental installation for study of minimum quench energy of a superconducting cable is created. Contact resistances between strands of cable with a various resistive covering of strands are measured. Carried out researches have shown that the superconducting cable with a resistive covering of wires possesses sufficient stability for operation in fast-cycling magnets.

© Государственный научный центр Российской Федерации Институт физики высоких энергий, 2008

Введение

В настоящее время отклоняющие сверхпроводящие (СП) магниты с магнитными полями свыше 5 Т находят широкое применение в структуре ускорителей на сверхвысокие энергии. Для достижения столь высоких магнитных полей используется плоский кабель Резерфордовского типа с частичной стабилизацией, позволяющий получить максимальную плотность тока в СП-обмотке магнита. Критериями стабильности СП-кабеля с частичной стабилизацией является энергия необратимого перевода СП-образца в нормальное состояние или минимальная энергия перехода (МЭП) и температурный запас.

Скорости изменения магнитного поля в СП-магнитах ускорителей частиц (Tevatron, HERA, RHIC, LHC), лежат вблизи 0,1 Тл/с. Проектируемый в настоящее время ускоритель SIS300 (Германия) предполагает использование СП-магнитов с полем 6 Тл и скоростью изменения поля 1 Тл/с [1]. В ЦЕРН (Швейцария) рассматривает возможность использования СП-магнитов с полем 5 Тл и скоростью изменения поля 1,5 Тл/с для будущей модернизации LHC. Увеличение скорости изменения магнитного поля увеличивает тепловыделения в обмотке магнита, обусловленные вихревыми потерями в кабеле. Увеличение этих потерь вызывает нагрев и уменьшение температурного запаса СП-обмотки. Поэтому для быстроциклирующих магнитов необходима разработка нового СП-кабеля, в котором максимально снижены потери при больших скоростях изменения магнитного поля.

Для получения магнитных полей выше 6 Тл необходимо иметь достаточно широкий кабель с большим числом проволок. При скорости изменения магнитного поля 1 Тл/с, кабельные потери существенно возрастают. Такие потери могут быть снижены путем увеличения сопротивления между проволоками в кабеле. Однако очень большие контактные сопротивления могут ухудшить процесс перераспределения тока между проволоками кабеля, что вызовет снижение критического тока кабеля и его МЭП. Увеличение контактных сопротивлений между проволоками в кабеле может быть достигнуто за счет нанесения резистивного покрытия на СП-проволоку [2]. В данной работе исследовано влияние контактных сопротивлений между проволоками на МЭП кабеля Резерфордовского типа.

МЭП СП-кабеля определяется его устойчивостью к тепловым возмущениям, возникающим в результате тепловыделений, вызванных, например, движением проволоки в кабеле. МЭП – это минимальная энергия теплового возмущения малой геометрической протяженности и короткой продолжительности, необходимая для необратимого перехода СП-кабеля в нормальное состояние. Именно возмущения короткой продолжительности представляют наибольший практический интерес, так как на магнитах в момент начала перехода в нормальное состояние наблюдались шпильки напряжения короткой продолжительности (~100 мкс), и есть основания считать, что процесс происходил в малых объемах. Эта энергия зависит как от условий охлаждения, так и от распределения возмущения по времени, и практически не зависит от длительности нагрева в интервале до 100 мкс [3].

В данной работе приведены:

- Экспериментальное и теоретическое исследование влияния контактных сопротивлений на величину минимальной энергии перехода в нормальное состояние кабеля.
- Измеренные контактные сопротивления между проволоками в кабеле с различными покрытиями.

1. Экспериментальное исследование стабильности СП-кабеля

1.1 Возможности увеличения поперечного и продольного контактных сопротивлений в кабеле

Как известно, в кабеле имеются два вида электрических контактных сопротивлений между проволоками: сопротивления между скрещивающимися проволоками из разных слоев R_c и сопротивления между соседними проволоками в слоях R_a [4]. Увеличение контактных сопротивлений между проволоками в кабеле для уменьшения кабельных потерь может быть достигнуто за счет либо увеличения резистивного покрытия СП-проволоки, что увеличивает (R_c и R_a), либо введением проставки в кабель, увеличивая только R_c . Низкое R_a , в кабеле с проставкой обеспечивает перераспределение токов между проволоками и, соответственно, более высокую МЭП.

Короткая модель однослойного СП-диполя на 4 Тл, изготовленная из кабеля с проставкой, была создана и испытана в BNL [5]. Конструкция кабеля с проставкой приводит к требуемым с точки зрения потерь сопротивлениям, но обладает рядом недостатков по сравнению с кабелем без проставки:

- Проставка из нержавеющей фольги увеличивает жесткость кабеля и приводит к проблемам в изготовлении обмотки на лобовых частях СП-магнита.
- Проставка в кабеле увеличивает его толщину, что приводит к уменьшению числа витков в слое, а, следовательно, и к уменьшению температурного запаса магнита.
- Проставка уменьшает конструктивную (инженерную) плотность тока в обмотке, что уменьшает температурный запас по сравнению с таким же кабелем без проставки.

Кабель без изолирующей проставки с резистивным покрытием не имеет приведенных выше недостатков. В качестве покрытия может использоваться естественный оксид. Образование оксидного покрытия может производиться различными способами. Но оксидное покрытие имеет невысокую механическую прочность и трудно контролируемую толщину и, следовательно, сопротивление. Более перспективно использовать механически стабильные покрытия проволок никелем или хромом толщиной 1 мкм. Так как обе компоненты сопротивления имеют большие значения, и перераспределение токов в кабеле затруднено, необходимы экспериментальные и теоретические исследования МЭП для данного кабеля.

1.2 СП-проволока и кабель

Исследования проводились на 19-жильном кабеле, изготовленном из многоволоконных композитных СП-проволок СКНТ-8910. СП-проволоки имели никелевое или хромовое покрытие толщиной 1 мкм или естественный оксид. Кабель имеет трапецеидальное поперечное сечение. Основные параметры проволоки и кабеля представлены в **табл. 1**. Кабель изолирован двумя слоями полиимидной ленты толщиной 20 мкм и слоем стеклоленты толщиной 100 мкм.

Диаметр провода, мм	0.85
Число СП-нитей	8910
Диаметр СП-нити, мкм	6
Шаг скрутки СП-нитей, мм	10
Отношение сверхпроводника к меди	0.42
Остаточное сопротивление Си матрицы (RRR)	70
Критическая плотность тока в поле 5, 6, 7 Тл, кА/мм ²	2.36, 1.85, 1.37
Число проволок в кабеле	19
Ширина кабеля без изоляции, мм	8.5
Средняя толщина кабеля без изоляции, мм	1.46
Шаг транспонирования, мм	62

Таблица 1. Основные параметры СП-проволоки и кабеля.

1.3 Конструкция установки для измерения МЭП

При токонесущей способности СП-кабеля уровня 10 кА обычный метод ввода тока по токовводам от внешнего источника питания становится непрактичным из-за больших тепловыделений в низкотемпературной зоне. Для уменьшения потерь жидкого гелия и достижения высоких значений тока в исследуемом СП-образце применен индукционный метод ввода тока с помощью СП-трансформатора [6]. Основу установки составляет устройство, в котором СП-соленоид и первичная обмотка трансформатора стационарно закреплены в криостате, а вторичная обмотка и СП-образец размещены на сменном штоке. Оборудование предназначено для исследования стабильности и измерения критических токов короткого СП-образца, имеющего форму шпильки, в поперечном магнитном поле. Основные параметры установки приведены в табл. 2.

Параметр	СП-трансформатор		СП-соленоид
Число витков	960 (I)	3 (II)	10362
Длина обмотки, мм	48	40	200
Наружный диаметр обмотки, мм	88	44	150
Внутренний диаметр обмотки, мм	66	40	65
Материал СКНТ-50 (NbTi)	провод	плоский кабель	провод
Поперечный размер витка	Ø 0.5 мм	15×1.5 мм ²	Ø 0.85 мм
Собственная индуктивность	45 мГн	0.6 мкГн	3.6 Гн
Максимальный ток, А	100	15300	122

Таблица. 2. Основные параметры установки для измерения МЭП.

Для изготовления первичной обмотки использовался изолированный многожильный NbTi провод диаметром 0,5 мм. Длина соленоидальной обмотки составляет 48 мм, наружный диаметр обмотки составляет 82 мм, внутренний диаметр обмотки – 66 мм.

При запитке СП-обмотки трансформатора линейно нарастающим током от стабилизированного источника тока критический ток обмотки составил 100 А. Существенного влияния скорости ввода тока в обмотку на ток перехода обмотки в нормальное состояние выявлено не было. При скоростях вода тока от 1 до 30 А/с критический ток первичной обмотки трансформатора оставался равным ~100 А.

На **рис.** 1 показана конструкция установки, включающей криостат (1), где стационарно размещены СП-соленоид (4) и первичная обмотка СП-трансформатора, вторичная обмотка которого размещена на съемном штоке (8). Разработанная установка позволяет проводить исследование характеристик образцов СП-кабеля (3) в условиях, характерных для материала обмоток СП-магнитов, охлаждаемых потоком гелия. Исследуемый образец подключается к выводам (5) вторичной обмотки СП-трансформатора.

Для измерения тока во вторичном сверхпроводящем контуре используется тороидальная катушка (7), подключенная к электронному интегратору. При разработке устройства ставилась задача обеспечить исследование стабильности и токонесущей способности СП-образцов в магнитном поле величиной до 6,5 Тл. Размеры соленоида (4) выбраны, исходя из требований обеспечения высокой однородности магнитного поля в области исследуемого СП-образца.

Испытания соленоида проводились в стандартном криостате при температуре жидкого гелия 4,2 К. Критический ток соленоида составил 122 А, что соответствует максимально достижимому полю 6,75 Тл. Тренировка магнита отсутствовала, что свидетельствует о надежном механическом закреплении витков в обмотке. Соленоид запитывался от стабилизированного источника постоянного тока 600А/12В, ввод тока осуществлялся со скоростью 1 А/с. Измерение топографии магнитного поля проводилось с помощью датчика Холла типа ПХЭ 602817А, размещенного на штанге, что позволяло перемещать датчик вдоль оси соленоида. Область однопроцентной однородности магнитного поля по оси соленоида составляет ±15 мм от центра соленоида.



Рис. 1. Конструкция установки для измерения МЭП.

1.4 Исследуемые образцы

Образцы кабеля переводились в нормальное состояние с помощью точечных нагревателей (**рис. 2**), расположенных на поверхности отдельной проволоки кабеля [7], [8]. Нагреватель изготавливался непосредственно из СП-проволоки путем нанесения на ее поверхность электропроводящего клея, тонкий слой которого служит нагревательным элементом. В изоляции кабеля прорезалось отверстие размером ~0,6×0,6 мм², которое заполнялось клеем Ероtecny E300, представляющим собой эпоксидное связующее с наполнителем из графитового порошка. Ток к греющему слою подводится с одной стороны через полоску из медной фольги, наложенную сверху, а с другой стороны – непосредственно через СП-проволоку.



Рис. 2. Схематичное изображение нагревателя (изоляция кабеля не показана).

Исследуемый образец и кусочки кабеля длиной 40 мм, имеющие в сечении форму трапеции, укладывались в стопку в специальной оправке таким образом, чтобы пакет имел в сечении прямоугольную форму, и задавливались в этой оправке до давления 60 МПа. Данная сборка подвергалась термообработке, в результате которой токопроводящий клей полимеризовался. Выбранный температурный режим – подъем температуры в течение 50 минут до 190°С, пауза 10 минут, спад температуры в течении 50 минут до 20°С – соответствует режиму склейки обмотки из кабеля с полимидной изоляцией.

Сопротивление полученных таким образом точечных нагревателей составляет 0,5–1 Ом при 4,2 К. На каждом образце формировалось по 3 точечных нагревателя.

Оправка, в которой происходила термообработка, служила далее как головка измерительного устройства, фиксирующая измерительный участок. Так как прямолинейная часть кабеля длиной 40 мм зажата в оправке, то потенциальные отводы припаивались на свободной (выступающей из оправки) части кабеля. При этом чувствительная область (расстояние между потенциальными отводами) составляла 50 мм. Длина спаев образца со вторичной обмоткой СПтрансформатора составляла ~170 мм. Длина образца между спаями равнялась 40 мм.

1.5 Методика измерения МЭП

Упрощенная измерительная схема представлена на **рис. 3**. СП-соленоид создает внешнее магнитное поле, которое ориентировано перпендикулярно к широкой стороне кабеля. Через образец пропускается ток, создаваемый СП-трансформатором [6], первичная обмотка которого запитывается от биполярного источника тока ±100А/10В. Источник управляется от функционального генератора Agilent 33200A, в память которого записаны сигналы специальной формы, обеспечивающие нужную конфигурацию развертки тока. Для измерения тока через образец используется тороидальная катушка, индуктивно связанная со вторичным контуром СП-трансформатора, которая подключена к входу аналогового интегратора.

Нановольтметр Agilent 34420A служит для измерения напряжения на образце при измерении критического тока кабеля или в момент перехода в нормальное состояние, вызванное тепловым возмущением. Усилитель мощности Керсо ВОР 50–8М (U_{max}= 50 B, I_{max}= 8 A, полоса пропускания 24 кГц) обеспечивает необходимые параметры импульса тока через измерительный нагреватель. На него от генератора Agilent 33200A подается прямоугольный управляющий импульс фиксированной длительности 50 мкс. Амплитуда импульса регулируется в широких пределах и определяет тепловую энергию, выделяющуюся в измерительном нагревателе. Сигналы с измерительных нагревателей (напряжение на нагревателе и напряжение с шунта Rш, пропорциональное току через нагреватель) подаются на вход цифрового осциллографа Agilent 54624А через усилители, которые построены на базе широкополосного операционного усилителя AD215BY и служат в основном для гальванической развязки. Вспомогательный нагреватель служит для перевода вторичной обмотки СП-трансформатора в нормальное состояние и питается от источника тока Б5-48, подключаемого на короткое время с помощью реле коммутатора. Задание входных параметров, управление процессом измерения и сбор данных осуществляются по интерфейсной шине IEEE-488.



Рис. 3. Электрическая схема для измерения МЭП.

При вводе тока производится непрерывная регистрация величины тока через образец и напряжения на измерительном участке образца. При достижении заданного уровня тока с помощью измерительного точечного нагревателя в образце создается тепловое возмущение. Ток через нагреватель и напряжение на нем, измеренные с помощью цифрового осциллографа, показаны на рис. 3 (справа). Оцифрованные с периодом 50 нс импульсы напряжения и тока представляются в виде массивов, содержащих до 2000 точек, по которым вычисляется энергия, выделившаяся в нагревателе Q = ∫_UIdt.

Резкое увеличение напряжения на измерительном участке образца и последующее резкое затухание тока служат показателем перехода в нормальное состояние. На каждом заданном уровне тока делается серия измерений, в которой последовательным изменением величины энергии, выделяющейся в измерительном нагревателе, находят минимальную энергию, которая переводит образец кабеля в нормальное состояние.

При измерениях максимальный ток через нагреватель составлял не более 5 А. Это не оказывает заметного влияния на результат измерения, так как этот ток значительно меньше транспортного тока, протекающего по отдельной проволоке. Шаг изменения энергии в нагревателе составлял приблизительно 20%. Именно эта величина характеризует точность измерений минимальной энергии, так как инструментальная ошибка много меньше.

1.6 Результаты измерений МЭП

На **рис.** 4 приведены зависимости от тока минимальной энергии перехода в нормальное состояние для образца кабеля с Сг покрытием. Из рисунка видно, что кривые имеют два выраженных участка с различными наклонами, граница между которыми проходит при токах 5,5 – 6 кА, что соответствует 75–80% от критического тока кабеля.



Рис. 4. Зависимости минимальной энергии перехода в нормальное состояние от тока во внешнем магнитном поле 5,5, 6 и 6,5 Тл для образца кабеля из проволок, имеющих Cr покрытие.

Итоговые результаты измерений приведены на **рис. 5**, где показаны зависимости минимальной энергии перехода в нормальное состояние от тока во внешнем магнитном поле 6 Тл. Там же указаны условные обозначения нагревателей. Основные кривые соответствуют нагревателям, расположенным в центре образца. Укрупненными маркерами показаны значения минимальной энергии перехода, полученные при использовании нагревателей немного смещенных от центра образца вдоль кабеля. Ток выражен в относительных единицах, где нормировка производилась на критический ток кабеля, рассчитанный на основе измерений критического тока одиночной проволоки, выплетенной из исходного кабеля, из которого изготавливались образцы.



Рис. 5. Зависимости минимальной энергии перехода в нормальное состояние от тока во внешнем магнитном поле 6 Тл для образцов кабеля с Сг и Ni покрытием и с естественной окисной пленкой на поверхности проволок.

2. Методика и результаты измерения критических характеристик сильноточных СП-образцов

Первичная обмотка СП-трансформатора и СП-соленоид включались от отдельных маломощных (менее 1 кВт) источников стабилизированного тока. Измерение характеристик СП-образца проводилось при фиксированном значении внешнего магнитного поля, направленного перпендикулярно широкой поверхности кабеля. Для удвоения максимального

значения тока вторичного СП-контура применена оригинальная методика двухполярного режима работы источника питания. В первичную обмотку СП-трансформатора вводится максимально допустимый ток (95 A), по его достижении следует пауза, во время которой включается нагреватель, расположенный поверх вторичной обмотки трансформатора. Нагреватель, в качестве которого использовался тензорезистор с сопротивлением 100 Ом, переводит вторичный СП-контур в нормальное состояние и способствует уничтожению остаточных токов. Далее следует линейное убывание тока первичной обмотки до нуля и последующий ввод тока противоположного направления, что позволяет достигнуть во вторичном контуре ток в два раза выше, чем при использовании однополярного источника питания. В ходе процесса проводится запись напряжения с потенциальных выводов СП-образца в функции тока, измеряемого с помощью тороидальной катушки, подключенной к интегратору.

Рис. 6 показывает зависимости критического тока СП-кабеля, изготовленного из 19 проволок с оксидным покрытием, от магнитного поля. Для сравнения на график нанесены значения 19×Ic(B), полученные из вольт-амперных характеристик, измеренных с различной чувствительностью для отдельной проволоки, извлеченной из кабеля.



Рис. 6. Зависимость критического тока СП-кабеля, изготовленного из 19 проволок с оксидным покрытием, от магнитного поля.

3. Результаты измерений контактных сопротивлений

Для проведения расчетов МЭП кабеля необходимо знать значения контактных сопротивлений между проволоками в СП-кабеле.

Были проведены измерения для кабеля, изготовленного из проволок с Ni и Cr поверхностью (в обоих случаях толщина покрытия 2 мкм), а также из проволок, имеющих на поверхности естественную оксидную пленку.

Для измерения контактных сопротивлений между проволоками СП-кабеля использовалась методика, представленная в работе [9]. Измерения проводились на вырезанных из кабеля образцах, длина которых равна половине шага транспонирования.

Все образцы кабелей изготавливались по одной схеме:

- При формировании пакета куски кабеля, имеющие в сечении форму трапеции, укладывались так, чтобы пакет имел в сечении прямоугольную форму.
- Пакеты задавливались в пресс-форме до давления 60–80 МПа и затем запекались при выбранном температурном режиме (подъем температуры до 190°С за 50 минут, пауза 10 минут, спад температуры до 20°С за 50 минут). Из прошедших термообработку пакетов вырезались исследуемые образцы длиной 31 мм.

При измерениях образцы нагружались с помощью устройства, позволяющего создавать на образцах усилие до 2,3×10⁴ H, что соответствовало давлению 86 МПа при температуре 4,2 К.

Значения контактных сопротивлений между проволоками кабеля, измеренные при давлении 80 МПа, приведены в **табл. 3**. При давлениях, больших 30 МПа, сопротивление практически не изменяется. При 80 МПа и температуре 4,2 К средние значения поперечного сопротивления R_c кабелей с покрытиями проволоки из Cr, Ni и естественного оксида составили 28; 11 и 44 мОм соответственно.

	Сопротивление между проволоками кабеля, мОм		
Номер образца			
	Хромовое	Никелевое	Оксидное
	покрытие	покрытие	покрытие
1	41	13	20
2	26	13	84
3	18	8	54
4		10	19
Среднее значение	28	11	44
Разброс значений	12	4	25

<u>Таблица 3.</u> Поперечное сопротивление между проволоками СП-кабеля при давлении 80 МПа и температуре 4,2 К.

Табл. 3 показывает, что наибольшее поперечное сопротивление имеет оксидное покрытие, а наименьшее – никелевое. Но, как уже отмечалось, оксид механически нестабилен, что приводит к большому разбросу удельных контактных сопротивлений, а также к повреждению самого покрытия.

4. Численное моделирование МЭП в СП-кабеле Резерфордовского типа

Вычисления МЭП в СП-кабеле требуют разработки сопряженных нестационарных и нелинейных электромагнитных и тепло-гидравлических моделей, детализированных под конкретный вид СП-кабеля. В последнее время большие усилия были посвящены разработке таких моделей и исследованию МЭП в СП-кабелях Резерфордовского типа, используемых в СП-магнитах для ускорителей [10–13]. В ИФВЭ разработаны нестационарная, нелинейная математическая модель и компьютерная программа для сопряженного численного моделирования электромагнитных и тепловых процессов в СП-кабеле Резерфордовского типа. Программа позволяет выполнить анализ электромагнитных и тепловых процессов в течение инициирования перехода в нормальное состояние в таком кабеле.

4.1 Математическая модель

Математическая модель состоит из двух частей: электромагнитной и тепловой.

Электромагнитная модель транспонированного СП-кабеля Резерфордовского типа основана на electrical-network model (ENM), которая детально описана в работе [13]. Кабель длиной Lсодержит четное число проволок N_s и имеет шаг транспонирования L_p . Кабель можно разделить на N_b участков, которые подобны по длине; каждый участок можно разбить на ряд так называемых подсетей (subnetworks). Внутри каждой подсети электрические контакты между скрещивающимися проволоками из разных слоев и токов между соседними проволоками в слое моделируются контактными сопротивлениями R_c и R_a соответственно; каждая секция проволоки в подсети моделируется сопротивлением и индуктивностью; каждая секция проволоки соединена с другими секциями кабеля взаимоиндуктивностями.

ENM может быть описана следующими уравнениями:

$$\sum_{j=1}^{N_a} I_{a,j} R_{a,j} + \sum_{j=1}^{N_c} I_{c,j} R_{c,j} + \sum_{j=1}^{N_s} \delta U_{s,j} = \frac{dB}{dt},$$

$$\sum I_a + \sum I_c + \sum I_s = 0,$$
(1)

где t – время; I_s и I_a – векторы токов в проволоках и между соседними проволоками в слое; I_c – вектор токов между скрещивающимися проволоками из разных слоев; В – магнитное поле в проволоках. Падение напряжения на проволоке определяется выражением

$$\delta U_{s,j}(t,z) = V_R(I_{s,j}) + \sum_{i=1}^N M_j^i \frac{dI_{s,j}}{dt} \,.$$
⁽²⁾

Резистивная часть определяется выражением

$$V_{R}(I_{s,j}) = U_{c} \left(\frac{I_{s,j}}{I_{c,j}(T,B)} \right)^{n},$$
(3)

z – координата вдоль проволоки; M_i^i – матрица индуктивностей и взаимоиндуктивностей проволок; $I_c(T,B)$ – вектор критических токов в проволоках, при напряжении $U_c = 1 \mu$ В/см; n – показатель степенной зависимости. Для NbTi *n* расположено в диапазоне 30-50.

Для определения зависимости плотности критического тока от магнитного поля и температуры для NbTi сверхпроводников используются выражения

$$J_{c}(T,B) = J_{c}(T_{0},B) \cdot \left(\frac{T - T_{c}(B)}{T_{0} - T_{c}(B)}\right), \ J_{c}(T_{0},B) = J_{c}(T_{0},5T) \cdot B^{-0.38} \left(1 - \frac{B}{10.39}\right)^{0.816},$$
(4)

 $T_c(B) = 9.2 \cdot \left(1 - \frac{B}{14.5}\right)^{0.52}$; $J_c(T_0, 5T)$ – плотность критического тока в поле 5 T при температуре T0 = 4.2 K.

Тепловая часть может быть сформулирована следующими уравнениями для каждой проволоки кабеля и гелия:

$$(c\rho S)_{i} \frac{\partial T_{i}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left((\lambda S)_{i} \frac{\partial T_{i}}{\partial z} \right) - \sum_{k} (kP(z))_{i}^{k} (T_{i} - T_{k}) - \sum_{j} (\alpha \Pi(z))_{i}^{j} (T_{i} - U_{j}) + q_{i} (I_{s}, T, B) + q_{iac} + q_{ini} (z, \tau)$$

$$(\rho S)_{j} \left(\frac{\partial H_{j}}{\partial \tau} \right) = \sum_{i} (\alpha \Pi(z))_{i}^{j} (T_{i} - U_{j})$$

$$(5)$$

где $c_i = c(T_i, B_i); \lambda_i = \lambda(T_i, B_i); \rho_i = \rho(T_i, B_i)$ – усредненные по сечению теплоемкость теплопроводность и плотность проволоки. Для учета зависимости удельного сопротивления меди от продольной и поперечной составляющей магнитного поля используется выражение

$$\frac{\rho_l}{\rho_0} = 1 + 2.9 \times 10^{-3} (B_k r - 30)^{\gamma}, \tag{6}$$

где B_k – продольная и поперечная составляющие магнитного поля; $\gamma = 1$ или 0,9 соответственно для этих компонент магнитного поля; ρ_0 – удельное сопротивление меди в отсутствии магнитного; r – отношение сопротивлений меди при комнатной и гелиевой температурах (RRR); S_i – поперечное сечение проволоки; P_i – периметр теплового контакта между соседними проволоками; P_i является функцией координат; $q_i(I_s, T, B) = I_{s,i} \cdot V_R(I_{s,i})$ – плотность

тепловыделений в проволоке; q_{iac} – плотность тепловыделений на контактных сопротивлениях R_c и R_a ; q_{ini} – плотность начального теплового возмущения; k – коэффициент теплопередачи между контактирующими проволоками,

$$k = (1/k_{cont} + (d/2)/\lambda(T_i) + (d/2)/\lambda(T_k))^{-1} , \qquad (7)$$

d – диаметр проволоки, а *k_{cont}* – тепловая проводимость контакта, определяемая выражением:

$$k_{cont} = xT^b. ag{8}$$

Типичные значения для коэффициентов x 50–1000 W/m²/K^(1+b) и b = 1,5-2,5 [10]; U и H – температура и энтальпия гелия; Π_i – периметр теплового контакта между проволоками и гелием; $\alpha_i^{j}(T_i, U_j)$ – коэффициент теплоотдачи от проволок к гелию.

В разработанной программе коэффициент теплоотдачи $\alpha_i^j(T_i, U_j)$ к гелию моделируется соответственно работе [14]. Коэффициент теплоотдачи к гелию подразделяется на нестационарный режим

$$\boldsymbol{\alpha}_{i}^{j}(T_{i}, U_{j}) = \boldsymbol{\alpha}_{trans}(T_{i}^{n} - U_{j}^{n}) \cdot \boldsymbol{\Pi}_{i}, \qquad (9)$$

(типичные значения коэффициентов $\alpha_{trans} = 25-200$ и n = 4) и три режима стационарной теплоотдачи: конвекция, пузырьковое и пленочное кипение, определяемые уравнениями, аналогичными (8) с соответствующими коэффициентами α и n. Процентное содержание гелия в кабеле от 7 до 12%. Дискретизация элементов в тепловой модели соответствует электромагнитной модели.

Разработанная программа одновременно решает тепловую и электромагнитную задачи конечно-разностным методом. Для решения системы алгебраических уравнений используется метод матричной прогонки. Код написан на языке С++.

Так как имеется нелинейное поведение напряжения в проволоках, тепловыделений в проволоках, теплоемкость, теплопроводность и плотность кабеля, тепловых потоков между соседними проволоками и в гелий, используются итерационные алгоритмы на каждом временном шаге. Например, для нахождения напряжений в проволоке используется метод секущих в сочетании с методом бисекции. Типичные требования к точности 10^{-3} А для токов и 10^{-4} К – для температур [10]. Входные параметры кабеля, такие как контактные сопротивления, критический ток, коэффициент теплоотдачи к гелию и т.д., могут меняться вдоль длины и ширины кабеля. Также все типичные неоднородности в кабеле, такие как пайка отдельных проволок, соединения кабеля, деградация критического тока из-за деформации кабеля, могут быть смоделированы. Все характеристики проволок могут меняться от проволоки к проволоке.

4.2 Расчет МЭП в СП-кабеле

Все расчеты МЭП СП-кабеля с параметрами, приведенными в табл. 1, проведены при следующих условиях: охлаждение жидким гелием при температуре 4,2 К; магнитное поле 6 Тл; RRR = 70.

4.2.1 Адиабатические условия

В адиабатических условиях (без учета теплообмена СП-кабеля с гелием) исследовано влияния на МЭП теплового и электрического контактов между проволоками в кабеле. Для этого были проведены вычисления МЭП для различных значений теплопередачи между проволоками и электрических контактных сопротивлений. Расчеты сделаны для кабеля большой длины. Для расчета теплопередачи между проволоками использовались значения коэффициентов в уравнении (8) x = 50 и 500 Вт/м²/K^(1+b), при b = 2,25. Для каждого варианта

теплопередачи между проволоками рассматривались значения $R_c = R_a = 1$; 10 и 50 мОм, характерные для кабеля с резистивным покрытием.

На рис. 7 показаны расчетные значения МЭП одной проволоки, из которой сделан кабель, и кабеля в зависимости от отношения транспортного тока к критическому току. Из рисунка видно, что для кабеля с резистивным покрытием при низкой теплопередаче между проволоками (x = 50) и R_c>1 мОм МЭП кабеля практически равна МЭП одной проволоки.



Рис. 7. Расчетные значения МЭП в зависимости от *I/I_c* для различных тепловых и электрических контактов.

На рис. 8 в качестве примера показаны результаты расчета МЭП кабеля, сделанного из аналогичных проволок, но с проставкой и без резистивного покрытия. Рассматривались характерные значения электрических контактных сопротивлений для данного случая: $R_a = 20$, 200 мкОм и $R_c = 20$ мОм. Для расчета теплопередачи между проволоками использовались значения коэффициентов в уравнении (8) x = 50 и 500 Вт/м²/К^(1+b) при b = 2,25. Видно, что низкое R_a , в кабеле с проставкой обеспечивает перераспределение токов между проволоками и соответственно более высокую МЭП по сравнению с кабелем из проволок с резистивным покрытием.



Рис. 8. Расчетные значения МЭП в зависимости от *I*/*I*_c для различных тепловых и электрических контактов.

На рис. 9 для сравнения показана МЭП кабеля с проставкой ($R_a = 200$ мкОм и $R_c = 20$ мОм), и без проставки ($R_a = R_c = 10$ мОм) для двух случаев теплопередачи между проволоками.



Рис. 9. Расчетные значения МЭП в зависимости от *I*/*I*_c для кабеля с проставкой и без проставки для различных тепловых контактов.

4.2.2 Влияние условий охлаждения на МЭП кабеля

Жидкий гелий в СП-кабеле увеличивает величину МЭП. Вычисления показали, что МЭП сильно зависит от поверхности контакта и коэффициента теплоотдачи от проволок к гелию и слабо зависит от процентного содержания гелия в кабеле. В расчете принято, что каждая проволока имеет 25% поверхности, контактирующей с гелием, сопротивление между проволоками в месте спая образца со вторичной обмоткой СП-трансформатора равно $R_c = R_a =$ 20 мкОм. Значение коэффициента теплоотдачи к кипящему гелию при нестационарном режиме зависит от состояния поверхности, для кабеля с резистивным покрытием вероятным значением α_{trans} в уравнении (9) является 50 Вт/м²/К⁴ [15]. На **рис. 10** показаны расчетные значения МЭП и измеренные для образца с Ni покрытием в зависимости от тока в кабеле. Видно, что расчетные значения МЭП для адиабатного случая (а) в несколько раз меньше, чем в варианте, учитывающем гелий под электрической изоляцией кабеля (b). Представленные на рисунке измеренные значения МЭП для кабеля с никелевым покрытием имеют более высокую величину по сравнению с вариантом (b). Результаты расчета (c) показали, что вследствие небольшой длины измерительной части образца (40 мм) во время перехода образца в нормальное состояние имеется дополнительное перераспределение токов в образце через места его пайки со вторичной обмоткой СП-трансформатора, что внесло заметную ошибку в измерения МЭП.



Рис. 10. Зависимость МЭП от тока образца в магнитном поле 6 Тл и охлаждении кипящим гелием. Расчет: \mathbf{a} – адиабатный случай; \mathbf{b} – с учетом гелия в кабеле; \mathbf{c} – с учетом гелия и перераспределения токов на концах образца. Результаты измерений представлены для образца с Ni покрытием проволок кабеля.

Заключение

- Разработана методика измерений минимальной энергии, переводящей СП-кабель в нормальное состояние. На основе методики создана установка, включающая СП-соленоид и содержащая СП-трансформатор, позволяющий получить ток до 15 кА во вторичном СПконтуре при использовании маломощного биполярного источника питания ±100 A, 10 B.
- Проведено изучение характеристик СП-кабеля из 19 проводов диаметром 0,85 мм на основе сплава NbTi с разным покрытием поверхности Ni, Cr, оксид при импульсном точечном нагреве отдельного провода на измерительном участке изолированного кабеля.
- Поперечное сопротивление трапециевидных кабелей из проволок, покрытых Cr, лежит в пределах 18–41 мОм, из проволок покрытых Ni – в пределах 8–13 мОм. Такие величины поперечных сопротивлений обеспечат низкие кабельные потери в магнитах в циклах магнитного поля со скоростью его изменения dB/dt = 1 Тл/с.
- Разработаны нестационарная нелинейная математическая модель и программа для сопряженного численного моделирования электромагнитных и тепловых процессов в СП-кабеле Резерфордовского типа. Разработанная модель удовлетворительно описывает измеренные результаты. Проведены исследования зависимости МЭП для различных тепловых и электрических контактов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ N 06-024-01643.

Список литературы

- [1] A. I. Ageev et al. "Development of Superconducting Dipole Design for Creation of Fast-Cycling Magnetic Fields". Proc. of 18 Int. Conf. on Magnet Technology, Morioka, Japan, 2003.
- [2] I. Bogdanov et al. "Methods for Reducing Cable Losses in Fast-Cycling Dipoles for the SIS300 Ring." European Particle Accelerator Conference EPAC 2004, Lucerne, Switzerland, 2004, pp. 1750-1752.
- [3] A. Ghosh, W. Sampson, M. Wilson, "Minimum quench energies of Rutherford cables and single wires", IEEE Trans. Appl. Supercond. v. 7, p. 1051, 1997.
- [4] Wilson M.N et al. "Cored Rutherford cables for the GSI fast ramping synchrotron". IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Volume 13, Issue 2, June 2003 Page(s): 1704 1709, BNL-69394.
- [5] G. Moritz et al. "Recent Test Results of the Fast-Pulsed 4 T Cosθ Dipole GSI 001". Proceedings of 2005 Particle Accelerator Conference, Knoxville, Tennessee, 2005.
- [6] Т. Мелишек, Л.С. Ширшов. Аппаратура для измерения зависимости критического тока сильноточных сверхпроводников от температуры и магнитного поля. Препринт ИФВЭ 85-161, Серпухов, 1985.
- [7] A. Kumura et al., "Stabilities of Rutherford cables with CuNi matrix and CuMn barrier", IEEE Trans. Appl. Supercond. v. 5, p. 385, 1995.
- [8] Bauer P. et al. "Tip Heater for Minimum Quench Energy Measurements on Superconducting Strands", LHC Project Report 248, Geneva, Switzerland, 1998.
- [9] И.В. Богданов и др. Измерение контактных сопротивлений между жилами в СП- кабеле для магнитов УНК. Препринт ИФВЭ 93-112, Протвино, 1993.
- [10] A. Verweij. "A model for calculation of electrodynamics and thermal behavior of superconducting Rutherford cables". Cryogenics, v. 46, no 7-8, pp. 619-626.
- [11] M. Breschi et al. "Quench propagation and stability analysis of Rutherford resistive core cables". Cryogenics, v. 46, no. 7-8, pp 606-614, 2006.
- [12] M. Wilson, R. Wolf. "Calculation of Minimum Quench Energies in Rutherford Cables". IEEE Trans on Appl SC, pp. 950-953, 1997.
- [13] A. Verweij. "Electrodynamics of Superconducting Cables in Accelerator Magnets". PhD Thesis, University of Twente, 1995.
- [14] C. Schmidt. "Review of steady state and transient heat transfer in pool boiling helium I" (In: Stability of Superconductors, Internat. Inst. of Refrig. Comission A, Saclay, France) 1981.
- [15] G. Willering, A. Verweij, J. Kaugerts, H.H.J. ten Kate. "Stability of Nb-Ti Rutherford Cables Exhibiting Different Contact Resistances". MT20, Philadelphia, USA, 2007.

Рукопись поступила 12 декабря 2008 г.

И.В. Богданов и др.

Исследование стабильности сильноточного сверхпроводящего токонесущего элемента для магнитов ускорителей заряженных частиц.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы Word.

Редактор Н.В.Ежела.

Подписано к печати16.12.2008.Формат 60 × 84/8.Офсетная печать.Печ.л. 1, 75.Уч.- изд.л. 1,6.Тираж 90.Заказ 99.Индекс 3649.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, 142284, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2008–26, ИФВЭ, 2008