

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **045101**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2023.10.30

(51) Int. Cl. **H01F 6/06** (2006.01)

(21) Номер заявки
202192432

(22) Дата подачи заявки
2020.03.06

(54) **НАСЫЩЕННЫЕ ТОКОМ ПЕРЕНОСА ВТСП-МАГНИТЫ**

(31) **1902995.8; 1910268.0**

(32) **2019.03.06; 2019.07.18**

(33) **GB**

(43) **2021.11.11**

(86) **PCT/GB2020/050531**

(87) **WO 2020/178594 2020.09.10**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
ТОКЕМЕК ЭНЕРДЖИ ЛТД (GB)

(72) Изобретатель:
**Бриттлс Грег, Слэйд Роберт, Бэйтман
Род (GB)**

(74) Представитель:
Медведев В.Н. (RU)

(56) SONG JUNG-BIN ET AL. "Dynamic Response of No-Insulation and Partial-Insulation Coils for HTS Wind Power Generator", IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, IEEE SERVICE CENTER, LOS ALAMITOS, CA, US, vol. 25, no. 3, 1 June 2015 (2015-06-01), pages 1-5, XP011573663, ISSN: 1051-8223, DOI: 10.1109/TASC.2014.2384739, [retrieved on 2015-02-19], Abstract, Table I, Paragraphs II, IV. C figures 2, 4(b), 7 Conclusion

US-A1-2015213930

EP-A2-1895604

YANAGISAWA Y. ET AL. "Effect of coil current sweep cycle and temperature change cycle on the screening current-induced magnetic field for Ybco-coated conductor coils", ADVANCES IN CRYOGENIC ENGINEERING, VOLUME 57 : TRANSACTIONS OF THE CRYOGENIC ENGINEERING CONFERENCE - CEC ; SPOKANE, WASHINGTON, USA, 13 - 17 JUNE 2011, AIP, AMERICAN INST. OF PHYSICS, MELVILLE, NY; THE INSTITUTION OF ELECTRICAL ENGINEERS, STEVENAGE, vol. 1434, no. 1, 13 June 2012 (2012-06-13), pages 1373-1380, XP002752031, DOI: 10.1063/1.4707063 ISBN: 978-0-7354-1020-6, Abstract, Experimental figure 2(a) "Effect of current sweep reversal with coil temperature cycles", particularly last full sentence on page 1379

US-A1-2004266628

(57) **Высокотемпературная сверхпроводящая, ВТСП, магнитная система. ВТСП-магнитная система содержит ВТСП-катушку возбуждения, систему регулирования температуры, источник питания и контроллер. ВТСП-катушка возбуждения содержит множество витков, содержащих ВТСП-материал; и резистивный материал, электрически соединяющий витки, так что ток может распределяться радиально между витками через резистивный материал. Система регулирования температуры выполнена с возможностью регулировать температуру катушки, причем система регулирования температуры содержит по меньшей мере криогенную систему охлаждения, выполненную с возможностью поддерживать катушку ниже критической температуры собственного поля ВТСП-материала. Источник питания выполнен с возможностью подавать ток к ВТСП-катушке возбуждения. Контроллер выполнен с возможностью предписывать источнику питания предоставлять ток больше критического тока всего ВТСП-материала.**

045101 B1

045101 B1

Область техники, к которой относится изобретение

Изобретение относится к высокотемпературным сверхпроводящим (HTS, ВТСП) магнитам. В частности, настоящее изобретение относится к способам работы с такими магнитами и к магнитам, реализующим способы.

Уровень техники

Сверхпроводящие материалы типично делятся на "высокотемпературные сверхпроводники" (HTS, ВТСП) и "низкотемпературные сверхпроводники" (LTS, НТСП). НТСП-материалы, такие как Nb и NbTi, являются металлами или сплавами металлов, чья сверхпроводимость может быть описана теорией БКШ (Бардина - Купера - Шриффера). Все низкотемпературные сверхпроводники имеют критическую температуру собственного поля (температуру, выше которой материал не может быть сверхпроводящим даже в нулевом внешнем магнитном поле) ниже приблизительно 30 К. Поведение ВТСП-материала не описывается посредством теории БКШ, и такие материалы могут иметь критические температуры собственного поля выше приблизительно 30 К (хотя следует отметить, что физические различия в сверхпроводящем действии и составе, а не критическая температура собственного поля, определяют ВТСП- и НТСП-материал). Наиболее часто используемыми ВТСП являются "купратные сверхпроводники" - керамики на основе купратов (составов, содержащих группу оксида меди), такие как BSCCO, или ReBCO (где Re - это редкоземельный элемент, обычно Y или Gd). Другие ВТСП-материалы включают в себя пниктиды железа (например, FeAs и FeSe) и диборат магния (MgB₂).

ReBCO типично производятся как ленты, со структурой, показанной на фиг. 1. Такая лента 100, как правило, имеет толщину приблизительно 100 микрон и включает в себя подложку 101 (типично электрополированный сплав хастелой толщиной приблизительно 50 микрон), на который наносится посредством IBAD, магнетронного распыления или другого подходящего способа последовательность буферных слоев, известных как буферный пакет 102, приблизительно толщиной 0,2 микрона. Эпитаксиальный ReBCO ВТСП-слой 103 (нанесенный посредством MOCVD или другого подходящего способа) покрывает буферный пакет и типично имеет толщину 1 микрон. 1-2-микронный слой 104 серебра наносится на ВТСП-слой посредством распыления или другого подходящего способа, и медный слой 105 стабилизатора наносится на ленту посредством электролитического осаждения или другим подходящим способом, который часто полностью обволакивает ленту.

Подложка 101 обеспечивает механическую опору, которая может подаваться по производственной линии и предоставлять возможность наращивания последующих слоев. Буферный пакет 102 требуется, чтобы предоставлять биаксиально текстурированный кристаллический шаблон, на котором необходимо выращивать ВТСП-слой, и предотвращает химическую диффузию элементов из подложки в ВТСП, которая повреждает его сверхпроводящие свойства. Слой 104 серебра требуется, чтобы обеспечивать переход низкого сопротивления от ReBCO к слою стабилизатора, а слой 105 стабилизатора обеспечивает путь переменного тока в случае, когда какая-либо часть ReBCO перестает быть сверхпроводящей (входит в "обычное" состояние).

Кроме того, может быть произведена "расслоенная" ВТСП-лента, которая не имеет подложки и буферного пакета, а вместо этого имеет слои серебра на обеих сторонах ВТСП-слоя. Лента, которая имеет подложку, будет называться ВТСП-лентой "с подложкой".

ВТСП-ленты могут быть скомпонованы в ВТСП-кабели. ВТСП-кабель содержит одну или более ВТСП-лент, которые соединяются по своей длине через токопроводящий материал (обычно медь). ВТСП-ленты могут быть уложены друг на друга (т.е., скомпонованы так, что ВТСП-слои являются параллельными), или они могут иметь некоторую другую компоновку лент, которая может изменяться по длине кабеля. Примечательными особыми случаями ВТСП-кабелей являются одиночные ВТСП-ленты и ВТСП-пары. ВТСП-пары содержат пару ВТСП-лент, размещенных так, что ВТСП-слои являются параллельными. Когда используется лента с подложкой, ВТСП-пары могут быть типом-0 (с ВТСП-слоями, обращенными друг к другу), типом-1 (с ВТСП-слоем одной ленты, обращенным к подложке другой) или типом-2 (с подложками, обращенными друг к другу). Кабели, содержащие более 2 лент, могут размещать некоторые или все ленты в ВТСП-парах. Уложенные друг на друга ВТСП-ленты могут содержать различные компоновки ВТСП-пар, чаще всего либо пакет пар типа-1, либо пакет пар типа-0 и (или, эквивалентно, пар типа-2). ВТСП-кабели могут содержать смесь имеющих подложку и расслоенных лент.

Сверхпроводящий магнит формируется посредством размещения ВТСП-кабелей (или отдельных ВТСП-лент, которые в целях этого описания могут рассматриваться как одноленточный кабель) в катушки, либо посредством намотки ВТСП-кабелей, либо посредством предоставления секций катушки, выполненных из ВТСП-кабелей, и соединений их вместе. ВТСП-катушки бывают в трех широких классах: изолированные, имеющие электроизоляционный материал между витками (так что ток может протекать только по "спиральному пути" по ВТСП-кабелям);

неизолированные, где витки являются электрически соединенными радиально, также как вдоль кабелей;

частично изолированные, где витки соединяются радиально с регулируемым сопротивлением, либо посредством использования материалов с высоким сопротивлением (например, по сравнению с медью),

либо посредством предоставления прерывистой изоляции между катушками.

Неизолированные катушки могут также рассматриваться как случай низкого сопротивления для частично изолированных катушек.

В последующем обсуждении магнит определяется как содержащий множество ВТСП-катушек, соединенных последовательно. Будут резистивные соединения между катушками. Катушки сами могут быть полностью сверхпроводящими, или, если сконструированы из кабелей, содержащих многочисленные отрезки отдельной ВТСП-ленты, соединенные последовательно и параллельно, они могут иметь небольшое, но ненулевое сопротивление. Магнит будет, следовательно, иметь индуктивность L , определенную его геометрией, накопленной энергией и числом витков, и остаточное сопротивление R . Характеристическая постоянная времени зарядки магнита, следовательно, равна L/R .

Снабжение энергией или зарядка неизолированного или частично изолированного ВТСП-магнита является более сложным по сравнению со снабжением энергией полностью изолированной катушки, поскольку ток может иметь два пути, либо вокруг по спиральному пути с высокой индукцией, либо через радиальный путь с низкой индукцией. Спиральный путь имеет ничтожное сопротивление, когда катушка является полностью сверхпроводящей, в то время как радиальный путь имеет сопротивление. Во время снабжения энергией (т.е., линейного изменения характеристики катушки посредством приложения напряжения от источника питания к клеммам, чтобы возбуждать ток переноса), индуктивное напряжение, образуемое изменяющимся током на спиральном пути, будет возбуждать некоторую часть тока источника питания в радиальном пути. Точное разделение в токе может быть вычислено, как известно в уровне техники. Если скорость линейного изменения увеличивается, больший ток протекает по радиальному пути, вызывая больший нагрев. В больших катушках максимальная скорость линейного изменения будет задаваться по доступной мощности охлаждения, т.е.: нагрев, вызываемый радиальным протеканием тока во время линейного изменения, не должен вызывать увеличение температуры катушки настолько сильно, что она становится несверхпроводящей.

После линейного изменения напряжение источника питания падает до уровня, необходимого, чтобы лишь возбуждать ток через остаточное сопротивление спирального пути магнита. Магнит тогда входит в "фазу стабилизации", когда магнит поддерживается при рабочем токе в течение достаточного времени, чтобы магнитное поле стабилизировалось.

Нестабильности в магнитном поле возникают от паразитных токов, индуцируемых в магните (в дополнение к желаемому току переноса), каждый из которых вносит вклад в магнитное поле магнита. Эти токи бывают трех типов:

"Вихревые токи", которые являются замкнутыми контурами тока, индуцируемого в несверхпроводящих ("обычных") компонентах.

"Соединяющие токи", которые являются замкнутыми контурами тока, индуцируемого в соседних сверхпроводящих компонентах, соединенных обычной средой - они протекают по одному сверхпроводящему компоненту, через обычную среду, и затем по другому сверхпроводящему компоненту и обратно через обычную среду, чтобы завершать контур.

"Экранирующие токи", также известные как "гистерезисные токи", которые являются замкнутыми контурами тока, протекающего исключительно в сверхпроводящем материале.

Фраза "замкнутый контур тока" означает, что ток протекает полностью в указанном материале(ах) и не начинается или завершается в источнике питания или токовых вводах.

В прикладных задачах с "устойчивым состоянием", когда магнитное поле магнита не изменяется быстро, вихревые токи и соединяющие токи будут быстро затухать (экспоненциально, с временной константой порядка нескольких секунд), вследствие сопротивления материалов, через которые они движутся. Однако, экранирующие токи будут сохраняться неопределенно долго и изменяться в течение длительных временных рамок (с временной константой порядка минут, часов или даже месяцев). Экранирующие токи также зависят от истории линейного изменения характеристики магнита - это означает, что магнит с быстро нарастающей линейной характеристикой будет иметь отличающиеся экранирующие токи (и, следовательно, отличающееся качество магнитного поля) по сравнению с идентичным магнитом с медленно нарастающей линейной характеристикой, и что магнит, выполненный с возможностью создавать 5T, которая линейно нарастает из состояния нулевого тока, будет иметь отличающееся качество поля по сравнению с тем же магнитом с нарастающей линейной характеристикой из предыдущего устойчивого состояния 3T.

Магнитное поле, формируемое сверхпроводящим магнитом, следовательно, зависит от его предыдущей истории линейного изменения характеристики. Возможно сбрасывать магнит в исходное состояние без экранирующих токов посредством повышения его температуры выше температуры перехода в сверхпроводящее состояние.

Эффект экранирующий токов, в частности, явно выражен в ВТСП-магнитах, использующих ленты ReBCO или BSCCO, поскольку большой размер сверхпроводящих волокон предоставляет возможность формирования более значительных экранирующих токов. Загрязняющее магнитное "экранирующее поле", создаваемое экранирующими токами, является серьезной проблемой для применения в существующей технологии ВТСП-лент и катушек в прикладных задачах, которые требуют высокой однородности

поля и устойчивости, таких как ядерный магнитный резонанс (NMR) и магнитно-резонансная томография (MRI).

Существует ряд способов, чтобы уменьшать влияние экранирующих токов. Первым является линейное повышение и понижение характеристики магнита колеблющимся образом, с уменьшающейся амплитудой. Это перемешивает экранирующий ток (т.е.: создает множество контуров тока в каждой ленте). Остаточные токи имеют тенденцию нейтрализовать друг друга, уменьшая загрязнение сетчатым экранирующим полем. Родственным способом является применение колеблющегося магнитного поля от отдельного источника (известное как "дрожащее поле"). Однако оба способа являются интересными, сложными, и загрязнение остаточным экранирующим полем все еще остается на уровне, который является слишком большим для чувствительных NMR-измерений.

Текущим решением для того, чтобы справиться с остаточным экранирующим токовым полем, является "шиммирование". Процесс шиммирования магнита подразумевает измерение отклонения магнитного поля и затем наложение эквивалентного и противоположного корректирующего магнитного поля. Источник корректирующего поля может быть либо независимо снабжаемой энергией катушкой, либо массивом катушек (либо резистивных, либо сверхпроводящих), либо массивом намагниченных элементов, таких как железные пластины или постоянные магниты. Первый способ называется "активным" шиммированием, поскольку амплитуда корректирующего поля может регулироваться посредством изменения тока в шиммирующей катушке, в то время как последний является "пассивным" шиммированием, поскольку корректирующее поле является фиксированным и не может быть отрегулировано. Процесс шиммирования может нуждаться в повторении несколько раз в течение срока службы сверхпроводящего магнита, поскольку экранирующие токи изменяются со временем.

Поле, создаваемое экранирующими токами, и их время стабилизации, может также быть уменьшено посредством алгоритмов затухающего колеблющегося линейного изменения характеристики. В этом случае ток переноса повышается выше целевого значения на процент X% (например, 10%), затем понижается ниже целевого значения на процент Y%, где $Y < X$ (например, 8%), затем повышается выше целевого значения на Z%, где $Z < Y < X$ (например, 6%) и т.д. в течение определенного числа этапов до тех пор, пока целевое значение не будет достигнуто. Этот способ уменьшает влияние экранирующих токов, но не устраняет их полностью. Он также уменьшает максимальное достижимое магнитное поле, поскольку целевой ток должен быть задан ниже наименьшего критического значения тока в магните. В некоторых прикладных задачах, таких как ускорители частиц, поле должно линейно изменяться однонаправленно, исключая такие колебания поля.

В целом, ВТСП-магнит, используемый для NMR или MRI, будет требовать сочетания всех из вышеописанных корректирующих способов, чтобы добиваться пространственной однородности магнитного поля и временной устойчивости (совокупно называемых "качеством поля").

Следовательно, существует потребность в лучшем способе уменьшения или в идеале устранения экранирующих токов в ВТСП-магните.

Сущность изобретения

Согласно первому аспекту изобретения, предоставляется высокотемпературная сверхпроводящая, ВТСП, магнитная система. ВТСП-магнитная система содержит ВТСП-катушку возбуждения, систему регулирования температуры, источник питания и контроллер. ВТСП-катушка возбуждения содержит множество витков, содержащих ВТСП-материал; и резистивный материал, электрически соединяющий витки, так что ток может распределяться радиально между витками через резистивный материал. Система регулирования температуры выполнена с возможностью регулировать температуру катушки, система регулирования температуры содержит по меньшей мере криогенную систему охлаждения, выполненную с возможностью поддерживать катушку ниже критической температуры собственного поля ВТСП-материала. Источник питания выполнен с возможностью подавать ток к ВТСП-катушке возбуждения. Контроллер выполнен с возможностью предписывать источнику питания предоставлять ток больше критического тока всех ВТСП-материалов.

Согласно второму аспекту, предоставляется способ работы высокотемпературной сверхпроводящей, ВТСП, катушки возбуждения. ВТСП-катушка возбуждения содержит множество витков, содержащих ВТСП-материал, и резистивный материал, электрически соединяющий витки, так что ток может распределяться радиально между витками через резистивный материал. Ток подается к ВТСП-катушке возбуждения, так что ток переноса ВТСП-катушки возбуждения является большим по сравнению с критическим током всего ВТСП-материала. Температура ВТСП-катушки возбуждения регулируется.

Согласно третьему аспекту, предоставляется способ определения критической поверхности высокотемпературного сверхпроводящего, ВТСП, проводника. ВТСП-проводник формируется в ВТСП-катушку возбуждения, содержащую множество витков, содержащих ВТСП-проводник; и резистивный материал, электрически соединяющий витки, так что ток может распределяться радиально между витками через резистивный материал. ВТСП-катушка возбуждения работает с током переноса, который больше критического тока всего ВТСП-проводника. Температура измеряется в одной или более точках на ВТСП-катушке возбуждения. Магнитное поле, создаваемое катушкой возбуждения, измеряется. Критическая поверхность ВТСП-проводника определяется из упомянутых измерений.

Согласно четвертому аспекту, предоставляется высокотемпературная сверхпроводящая, ВТСП, магнитная система. ВТСП-магнитная система содержит множество ВТСП-катушек возбуждения, систему регулирования температуры, источник питания и контроллер. Каждая ВТСП-катушка возбуждения содержит множество витков, содержащих ВТСП-материал; и резистивный материал, электрически соединяющий витки, так что ток может распределяться радиально между витками через резистивный материал. Система регулирования температуры выполнена с возможностью регулировать температуру каждой катушки, система регулирования температуры содержит по меньшей мере криогенную систему охлаждения, выполненную с возможностью поддерживать каждую катушку ниже критической температуры собственного поля ВТСП-материала. Источник питания выполнен с возможностью подавать ток к ВТСП-катушке возбуждения. Контроллер выполнен с возможностью:

предписывать источнику питания предоставлять ток каждой катушке возбуждения, больший по сравнению с критическим током всего ВТСП-материала в ВТСП-катушках возбуждения;

предписывать системе регулирования температуры регулировать температуру каждой ВТСП-катушки и, тем самым, регулировать вклад каждой ВТСП-катушки в магнитное поле.

Согласно пятому аспекту настоящего изобретения, предоставляется способ работы высокотемпературной сверхпроводящей, ВТСП, магнитной системы. ВТСП-магнитная система содержит множество ВТСП-катушек возбуждения, каждая содержит множество витков, содержащих ВТСП-материал, и резистивный материал, электрически соединяющий витки, так что ток может распределяться радиально между витками через резистивный материал. Ток подается к каждой из ВТСП-катушек возбуждения, так что ток переноса ВТСП-катушки возбуждения является большим по сравнению с критическим током всего ВТСП-материала. ВТСП-магнитная система управляется посредством регулирования температуры каждой из ВТСП-катушек возбуждения.

Краткое описание чертежей

Фиг. 1 является схематичной иллюстрацией ВТСП-ленты;

фиг. 2 показывает результаты теста линейного повышения характеристики частично изолированной ВТСП-катушки, поддерживаемой при 77 К;

фиг. 3 показывает результаты теста линейного повышения характеристики частично изолированной ВТСП-катушки, поддерживаемой при 40 К;

фиг. 4 показывает результаты тестов линейного повышения характеристики, выполненных по ВТСП-катушке при множестве начальных температур;

фиг. 5 является схематичной иллюстрацией примерной ВТСП-магнитной системы.

Подробное описание изобретения

Экранирующие токи в ВТСП-магните возникают, поскольку ток переноса, I , меньше критического тока I_c проводника в больших частях катушки. Критический ток I_c является максимальным током, который ВТСП-проводник может переносить во время сверхпроводимости, при заданных мгновенных окружающих условиях (например, температуре, внешнем магнитном поле). Критический ток измеряется на концах магнита, поскольку магнитное поле, температура и сам ВТСП-проводник, как правило, не будут однородными. Напротив, "пиковый критический ток" ВТСП-проводника является током, который этот проводник может переносить при температуре абсолютного нуля, нулевой деформации и нулевом внешнем магнитном поле (т.е., в идеальных условиях) - это иногда называется просто "критическим током" в литературе, но это значение не используется здесь.

В настоящее время сверхпроводящие магниты работают так, что ток переноса меньше минимального критического тока в любой части магнитной катушки, чтобы предотвращать утечку тока из ВТСП-проводника. Это выполняется, поскольку любая утечка тока из ВТСП-проводника будет формировать тепло (поскольку ток теперь протекает через резистивный материал), которое будет, в свою очередь, локально повышать температуру ВТСП-проводника, дополнительно уменьшая критический ток и потенциально начиная цикл обратной связи, который может приводить в результате к гашению (ВТСП-материал нагревается до момента, когда он больше не является сверхпроводящим в "горячем пятне", и магнит сбрасывает свою энергию в несверхпроводящую область - часто вызывая повреждение магнита, если это не подавляется). Важно отметить, что магниты, созданные из катушек с намотанными многоленточными кабелями, могут работать устойчиво с локализованными горячими пятнами, где ток отклоняется вокруг локальных дефектов в отдельных лентах.

Большая часть магнита будет иметь "рабочую долю" (соотношение между током переноса и критическим током, I/I_c) меньше целого, которая предоставляет "запасную" допустимую нагрузку по току в ВТСП, которая становится занятой либо частично, либо полностью экранирующими токами. Со временем, если ток переноса сохраняется устойчивым, они будут достигать равновесия - но это типично происходит в течение очень длительной временной постоянной (порядка от минут до месяцев), частично вследствие того, что экранирующие токи протекают через среду с нулевым сопротивлением.

Предложением настоящего изобретения является работа ВТСП-магнитной катушки в другом режиме - вместо того, что ток переноса ниже минимального критического тока катушки, ток переноса больше максимального критического тока катушки (в течение всего периода работы). В результате, весь сверхпроводящий материал в катушке имеет рабочие характеристики единого целого, означающие, что экра-

нирующие токи исключаются (не существует "запасной" сверхпроводящей способности). Это состояние будет в данном документе называться "насыщенным" состоянием. Общепринятая точка зрения о ВТСП-магнитах будет подсказывать, что это является ужасной идеей - вся катушка будет в сущности одним большим горячим пятном, с утечкой тока в резистивные компоненты магнита на всем протяжении катушки, и вынуждая катушку нагреваться, требуя дополнительного охлаждения без практической пользы. Однако это было найдено возможным, если межвитковое сопротивление является достаточно низким, теплопроводность катушки достаточно высокая, и если достаточно охлаждение обеспечивается для противодействия нагреву вследствие утечки тока в обычные компоненты. Как следствие, в результате получаются несколько полезных признаков, которые предоставляют возможность ВТСП-магниту работать без влияния экранирующих токов, с более однородными условиями гашения (силы и температуры), создавая максимальное возможное поле от проводника, и с простым механизмом управления.

Новый рабочий режим является возможным только в частично изолированных (или неизолированных) катушках. Когда ток в частично изолированной катушке покидает ВТСП-проводник, он будет первоначально протекать по спиральному пути параллельно ВТСП через резистивные компоненты магнита (т.е., слои стабилизатора ВТСП-ленты, и любые резистивные компоненты, соединяющие витки). Однако, это протекание по спиральному потоку будет быстро затухать в радиальный путь (т.е., протекая радиально через резистивные компоненты) вследствие высокого сопротивления несверхпроводящего спирального пути. Это означает, что, при работе в насыщенном режиме, магнитное поле, создаваемое катушкой, зависит только от формы катушки и критического тока ВТСП в катушке - поскольку радиальное протекание тока через резистивные компоненты не будет выполнять значительный вклад в магнитное поле.

Критический ток ВТСП, в свою очередь, зависит от:

температуры ВТСП;

внешнего магнитного поля (т.е., магнитного поля не вследствие тока в ВТСП) в ВТСП;

деформации на ВТСП.

Все эти факторы будут изменяться на протяжении катушки.

Для магнита, изолированного от других источников переменного магнитного поля, внешнее магнитное поле на каждом витке катушки будет зависеть только от магнитного поля, создаваемого каждым другим витком, и если магнит также изолируется от других переменных источников искажения, тогда деформация на ленте зависит только от деформаций, которые являются результатом магнитного поля, создаваемого магнитом.

Фиг. 2 иллюстрирует поведение небольшой неизолированной плоской катушки, намотанной с помощью пары лент со всеми витками, спаянными вместе, когда она линейно изменяет характеристику в режим единичной рабочей доли, с температурой, поддерживаемой при 77 К посредством ванны жидкого азота. Ток блока источника питания (PSU) (верхний график) линейно изменяется от 0 до 400 А, и когда он достигает приблизительно 200 А, ВТСП катушки становится насыщенным - центральное магнитное поле (середина) выравнивается, и напряжение на концах катушки (нижний) начинает повышаться с PSU-током. Центральное магнитное поле остается приблизительно постоянным в течение оставшейся части линейного повышения характеристики, и во время последующего линейного понижения, до тех пор пока ток переноса не упадет ниже приблизительно 200 А, и катушка больше не будет насыщенной.

Фиг. 3 показывает результаты аналогичного испытания, выполненного на магните, содержащем пару плоских катушек, чья проводимость охлаждается с помощью криогенного охладителя, и которые управляются с помощью системы регулирования температуры, выполненной с возможностью поддерживать температуру катушки равной 40 К. Магнитное поле катушки увеличивается во время линейного повышения характеристики до тех пор, пока ток приблизительно 1,1 кА не будет достигнут. Выше этого магнитное поле остается приблизительно устойчивым, до тех пор, пока PSU-ток не превысит приблизительно 2,6 кА, на этой стадии система регулирования температуры подавляется избытком тепла, вызванного радиальной утечкой тока. Температура катушки повышается постепенно, вынуждая критический ток катушки уменьшаться, и магнитное поле, создаваемое катушкой, уменьшаться. Это происходит устойчивым образом в течение ~1000 с, до тех пор, пока критическая температура собственного поля катушки не будет достигнута, и магнитное поле достигло нуля. Источник питания затем отключается.

Фиг. 4 показывает точки нескольких линейных изменений характеристики одного и того же магнита с системой регулирования температуры, выполненной с возможностью поддерживать катушки, соответственно, при базовой температуре (нагреватель выключен), 20 К, 30 К и 40 К до тех пор, пока катушки не насытятся (в этой точке они нагреваются под действием избыточного тока, предоставляемого источником питания, который продолжает линейно повышаться). Линейное повышение показано в центральном магнитном поле - график температуры катушки (В-Т). В каждом случае линейное изменение начинается при низком магнитном поле (нижняя часть практически вертикальной линии), и магнитное поле увеличивается, когда ток переноса увеличивается, в то же время оставаясь ниже критического тока ВТСП. В верхнем фрагменте графика ток переноса начинает насыщать ВТСП, и магнитное поле "опрокидывается", когда катушка входит в насыщенный режим. В этом режиме каждое из показанных испытаний следует одинаковому соотношению В-Т между центральным магнитным полем (В) и температурой катушки (Т), независимо от истории линейного изменения характеристики катушки и точного значе-

ния подаваемого тока ("петли" в правом экстремуме каждого графика являются артефактами, получающимися в результате окончания испытания). Это отсутствие какого-либо эффекта гистерезиса возникает вследствие того, что центральное магнитное поле определяется исключительно критическим током ВТСП в катушке, без помех от экранирующих токов, которые будут присутствовать в типичном сценарии.

Температура будет иметь тенденцию изменяться на протяжении магнита - например, области с более низким критическим током будут испытывать больший ток, проходящий через соседний резистивный материал, и, следовательно, больший нагрев, и охлаждение будет зависеть от теплопроводности материалов, формирующих катушку, и компоновки системы охлаждения, но эта модель будет, в общем, приводить в результате к согласующемуся температурному профилю.

Если характеристическая температура выбирается, чтобы представлять температурный профиль повсюду в магните (например, температура в конкретной точке на магните, или среднее значение температуры в нескольких таких точках), тогда может быть показано (и продемонстрировано экспериментальным образом, см. фиг. 4), что поле, создаваемое магнитом в насыщенном режиме, зависит только от этой температуры.

В то время как ВТСП-материал остается сверхпроводящим повсюду в магните (т.е., минимальный критический ток ВТСП не падает до 0), соотношение между характеристической температурой и напряженностью магнитного поля является таким, что увеличение в температуре приводит в результате к уменьшению магнитного поля, как показано на фиг. 4.

При работе в насыщенном режиме поле ВТСП-магнита может уменьшаться монотонно посредством нагрева катушки от низкой температуры (максимальное поле) по направлению к критической температуре магнита (нулевое поле). Частота колебаний поля, dV/dt задается посредством скорости нагрева, dT_{magnet}/dt . В этом состоянии поле может изменяться более быстро по сравнению с электромагнитной временной константой магнита, $\tau=L/R$, где L является индуктивностью магнита, а R является радиальным сопротивлением, которая часто является чрезмерно долгой. В этом режиме накопленная энергия магнита рассеивается в качестве тепла в катушке, и максимальная разрешенная частота колебания поля определяется полностью посредством теплового расчета (т.е., насколько быстро температура может изменяться). Аналогично, ускоренные частоты колебания поля могут быть достигнуты для монотонного увеличения магнитного поля, посредством быстрого охлаждения магнита и одновременного предоставления излишка тока источника питания, так что магнит остается в насыщенном режиме.

При работе в этом режиме в катушке не существуют экранирующие токи, таким образом, только задержки в изменении магнитного поля являются временем, затрачиваемым для того, чтобы магнит нагревался или охлаждался, и временем, затрачиваемым для того, чтобы токи в резистивном спиральном пути затухали внутрь радиального пути. Они оба являются параметрами, которые могут управляться посредством соответствующих тепловых и электрических расчетов катушки, и в показанных примерах имеют временные рамки порядка десятков минут при 20 К.

Магнит может, следовательно, управляться посредством либо мониторинга характеристической температуры магнита, либо мониторинга непосредственно магнитного поля, и нагрева или охлаждения магнита, чтобы добиваться желаемого магнитного поля. Нагрев магнита будет уменьшать критический ток ВТСП, и, следовательно, напряженность магнитного поля, а охлаждение магнита будет увеличивать критический ток ВТСП, и, следовательно, напряженность магнитного поля.

Когда осуществляется мониторинг только температуры, соотношение между характеристической температурой и магнитным полем может быть определено на основе предварительно откалиброванной поисковой таблицы или формулы. Будет понятно, что управление магнитом является одинаковым, используется ли оно, чтобы связывать измеренную температуру с мгновенным магнитным полем и определять разницу между мгновенным и желательным магнитным полем, или чтобы связывать желаемое магнитное поле с желаемой температурой, и определять разницу между желаемой и измеренной температурами.

Нагрев магнита может быть осуществлен посредством увеличения тока переноса (тем самым, вынуждая больший ток поступать в резистивные фрагменты магнита), посредством использования специально предназначенных нагревателей, предусмотренных в тепловом контакте с катушками, или посредством уменьшения охлаждения (например, расхода), обеспечиваемого криогенной системой охлаждения магнита. Охлаждение магнита может быть осуществлено посредством увеличения охлаждения криогенной системы охлаждения, или посредством тока переноса (в то же время все еще оставаясь в насыщенном диапазоне) или мощности, подаваемой к нагревателям.

В первом случае, упомянутом выше (нагрев магнита посредством увеличения тока переноса), будет отмечено, что результат является очень неинтуитивным, т.е.: для увеличения магнитного поля будет уменьшен ток источника питания, и наоборот. Исключительным случаем является случай, когда магнит работает в насыщенном режиме.

Система обратной связи реализуется для управления измеренной температурой/полем посредством нагрева и охлаждения - т.е., когда измеренная температура является слишком высокой, или измеренное поле является слишком низким, тогда магнит охлаждается (или применяемый нагрев уменьшается), а

когда измеренная температура является слишком низкой, или поле слишком высокое, тогда магнит нагревается (или применяемое охлаждение уменьшается). Любая подходящая схема обратной связи, которая известна на уровне техники, может быть использована для этой цели.

При работе с мониторингом магнитного поля схема управления, обрисованная выше, может быть использована даже в ситуациях, когда внешняя деформация и/или магнитное поле на магните является переменным. Это может также быть выполнено с помощью мониторинга температуры, если датчики деформации и/или поля были включены, и поисковая таблица или формула содержат термины, чтобы учитывать эффекты деформации и/или поля. Альтернативно (в случае либо постоянного, либо переменного фонового поля), поисковая таблица между температурой и желаемым полем может быть использована для получения первоначальной оценки для требуемого нагрева, и затем контур обратной связи на основе наблюдаемого магнитного поля используется для достижения желаемого магнитного поля.

При работе в насыщенном режиме устойчивость поля определяется только по устойчивости критического тока ВТСП - т.е. по устойчивости внешнего магнитного поля, деформации и температуры.

Для систем с множеством катушек применяются тот же принцип - каждая отдельная катушка может работать в насыщенном режиме. Кроме того, является возможным управлять однородностью магнитного поля, независимо регулируя температуру каждой отдельной катушки, на основе пространственно распределенных измерений магнитного поля. Контур обратной связи управления будет более усложненным - массив датчиков должен быть размещен способом, который предоставляет возможность определения однородности магнитного поля, создаваемого всеми катушками, и температура каждой катушки может затем быть индивидуально отрегулирована, чтобы регулировать однородность поля посредством регулировки поля, вносимого каждой отдельной катушкой. Форма магнитного поля может удобно быть описана с помощью взвешенной суммы пространственных гармоник, таких как многочлены Лежандра, как описано на предшествующем уровне шиммирования. Однако, множество других способов определения однородности поля существуют.

Следует отметить, что для того, чтобы регулировать однородность поля для набора катушек, соединенных последовательно, необходимо регулировать вклад каждой катушки независимо. Это не может быть выполнено посредством регулировки тока переноса, который влияет на температуру всех катушек, работающих в насыщенном режиме. Следовательно, является необходимым регулировать температуру каждой катушки независимо. Катушки, следовательно, должны быть, по меньшей мере, частично термически изолированы друг от друга. Их температуры могут затем быть отрегулированы либо посредством управления охлаждением каждой катушки, либо посредством добавления дополнительного нагрева к каждой катушке, например, с помощью нагревателя.

Альтернативно, магнит может иметь смесь катушек, работающих в традиционном режиме, и катушек, работающих в насыщенном режиме, при этом последние регулируются, чтобы обеспечивать однородность поля.

В то время как вышеизложенное ссылается на однородность поля, будет понятно, что другие профили поля могут быть осуществлены посредством регулирования магнитных катушек, когда необходимо.

Насыщенный режим также предоставляет удобный способ испытать качество ВТСП-ленты - для заданной температуры катушки, окружения и геометрии катушки, магнитное поле полностью определяется по критическому току ВТСП-ленты - таким образом, ВТСП-лента может быть испытана посредством измерения магнитного поля, создаваемого катушкой из этой ленты, работающей в насыщенном режиме при различных температурах, и определения характеристики критического тока. Магнитное поле обеспечивает измерение объединенной плотности критического тока ленты на всем протяжении катушки - и дополнительные датчики магнитного поля могут быть использованы для определения того, как критический ток изменяется через катушку, и, следовательно, получения критической поверхности ВТСП-ленты (профиля температуры и/или изменения магнитного поля критического тока в ленте). Работа в насыщенном режиме с ВТСП неизвестного критического тока либо потребует сначала определения оценки или верхнего предела для критического тока, либо просто подачи очень высокого тока переноса, так что маловероятно, что критический ток является ниже тока переноса. Альтернативно, ток переноса катушки может линейно повышаться до тех пор, пока характеристика соотношения температуры/магнитного поля для насыщенного режима не будет наблюдаться (т.е., "опрокидывание", показанное на фиг. 4), и затем измерения выполняются, когда температура катушки повышается по направлению к критической температуре собственного поля, чтобы определять объединенный критический ток и/или критическую поверхность (т.е., изменение критического тока с температурой, полем и деформацией).

Работа при насыщении будет увеличивать вероятность гашения по сравнению с работой в традиционном режиме - если система охлаждения не способна противодействовать дополнительному нагреву от протекания тока в резистивном материале в какой-либо части магнита, тогда может происходить тепловой пробой. Однако, поскольку вся ВТСП будет работать при насыщении, она вся будет в равной степени чувствительна к тепловому пробую (т.е., запас по тепловыделению является единообразным). Это означает, что какое-либо гашение будет распространяться быстро, вынуждая энергию магнита сбрасываться по всему объему магнита. Это будет вызывать значительно меньшее повреждение по сравнению с

гашением в традиционно работающем ВТСП-магните, когда горячее пятно будет иметь тенденцию быть лишь небольшим фрагментом магнита, в котором вся накопленная энергия магнита тогда сбрасывается, если не предпринимаются меры противодействия. Минимальная энергия гашения будет все еще гораздо выше для насыщенного ВТСП-магнита по сравнению с эквивалентным НТСП-магнитом, предоставляя возможность ВТСП-магниту работать с множеством преимуществ ВТСП, в то же время также имея устойчивость к внешним воздействиям во время гашений НТСП-магнита. Таким образом, гашения являются более вероятными в новом режиме, но ущерб от гашений является менее вероятным.

Новый режим применяется к неизолированной или частично изолированной катушке. Рабочая характеристика катушки в новом режиме может быть оптимизирована посредством предоставления материала между витками с высокой электрической и тепловой проводимостью (чтобы уменьшать нагрев от избыточного тока и увеличивать способность переносить это тепло в систему охлаждения), но они не являются строго необходимыми - в равной степени допустимой будет работа катушки с более низкой электрической и тепловой проводимостью в насыщенном режиме и предоставление дополнительной мощности охлаждения, чтобы гарантировать, что катушка не гасится. Это вызовет перепад температуры через катушку - но, как отмечено ранее, это не изменяет прогнозируемость соотношения температура/магнитное поле, при условии, что типичная температура выбирается для температурного профиля катушки.

Фиг. 5 показывает примерную ВТСП-магнитную систему, использующую вышеописанную схему управления. Система содержит две частично изолированные катушки 501, сформированные в двойную плоскую катушку, каждая из которых наблюдается посредством датчиков 502 температуры и датчиков 503 магнитного поля. Охлаждающие пластины 504 предусматриваются на стороне двойной плоской катушки, чтобы гарантировать хорошее проведение тепла от ВТСП-катушек, и нагреватель 505 предоставляется для нагрева катушек. ВТСП-магнитная система имеет источник питания (не показан), который предоставляет ток переноса ВТСП-катушкам, и контроллер (не показан), который принимает входной сигнал от датчиков 502 температуры и датчиков 503 магнитного поля и регулирует напряженность магнитного поля магнита посредством регулирования температуры с помощью нагревателя 505 и посредством регулирования PSU-тока (в то же время поддерживая магнит в насыщенном режиме).

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Высокотемпературная сверхпроводящая (ВТСП) магнитная система, содержащая: ВТСП-катушку возбуждения, содержащую:

множество витков, содержащих ВТСП-материал;

резистивный материал, электрически соединяющий витки, так что ток может распределяться радиально между витками через резистивный материал;

систему регулирования температуры, выполненную с возможностью изменения температуры катушки, причем система регулирования температуры содержит по меньшей мере криогенную систему охлаждения, выполненную с возможностью поддерживать катушку ниже критической температуры собственного поля ВТСП-материала;

источник питания, выполненный с возможностью подавать ток к ВТСП-катушке возбуждения;

контроллер, выполненный с возможностью:

предписывать источнику питания предоставлять ток больше критического тока всего ВТСП-материала;

предписывать системе регулирования температуры изменять температуру ВТСП-катушки возбуждения, чтобы регулировать напряженность магнитного поля ВТСП-катушки возбуждения.

2. ВТСП-магнитная система по п.1, содержащая:

датчик, выполненный с возможностью измерять температуру катушки и/или магнитного поля, создаваемого катушкой;

при этом предписание системе регулирования температуры изменять температуру ВТСП-катушки возбуждения, чтобы регулировать напряженность магнитного поля ВТСП-катушки возбуждения, включает в себя:

мониторинг показателей от датчика для того, чтобы определять напряженность магнитного поля катушки;

предписание системе регулирования температуры понижать температуру катушки в случае, когда измеренная напряженность магнитного поля катушки меньше желаемой напряженности магнитного поля катушки, и повышать температуру катушки в случае, когда измеренная напряженность магнитного поля катушки больше желаемой напряженности магнитного поля катушки.

3. ВТСП-магнитная система по п.2, при этом

система регулирования температуры содержит нагреватель в тепловом контакте с ВТСП-катушкой возбуждения; или

система регулирования температуры содержит источник питания и выполнена с возможностью увеличивать температуру ВТСП-катушки возбуждения посредством повышения тока, подаваемого к

ВТСП-катушке возбуждения, и уменьшать температуру ВТСП-катушки возбуждения посредством уменьшения тока, подаваемого к ВТСП-катушке возбуждения, так что подаваемый ток остается больше критического тока всего ВТСП-материала.

4. Способ работы высокотемпературной сверхпроводящей (ВТСП) катушки возбуждения, причем ВТСП-катушка возбуждения содержит множество витков, содержащих ВТСП-материал, и резистивный материал, электрически соединяющий витки, так что ток может распределяться радиально между витками через резистивный материал; причем способ содержит этапы, на которых:

подают ток к ВТСП-катушке возбуждения, так что ток переноса ВТСП-катушки возбуждения является большим по сравнению с критическим током всего ВТСП-материала;

изменяют температуру ВТСП-катушки возбуждения, чтобы регулировать напряженность магнитного поля ВТСП-катушки возбуждения.

5. Способ по п.4, дополнительно содержащий этапы, на которых: осуществляют мониторинг одного из:

температуры ВТСП-катушки возбуждения;

магнитного поля, создаваемого ВТСП-катушкой возбуждения;

причем регулирование температуры ВТСП-катушки возбуждения, чтобы регулировать напряженность магнитного поля ВТСП-катушки возбуждения, включает в себя:

определение напряженности магнитного поля катушки из результатов упомянутого мониторинга;

уменьшение температуры катушки, когда измеренная напряженность магнитного поля меньше желаемой напряженности поля ВТСП-катушки;

увеличение температуры катушки, когда измеренная напряженность магнитного поля больше желаемой напряженности поля ВТСП-катушки.

6. Способ по п.5, при этом увеличение температуры ВТСП-катушки возбуждения содержит одно или более из:

увеличения мощности, подаваемой к нагревателю в тепловом контакте с ВТСП-катушкой возбуждения;

уменьшения охлаждения, обеспечиваемого системой охлаждения ВТСП-катушки возбуждения; и

увеличения тока, подаваемого к ВТСП-катушке возбуждения; и

при этом уменьшение температуры ВТСП-катушки возбуждения содержит одно или более из:

уменьшения мощности, подаваемой к нагревателю в тепловом контакте с ВТСП-катушкой возбуждения;

увеличения охлаждения, обеспечиваемого системой охлаждения ВТСП-катушки возбуждения; и

уменьшения тока, подаваемого к ВТСП-катушке возбуждения, так что ток остается больше критического тока ВТСП-материала во всем ВТСП-материале.

7. ВТСП-магнитная система, содержащая: ВТСП-катушку возбуждения, содержащую:

множество витков из ВТСП-материала, разделенных резистивным материалом, который является достаточно электропроводным, чтобы предоставлять возможность радиального распределения тока между витками;

систему регулирования температуры, содержащую систему охлаждения, выполненную с возможностью поддерживать температуру ВТСП-катушки возбуждения ниже критической температуры собственного поля ВТСП-материала;

источник питания, выполненный с возможностью подавать ток к ВТСП-катушке возбуждения; и

контроллер, выполненный с возможностью:

предписывать источнику питания предоставлять ток, достаточно высокий, чтобы насыщать ВТСП-материал в катушке, так что она полностью работает при своем критическом токе;

изменять температуру ВТСП-катушки возбуждения посредством изменения тока, подаваемого источником питания, чтобы изменять магнитное поле, создаваемое ВТСП-катушкой возбуждения;

при этом уменьшение магнитного поля, создаваемого ВТСП-катушкой возбуждения, достигается посредством увеличения тока, подаваемого источником питания, и увеличение магнитного поля, создаваемого ВТСП-катушкой возбуждения, достигается посредством уменьшения тока, подаваемого источником питания.

8. Высокотемпературная сверхпроводящая (ВТСП) магнитная система, содержащая: множество ВТСП-катушек возбуждения, причем каждая содержит:

множество витков, содержащих ВТСП-материал;

резистивный материал, электрически соединяющий витки, так что ток может распределяться радиально между витками через резистивный материал;

систему регулирования температуры, выполненную с возможностью изменять температуру каждой катушки, причем система регулирования температуры содержит по меньшей мере криогенную систему охлаждения, выполненную с возможностью поддерживать каждую катушку ниже критической температуры собственного поля ВТСП-материала;

источник питания, выполненный с возможностью подавать ток к ВТСП-катушке возбуждения;

контроллер, выполненный с возможностью:

предписывать источнику питания предоставлять ток каждой катушке возбуждения, больший по сравнению с критическим током всего ВТСП-материала в ВТСП-катушках возбуждения;

предписывать системе регулирования температуры изменять температуру каждой ВТСП-катушки и, тем самым, регулировать вклад каждой ВТСП-катушки в магнитное поле.

9. Магнитная система по п.8, содержащая массив датчиков магнитного поля, выполненный с возможностью измерять магнитное поле, создаваемое множеством ВТСП-катушек возбуждения; при этом контроллер дополнительно выполнен с возможностью:

определять профиль магнитного поля ВТСП-магнитной системы из измеренного магнитного поля;

предписывать системе регулирования температуры изменять температуру каждой ВТСП-катушки для того, чтобы добиваться желаемого профиля магнитного поля.

10. Магнитная система по п.8 или 9, при этом источник питания выполнен с возможностью подавать одинаковый ток к каждой ВТСП-катушке возбуждения, и при этом контроллер выполнен с возможностью изменять температуру всех катушек посредством регулирования тока источника питания, в то же время поддерживая ток больше критического тока всего ВТСП-материала во всех ВТСП-катушках возбуждения; и/или при этом система регулирования температуры содержит нагреватель для каждой ВТСП-катушки возбуждения, и при этом система регулирования температуры выполнена с возможностью изменять температуру каждой из ВТСП-катушек возбуждения индивидуально посредством регулирования тепла, предоставляемого соответствующей катушке каждым нагревателем.

11. Способ работы высокотемпературной сверхпроводящей (ВТСП) магнитной системы, причем ВТСП-магнитная система содержит множество ВТСП-катушек возбуждения, причем каждая содержит множество витков, содержащих ВТСП-материал, и резистивный материал, электрически соединяющий витки, так что ток может распределяться радиально между витками через резистивный материал, причем способ содержит этапы, на которых:

подают ток к каждой из ВТСП-катушек возбуждения, так что ток переноса ВТСП-катушки возбуждения является большим по сравнению с критическим током всего ВТСП-материала;

регулируют напряженность поля каждой ВТСП-катушки возбуждения в ВТСП-магнитной системе посредством изменения температуры каждой из ВТСП-катушек возбуждения.

12. Способ по п.11, дополнительно содержащий этапы, на которых:

осуществляют мониторинг магнитного поля, создаваемого ВТСП-магнитной системой;

изменяют температуру каждой ВТСП-катушки возбуждения для того, чтобы добиваться желаемого профиля магнитного поля.

13. Способ по п.11 или 12, при этом регулировка температуры каждой из ВТСП-катушек возбуждения содержит одно или более из:

регулировки мощности, подаваемой к соответствующему нагревателю в тепловом контакте с каждой ВТСП-катушкой возбуждения;

изменения температуры всех ВТСП-катушек возбуждения посредством регулировки тока, подаваемого во все ВТСП-катушки возбуждения.

14. Способ определения критической поверхности высокотемпературного сверхпроводящего (ВТСП) проводника, причем способ содержит этапы, на которых:

формируют ВТСП-проводник в ВТСП-катушку возбуждения, содержащую:

множество витков, содержащих ВТСП-проводник;

резистивный материал, электрически соединяющий витки, так что ток может распределяться радиально между витками через резистивный материал;

эксплуатируют ВТСП-катушку возбуждения с током переноса, который больше критического тока всего ВТСП-проводника;

измеряют температуру одной или более точек на ВТСП-катушке возбуждения во время упомянутой эксплуатации;

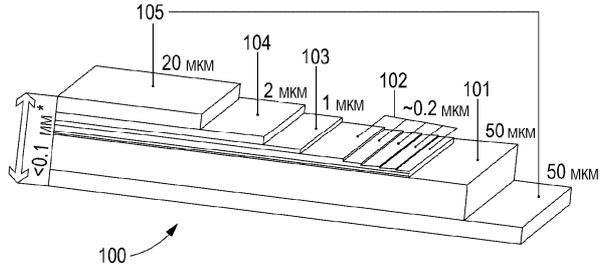
измеряют магнитное поле, создаваемое катушкой возбуждения, во время упомянутой эксплуатации;

определяют критическую поверхность ВТСП-проводника из упомянутых измерений.

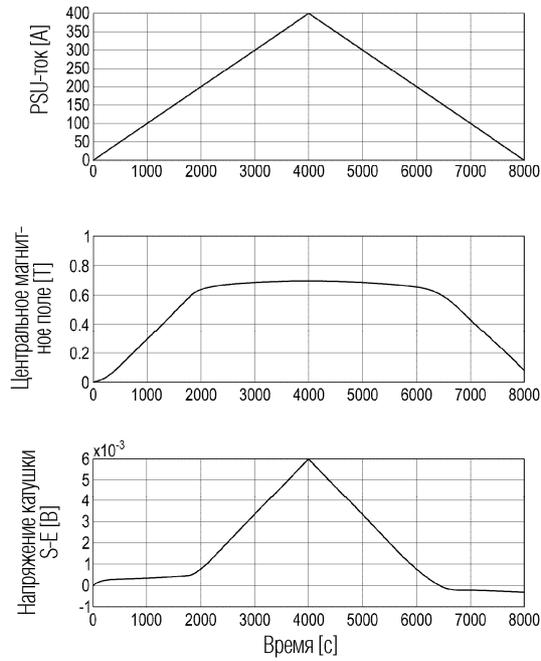
15. Способ по п.14, при этом эксплуатация ВТСП-катушки возбуждения с током переноса, который больше критического тока всего ВТСП-проводника, включает в себя одно из:

установки тока переноса в значение, большее по сравнению с ожидаемым пиковым критическим током ВТСП-проводника; или

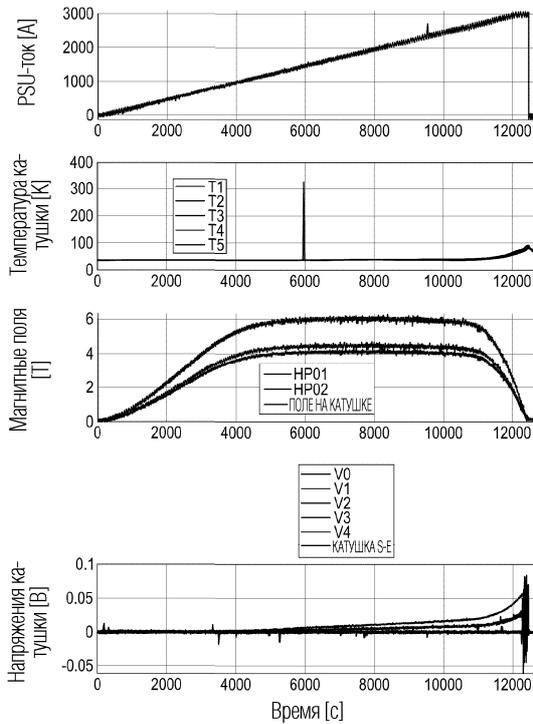
линейного повышения тока переноса до тех пор, пока не будет наблюдаться монотонное соотношение между измеренной температурой и напряженностью магнитного поля, и определения тока переноса в этот момент как большего по сравнению с критическим током всего ВТСП-проводника.



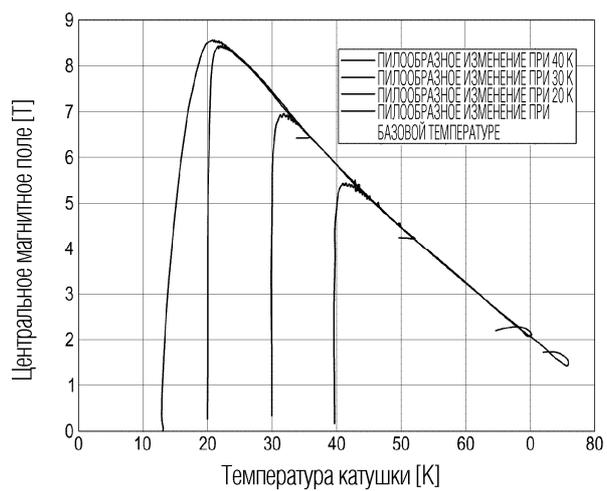
Фиг. 1



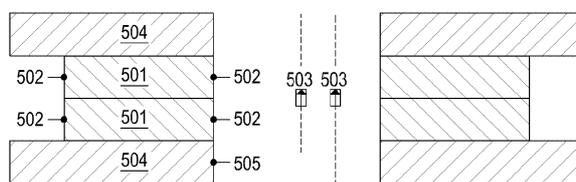
Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5