



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

H01F 41/048 (2019.08); H01F 6/06 (2019.08); H02H 7/001 (2019.08)

(21)(22) Заявка: 2018112471, 02.09.2016

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
02.09.2016Дата регистрации:
19.12.2019

Приоритет(ы):

(30) Конвенционный приоритет:
09.09.2015 GB 1515979.1

(43) Дата публикации заявки: 09.10.2019 Бюл. № 28

(45) Опубликовано: 19.12.2019 Бюл. № 35

(85) Дата начала рассмотрения заявки РСТ на
национальной фазе: 09.04.2018(86) Заявка РСТ:
GB 2016/052712 (02.09.2016)(87) Публикация заявки РСТ:
WO 2017/042541 (16.03.2017)

Адрес для переписки:

129090, Москва, ул. Б. Спасская, 25, стр. 3, ООО
"Юридическая фирма Городисский и
Партнеры"

(72) Автор(ы):

РОСС Джон (GB),
НУНАН Пол (GB)

(73) Патентообладатель(и):

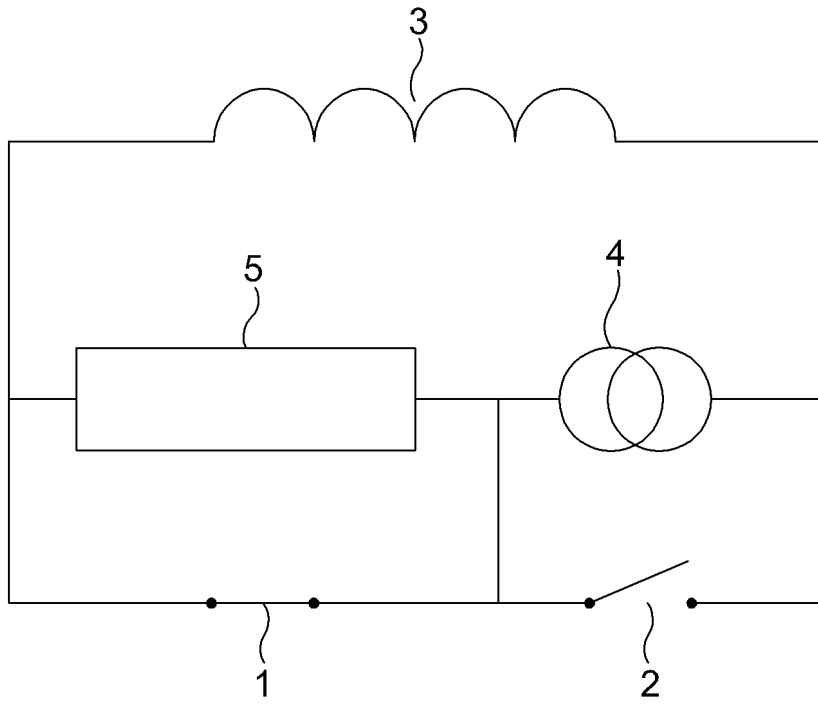
ТОКЕМЕК ЭНЕРДЖИ ЛТД (GB)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: JP 2011238455 A, 24.11.2011. US
2007063799 A1, 22.03.2007. RU 2014112696 A,
10.10.2015. WO 2013030554 A1, 07.03.2013. JPS
6452331 A, 28.02.1989.(54) ЗАЩИТА ОТ ПЕРЕХОДОВ В НОРМАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ В СВЕРХПРОВОДЯЩИХ
МАГНИТАХ

(57) Реферат:

Способ защиты сверхпроводящего магнита от переходов в нормальное состояние, причем сверхпроводящий магнит имеет по меньшей мере одну первичную катушку, содержащую материал-высокотемпературный сверхпроводник, ВТСП. Обеспечивают вторичную ВТСП-ленту, находящуюся в непосредственной близости от первичной катушки и электрически изолированную от нее и выполненную с

возможностью прекращать сверхпроводимость при более низкой температуре, чем первичная катушка, во время работы магнита. Обнаруживают потерю сверхпроводимости во вторичной ВТСП-ленте. В ответ на упомянутое обнаружение сбрасывают энергию из первичной катушки во внешнюю резистивную нагрузку. 2 н. и 7 з.п. ф-лы, 3 ил.



ФИГ. 1

RU 2709627 C2

RU 2709627 C2



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC

H01F 41/048 (2019.08); *H01F 6/06* (2019.08); *H02H 7/001* (2019.08)

(21)(22) Application: **2018112471, 02.09.2016**

(24) Effective date for property rights:
02.09.2016

Registration date:
19.12.2019

Priority:

(30) Convention priority:
09.09.2015 GB 1515979.1

(43) Application published: **09.10.2019 Bull. № 28**

(45) Date of publication: **19.12.2019 Bull. № 35**

(85) Commencement of national phase: **09.04.2018**

(86) PCT application:
GB 2016/052712 (02.09.2016)

(87) PCT publication:
WO 2017/042541 (16.03.2017)

Mail address:
**129090, Moskva, ul. B. Spasskaya, 25, str. 3, OOO
"Yuridicheskaya firma Gorodisskij i Partnery"**

(72) Inventor(s):

**ROSS, John (GB),
NOONAN, Paul (GB)**

(73) Proprietor(s):

TOKAMAK ENERGY LTD (GB)

(54) **PROTECTION AGAINST TRANSITIONS TO NORMAL STATE IN SUPERCONDUCTING MAGNETS**

(57) Abstract:

FIELD: physics.

SUBSTANCE: method of protecting a superconducting magnet from transitions to a normal state, wherein the superconducting magnet has at least one primary coil containing material-high-temperature superconductor. Providing secondary high-temperature superconducting tape, located in close proximity to primary coil and electrically isolated from it and made with possibility to stop superconductivity at lower

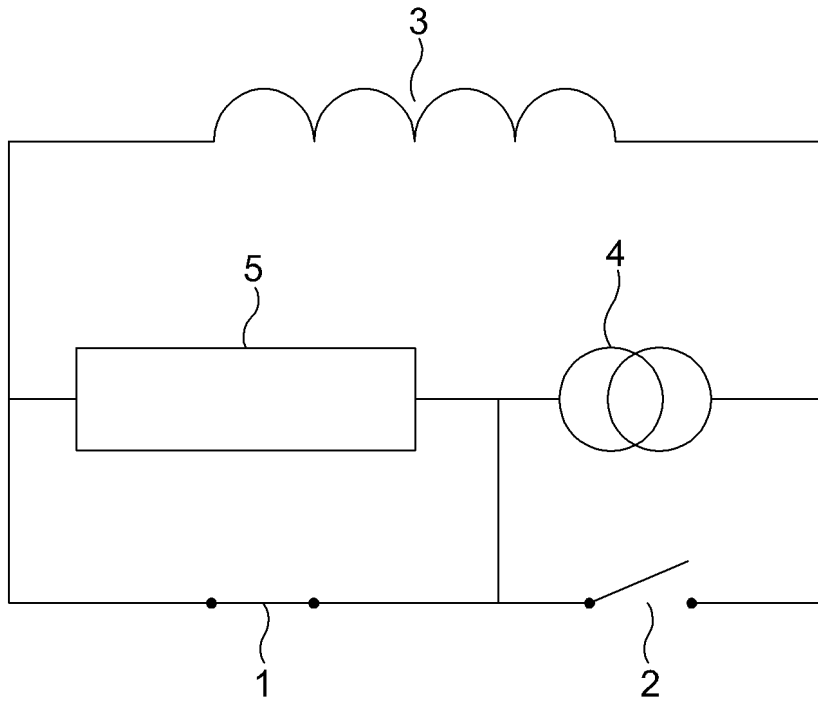
temperature, than primary coil, during magnet operation. Superconductivity loss in secondary high-temperature superconductivity tape is detected. In response to said detection energy is released from primary coil into external resistive load.

EFFECT: protection against transitions to normal state in superconducting magnets is disclosed.

9 cl, 3 dwg

RU 2 709 627 C2

RU 2 709 627 C2



ФИГ. 1

RU 2709627 C2

RU 2709627 C2

Область изобретения

Изобретение относится к защите от переходов в нормальное состояние в сверхпроводящих магнитах. В частности, изобретение относится к способам и прибору для идентификации возможных переходов в нормальное состояние с тем, чтобы можно было принять превентивные меры в магнитах, содержащих высокотемпературный сверхпроводник.

Предпосылки изобретения

Сверхпроводящий магнит представляет собой электромагнит, образованный из катушек сверхпроводящего материала. Поскольку эти катушки магнита имеют нулевое сопротивление, сверхпроводящие магниты могут переносить большие токи с нулевыми потерями (хотя будут некоторые потери от несверхпроводящих компонентов) и могут в связи с этим достигать сильных полей с меньшими потерями, нежели обычные электромагниты.

Сверхпроводимость возникает только в некоторых материалах и только при низких температурах. Сверхпроводящий материал будет вести себя как сверхпроводник в области, определяемой критической температурой сверхпроводника (наивысшей температурой, при которой материал является сверхпроводником в нулевом магнитном поле) и критическим полем сверхпроводника (наибольшим магнитным полем, в котором материал является сверхпроводником при 0 К). Температура сверхпроводника и присутствующее магнитное поле ограничивают ток, который может переноситься сверхпроводником без перехода сверхпроводника в резистивное состояние.

Вообще говоря, существуют два типа сверхпроводящего материала.

Низкотемпературные сверхпроводники (НТСП) имеют критические температуры ниже 30-40 К, а высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) имеют критические температуры выше 30-40 К. Многие существующие ВТСП-материалы имеют критические температуры выше 77 К, что позволяет использовать жидкий азот для охлаждения.

Одной проблемой, которая может возникнуть в сверхпроводящих магнитах, является подавление. Подавление возникает, когда часть сверхпроводящей катушки входит в резистивное состояние. Это может возникнуть из-за флуктуаций температуры или магнитного поля, или физического повреждения, или дефектов в сверхпроводнике (например, при нейтронном облучении, если магнит используется в термоядерном реакторе). Из-за больших токов, присутствующих в магните, когда даже небольшая часть сверхпроводника становится резистивной, она быстро нагревается. В НТСП-магнитах это быстро повышает температуру окружающих областей. Это приводит к тому, что окружающие области также становятся резистивными, и это продолжается по цепной реакции, которая может обратить весь магнит в резистивный очень быстро (до нескольких секунд, в зависимости от размера катушки).

Ввиду больших температурных пределов для ВТСП-магнитов и более высоких удельных теплоемкостей материалов при более высоких температурах переходы в нормальное состояние в ВТСП-магнитах не распространяются так быстро. Это может приводить к большему повреждению магнита, поскольку вся энергия в магните выделяется в очень малом резистивном объеме.

Переход в нормальное состояние приводит к тому, что энергия в магните превращается в тепло, которое испарит любой жидкий охладитель и может вызвать необратимое повреждение магнита. Энергия, запасенная в магнитном поле, дается как:

$$W = \frac{1}{2} \int \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} \, d\mathbf{r}$$

То есть чем больше плотность потока и чем больше объем, тем больше запасенная

энергия магнита. Энергия, высвобождаемая мощным магнитом, может быть того же порядка, что и у патрона взрывающегося динамита.

Обычный подход к управлению переходами состоит в обеспечении внешней резистивной нагрузки, в которую ток может быть «сброшен» при обнаружении локализованного перехода в нормальное состояние. Упрощенная схема этого показана на Фигуре 1. Во время нормальной работы ключ 1 замкнут, а ключ 2 разомкнут, что закорачивает сброс напряжения. При обнаружении перехода в нормальное состояние ключ 2 замыкается, а ключ 1 размыкается. Это закорачивает источник 4 питания и направляет ток от сверхпроводящего магнита 3 через сброс 5 постоянного напряжения (т. е. внешнюю резистивную нагрузку). Для ВТСП-магнитов ток может быть сброшен в секции магнита далеко от исходного горячего места, чтобы распределить выделение энергии на большую часть катушки и, таким образом, ограничить повышение температуры в любом одном месте.

Как показано на Фигуре 2, ВТСП-лента 11 зажата между слоями меди 12 для формирования проводника, такого как кабель. Медный стабилизатор 12 выступает в роли внешней резистивной нагрузки для ВТСП-ленты 11. Медный стабилизатор 12 работает на отвод избыточного тока во время перехода в нормальное состояние (показан протеканием 14 тока), а также удаляет часть тепла. Скорость, при которой первоначальная горячая зона 13 перехода в нормальное состояние нагревается, может быть уменьшена за счет увеличения количества меди в ВТСП-проводнике, что снижает сопротивление меди и увеличивает ее теплоемкость.

Однако в приложениях, где требуются проводники малого диаметра, медный стабилизатор значительно увеличивает размер проводников. Например, в термоядерном реакторе типа сферического токамака центральная колонна должна быть как можно меньше, чтобы сохранить размер и стоимость устройства как можно меньшими и повысить эффективность реактора (как путем увеличения соотношения сторон, так и путем увеличения магнитного поля на внутренней поверхности плазмы). Более тонкие проводники означают, что магниты могут быть сделаны более компактными в любом приложении, и увеличивают поле, доступное в определенных геометриях (т. е. для геометрий, в которых магнитное поле изменяется с расстоянием от тока, в этом случае наличие толстого слоя меди увеличит расстояние между током и областью, в которой используется поле).

Если переход в нормальное состояние может быть быстро обнаружен и система сброса быстро активирована, то количество требуемой меди может быть уменьшено. Однако чрезмерно чувствительная система обнаружения будет иметь тенденцию создавать ложные триггеры, которые вызывают отключение магнита без необходимости. Поэтому важно получить максимально быстрое обнаружение переходов в нормальное состояние с минимальным шумом.

Фигура 3 показывает график температуры горячего места во время перехода в нормальное состояние с временем активации сброса в 2 с. Температура увеличивается от 30 К до 217 К. Однако если бы переход в нормальное состояние мог быть обнаружен, а ключ сброса разомкнут в течение 1 с, количество меди могло быть значительно уменьшено для такого же повышения температуры (в данном случае уменьшено до 83% от исходной площади поперечного сечения).

Обычный подход к обнаружению переходов в нормальное состояние состоит в использовании снятия напряжения на сверхпроводящей катушке. По существу, напряжение на катушке измеряется, и если любое напряжение обнаружено вне указанного диапазона напряжений, то это знак того, что часть катушки стала

резистивной и переход в нормальное состояние начинается. Однако первоначальная горячая зона обычно очень мала, и поэтому сопротивление (а, следовательно, и генерируемое напряжение) невелико. При подаче напряжения на магнит также будут возникать индуктивные эффекты напряжения, которые могут накапливать резистивное напряжение, даже если прилагаются усилия по их устранению. Фильтрация истинного сигнала перехода в нормальное состояние от шумящего фонового сигнала занимает время и имеет высокую вероятность ошибки.

Сущность изобретения

В соответствии с аспектом предлагается способ защиты сверхпроводящего магнита от переходов в нормальное состояние, причем сверхпроводящий магнит имеет по меньшей мере одну первичную катушку, содержащую материал-высокотемпературный сверхпроводник, ВТСП. Обеспечена вторичная ВТСП-лента, находящаяся в непосредственной близости от первичной катушки и электрически изолированная от нее, и выполненная с возможностью прекращать сверхпроводимость при более низкой температуре, чем первичная катушка, во время работы магнита. Обнаруживают потерю сверхпроводимости во вторичной ВТСП-ленте. В ответ на упомянутое обнаружение сбрасывают энергию из первичной катушки во внешнюю резистивную нагрузку.

Во время работы магнита ток во вторичной ВТСП-ленте может составлять большую долю от своего критического тока, нежели ток в первичной катушке.

Вторичная ВТСП-лента может быть предусмотрена в виде пары лент, причем ленты переносят ток в противоположных направлениях и проложены параллельно и рядом друг с другом.

Обнаружение потери сверхпроводимости может содержать обнаружение разности напряжений, превышающей заданное значение между двумя точками вторичной ВТСП-ленты.

В соответствии со вторым аспектом предлагается система защиты от переходов в нормальное состояние для использования со сверхпроводящим магнитом, имеющим по меньшей мере одну первичную катушку, содержащую материал-высокотемпературный сверхпроводник, ВТСП. Система содержит вторичную ВТСП-ленту, блок обнаружения и блок защиты от переходов в нормальное состояние.

Вторичная ВТСП-лента выполнена расположенной в непосредственной близости от первичной катушки магнита и изолированной от нее и с возможностью прекращать сверхпроводимость при более низкой температуре, чем первичная катушка, во время работы магнита. Блок обнаружения выполнен с возможностью обнаружения потери сверхпроводимости во вторичной ВТСП-ленте. Блок защиты от переходов в нормальное состояние выполнен с возможностью вызывать сброс энергии из первичной катушки во внешнюю резистивную нагрузку в ответ на упомянутое обнаружение.

Вторичная ВТСП-лента может содержать пару ВТСП-лент, проложенных параллельно и рядом друг с другом и выполненных с возможностью переносить ток в противоположных направлениях.

В соответствии с еще одним аспектом предлагается сверхпроводящий магнит, содержащий первичную катушку и систему защиты от переходов в нормальное состояние в соответствии со вторым аспектом, причем первичная катушка содержит материал-высокотемпературный сверхпроводник, ВТСП.

В соответствии с еще одним аспектом предлагается катушка тороидального или полоидального поля для термоядерного реактора, содержащая материал-высокотемпературный сверхпроводник, ВТСП, и систему защиты от переходов в нормальное состояние в соответствии со вторым аспектом.

Краткое описание чертежей

Фигура 1 представляет собой принципиальную схему части системы защиты от переходов в нормальное состояние;

5 Фигура 2 представляет собой схематическое изображение горячего места в ВТСП-проводнике;

Фигура 3 представляет собой график температуры от времени для горячего места в примерном ВТСП-проводнике.

Подробное описание

10 Чтобы обеспечить более быстрое и более надежное обнаружение переходов в нормальное состояние, либо шум, который скрывает сигнал обнаружения переходов в нормальное состояние, должен быть уменьшен, либо сам сигнал должен быть увеличен. Ниже предлагается решение, которое обеспечивает значительно улучшенную скорость и надежность обнаружения по сравнению с обычными способами.

15 Второе решение задействует использование «коррекционной ленты». Вторичная ВТСП-лента обеспечена в непосредственной близости от («первичной») катушки магнита. Вторичная лента выполнена таким образом, что она прекращает сверхпроводимость при более низкой температуре во время работы магнита, например, при температуре от примерно 5 К до примерно 80 К ниже температуры, при которой первичная катушка прекращает сверхпроводимость. Вторичная ВТСП-лента может
20 быть физически ослаблена, например, нейтронным облучением или химическим травлением, или может быть из альтернативного ВТСП-материала с более низкой критической температурой, чем ВТСП первичной катушки.

Поскольку вторичная ВТСП-лента прекращает сверхпроводимость при более низкой температуре, нежели первичная катушка, она обычно становится резистивной раньше
25 первичной катушки или быстро становится резистивной, если горячее место образуется в первичной катушке. Поэтому напряжение на вторичной ленте можно взять в качестве показателя того, что переход в нормальное состояние вероятно в первичной ленте. Поскольку вторичная лента не требуется для работы магнита, обнаружение перехода в нормальное состояние может дожидаться, когда перепад напряжений на вторичной
30 ВТСП-ленте будет достаточно большим, чтобы легко выделяться из электрических шумов, что значительно снижает риск ложных сигналов тревоги и, следовательно, обработку (и время), необходимую для обнаружения сигнала. Как только переход в нормальное состояние обнаружен, система обнаружения переходов в нормальное состояние вызывает сброс энергии в магните во внешнюю резистивную нагрузку,
35 ослабляя эффекты перехода в нормальное состояние.

В одном варианте осуществления вторичная ВТСП-лента предусмотрена в виде пары лент, которые проложены параллельно и рядом друг с другом и которые переносят ток в противоположных направлениях. Это гарантирует, что поле, создаваемое вторичными лентами, практически нейтрализуется и что размер петли, заключенной
40 вторичной лентой, минимизируется, что уменьшает индуктивные эффекты.

Вторичная лента может переносить гораздо более слабый ток, чем первичная катушка, поэтому вторичная лента нуждается в очень малом количестве меди для своей защиты в случае перехода в нормальное состояние. В одном варианте осуществления вторичная лента может рассматриваться как одноразовая и быть обеспеченной
45 небольшой защитой или вообще никакой, но это требует того, чтобы энергия, высвобождаемая при переходе в нормальное состояние во вторичной ленте, была недостаточной, чтобы вызвать повреждение других компонентов магнита. Магнит может быть выполнен так, что вторичная лента может быть легко заменена после

сброса энергии из магнита.

Множество вторичных лент может быть обеспечено в разных областях магнита, со свойствами в зависимости от этих областей. Например, лента, используемая в центральной колонне катушки тороидального поля при 18 Тл, может не обнаружить переход в нормальное состояние в возвратной ветви при 2 Тл, пока не станет слишком поздно, поэтому более чувствительная лента может использоваться в более слабом магнитном поле.

(57) Формула изобретения

1. Способ защиты сверхпроводящего магнита от переходов в нормальное состояние, имеющего по меньшей мере одну первичную катушку, содержащую материал-высокотемпературный сверхпроводник, ВТСП, причем способ содержит:

обеспечение вторичной ВТСП-ленты, находящейся в непосредственной близости от и электрически изолированной от первичной катушки и выполненной с возможностью прекращать сверхпроводимость при более низкой температуре, чем первичная катушка, во время работы магнита;

обнаружение потери сверхпроводимости во вторичной ВТСП-ленте;

в ответ на упомянутое обнаружение сброс энергии из первичной катушки во внешнюю резистивную нагрузку.

2. Способ по п.1, причем во время работы магнита ток во вторичной ВТСП-ленте составляет большую долю от его критического тока, чем ток в первичной катушке.

3. Способ по п.1, причем вторичная ВТСП-лента предусмотрена в виде пары лент, причем ленты переносят ток в противоположных направлениях и проложены параллельно и рядом друг с другом.

4. Способ по п.1, причем обнаружение потери сверхпроводимости содержит обнаружение разности напряжений, превышающей заданное значение между двумя точками вторичной ВТСП-ленты.

5. Способ по п.1, причем разность между температурой, при которой вторичная ВТСП-лента прекращает сверхпроводимость, и температурой, при которой ВТСП-лента первичной катушки прекращает сверхпроводимость, составляет от примерно 5 Кельвинов до примерно 80 Кельвинов.

6. Система защиты от переходов в нормальное состояние для использования со сверхпроводящим магнитом, имеющим по меньшей мере одну первичную катушку, содержащую материал-высокотемпературный сверхпроводник, ВТСП, причем система содержит:

вторичную ВТСП-ленту, выполненную расположенной в непосредственной близости от и изолированной от первичной катушки магнита и с возможностью прекращать сверхпроводимость при более низкой температуре, чем первичная катушка, во время работы магнита;

блок обнаружения, выполненный с возможностью обнаружения потери сверхпроводимости во вторичной ВТСП-ленте;

блок защиты от переходов в нормальное состояние, выполненный с возможностью вызывать сброс энергии из первичной катушки во внешнюю резистивную нагрузку в ответ на упомянутое обнаружение.

7. Система защиты от переходов в нормальное состояние по п.6, причем вторичная ВТСП-лента содержит пару ВТСП-лент, проложенных параллельно и рядом друг с другом и выполненных с возможностью переносить ток в противоположных направлениях.

8. Сверхпроводящий магнит, содержащий первичную катушку и систему защиты от переходов в нормальное состояние по п.б, причем первичная катушка содержит материал-высокотемпературный сверхпроводник, ВТСП.

5 9. Катушка тороидального или полоидального поля для термоядерного реактора, содержащая материал-высокотемпературный сверхпроводник, ВТСП, и систему защиты от переходов в нормальное состояние по п.б.

10

15

20

25

30

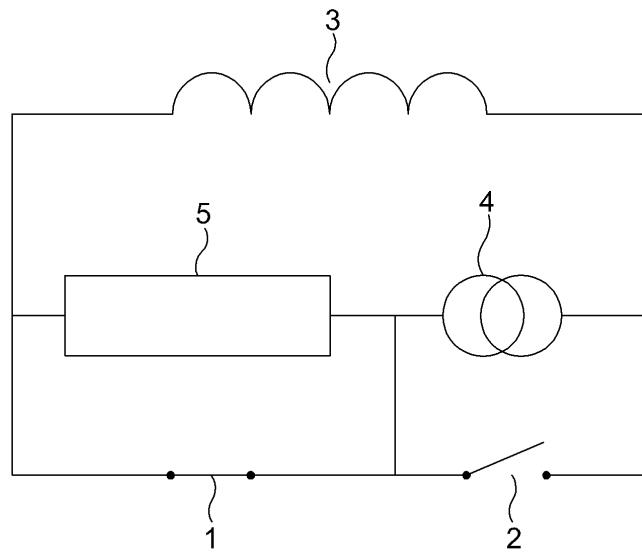
35

40

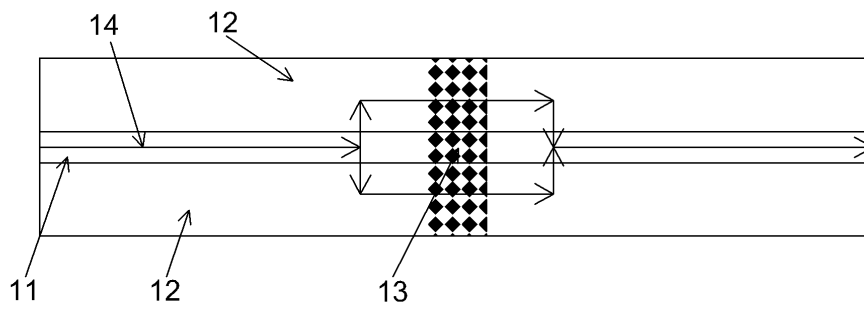
45

1

1/2



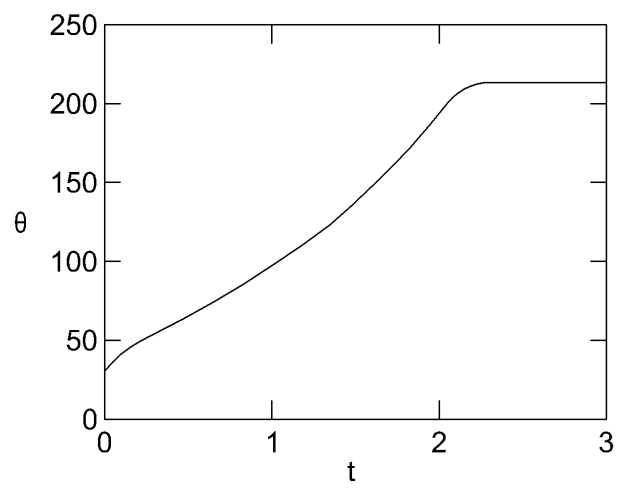
ФИГ. 1



ФИГ. 2

2

2/2



ФИГ. 3