

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19)

RU

(11)

[2 746 269](#)

(13)

C1

(51) МПК

- [H01F 27/28 \(2006.01\)](#)

(52) СПК

- H01F 27/28 (2021.02)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: действует (последнее изменение статуса: 26.04.2021)

(21)(22) Заявка: [2020129695](#), 09.09.2020

(24) Дата начала отсчета срока действия
патента:
09.09.2020

Дата регистрации:
12.04.2021

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: **09.09.2020**

(45) Опубликовано: [12.04.2021](#) Бюл. № [11](#)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: SU 633080 A, 20.11.1978. RU 2678432
C1, 29.01.2019. RU 2217828 C2, 27.11.2003. US
8760250 B2, 27.11.2003.

Адрес для переписки:
**620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 106,
Чайковский Станислав Анатольевич**

(72) Автор(ы):

**Паранин Сергей Николаевич (RU),
Спирин Алексей Викторович (RU),
Крутиков Василий Иванович (RU),
Иванов Виктор Владимирович (RU)**

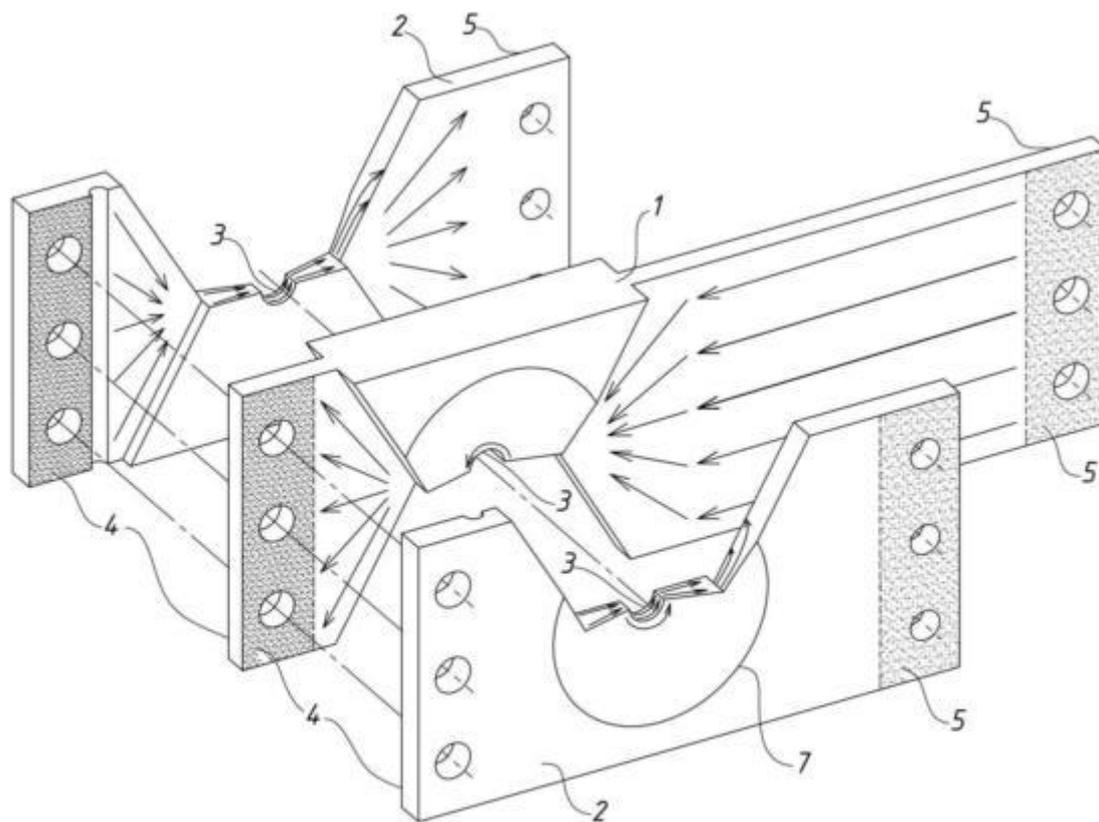
(73) Патентообладатель(и):

**Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт электрофизики
Уральского отделения Российской академии
наук (RU)**

(54) **Одновитковый индуктор сильного аксиального магнитного поля (варианты)**

(57) Реферат:

Изобретение относится к электротехнике, к устройствам для магнитно-импульсной обработки материалов (обжим, формовка, калибрование, сварка трубчатых заготовок и т.д.), использующим ток высокой частоты и большой амплитуды для генерации сильного импульсного магнитного поля с индукцией выше 10 Тл, точнее к конструкции индуктора (катушки индуктивности) этих устройств. Одновитковый индуктор выполнен разъемным из двух или трёх прямоугольных пластин – токопроводов, имеющих в определенном месте вырез по ширине в виде трапеции и симметричное по форме относительно продольной оси пластины утолщение в виде бобышки, имеющей на внутренней кромке полуцилиндрическую выемку, выполненную по всей толщине, сложенных бифилярно с образованием плоскопараллельной передающей линии из токопроводов с обеспечением равномерного изоляционного зазора между токопроводами разной полярности и формированием цилиндрического канала индуктора полуцилиндрическими соосными выемками на гранях токопроводов разной полярности и соединенных электрически и механически с одной стороны между собой, а с другой стороны – с токовыводами генератора тока. Технический результат предложенного решения состоит в улучшении технологичности изготовления, использования и обслуживания индуктора за счет его разъемной конструкции, а также в увеличении его долговечности. 2 н.п. ф-лы, 6 ил., 1 табл.



Фиг. 3а

Изобретение относится к электротехнике, к устройствам для магнитно-импульсной обработки материалов (обжим, формовка, калибрование, сварка трубчатых заготовок и т.д.), использующим ток высокой частоты и большой амплитуды для генерации сильного импульсного магнитного поля (СМП) с индукцией выше 10 Тл, точнее к конструкции индуктора этих устройств.

ПРЕДШЕСТВУЮЩИЙ УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ

Известны способы магнитно-импульсной обработки материалов, в основе которых лежит бесконтактное возбуждение внешним сильным импульсным магнитным полем индуктора (соленоида) электромеханических усилий в проводящем теле, непосредственно подвергающемся их действию или передающем эти усилия на другой материал, например, порошок, в случае магнитно-импульсного прессования [1]. Для большинства задач магнитно-импульсной обработки, в частности, магнитно-импульсной сварки металлов, требуется применение коротких импульсов СМП большой амплитуды, длительность полупериода колебаний 5–30 мкс, амплитуда магнитного поля 20–50 Тл. Большая величина индукции магнитного поля в канале индуктора, до 50 Тл, и импульсного тока для ее создания определяют основные проблемы при конструировании устройств многократной генерации: (1) создание токовых контактов, работающих в «безыскровом» режиме и (2) высокая механическая прочность индуктора.

Самую простую, механически прочную конструкцию с низкой индуктивностью для получения коротких импульсов СМП аксиальной симметрии имеют одновитковые соленоиды, представляющие собой массивный виток – втулку с радиальным разрезом, часто называемым щелью или прорезью, с двумя токопроводами (токовыми коллекторами), как правило, выполненными в виде бифилярной передающей линии из параллельных пластин постоянной или переменной ширины. Описание подобной конструкции, являющейся одним из аналогов по настоящему изобретению, можно найти в работе [2].

При создании в одновитковых соленоидах коротких импульсов СМП амплитудой до 50 Тл величина импульсного тока достигает значений около 1 МА и более. Известно [3], что для предотвращения существенной эрозии контактных поверхностей, линейная плотность тока в таком контакте не должна превышать величину около 40–50 кА/см для стали и меди. Использование в качестве основной характеристики именно линейной плотности тока обусловлено протеканием (перетеканием в зоне контакта) высокочастотного тока в тонком слое толщиной порядка толщины классического скин-слоя $\Delta = (\rho/(\mu_0 \cdot \pi \cdot f))^{1/2}$, где ρ – удельное сопротивление, μ_0 – магнитная постоянная, f – частота тока. Зачастую, длину контакта оценивают по периметру крепежных элементов, обеспечивающих контакт двух проводников, и их количеству. Так, при токе 1 МА длина безыскрового контакта должна быть не менее 200 мм; при этом типичная длина рабочей области индукторов СМП, в частности, индукторов для магнитно-импульсной сварки, составляет 10–20 мм, то есть в 10-20 раз меньше длины контактов. Если уменьшать длину контактов, происходит их сильная эрозия и быстрый износ. Искрение помимо этого приводит к ускорению деградации и пробоем диэлектрика, разделяющего элементы индуктора и токовых коллекторов разной полярности.

Другой упомянутой проблемой является механическая прочность кольцевого витка. Генерируемое индуктором импульсное магнитное поле в рабочей области и области щели оказывает на него силовое воздействие, стремясь разорвать виток в радиальном направлении давлением P_M , пропорциональным квадрату индукции магнитного поля B , $P_M = B^2/2\mu_0$, где μ_0 – магнитная постоянная [4]. Для удержания магнитного поля внешний диаметр витка должен быть хотя бы в 3 раза больше внутреннего. При этом, даже в таком массивном кольцевом витке

область, противоположная прорези, характеризуется наибольшей величиной механических напряжений растяжения, обусловленных возникновением в процессе генерации поля изгибающих усилий, и является наиболее слабым местом витка. Здесь и далее влияние на прочность индуктора термических эффектов не обсуждается и не затрагивает сути изобретения. Также отметим, что малые времена нарастания индукции магнитного поля обуславливают малые диффузионные потери [4], что позволяет использовать в качестве материала индуктора во многих случаях малоуглеродистые качественные или среднеуглеродистые конструкционные стали, предпочтительнее последние, имеющие высокое значение временного сопротивления разрыву после улучшения термообработкой, 1–1,5 ГПа, несмотря на их относительно низкую электропроводность.

Аналогами одновиткового индуктора по настоящему изобретению авторы считают индукторы типовой конструкции, описанные, например, в [5]. В работе [5] одновитковый индуктор был выполнен цельной деталью из малоуглеродистой стали (Ст. 3) в виде кольцевого витка со щелью и токопроводами в виде передающей линии, имеющими уширение в плоскости щели витка. Размеры витка: наружный диаметр 40 мм, внутренний диаметр 30 мм, длина 30 мм. Переход от витка соленоида к уширенным токопроводам, согласно изображениям, был выполнен под прямым углом без скосов и скруглений, что приводит к нежелательной концентрации тока в этих местах; это следует отнести к одному из недостатков данного аналога. К торцам токопроводов под прямым углом были присоединены сваркой клеммы в виде плоских площадок с крепежными отверстиями для подключения к коллектору генератора тока; при этом ширина площадок была почти вдвое больше ширины токопроводов. Условия тестирования: частота – 65 кГц (длительность периода 15,4 мкс), ток в первом максимуме – 1060 кА, амплитуда поля – 21 Тл.

Там же авторы приводят конструкцию толстостенного одновиткового соленоида, представляющего собой массивный виток со щелью и двумя клеммами в виде плоских площадок с крепежными отверстиями для подключения к коллектору генератора тока, присоединенными сваркой по касательной к витку в области щели. Внешний и внутренний диаметры витка составляли соответственно 190 и 44 мм, длина индуктора 90 мм, длина рабочего канала 30 мм за счет фаски под 45° на торцевых кромках внутреннего канала. Ширина контактных площадок по длине индуктора составляла 180 мм. Условия тестирования: частота – 10 кГц (длительность периода 100 мкс), ток в первом максимуме – 1600 кА, амплитуда поля – 25 Тл. Типичная картина разрушения индукторов – аналогов, приведенная авторами в [5], – полный разрыв витка толщиной 5 мм (после пятого разряда) или образование трещины в толстостенном витке (после 25 разряда) в области напротив щели. Отметим, что приведенная схема присоединения клеммных площадок с использованием сварки не обеспечивает равномерного протекания тока в месте соединения контактных площадок к токопроводам в пространстве между токопроводами, т.к. осуществление сварки в этом месте затруднительно. Этот недостаток присущ обеим конструкциям, приведенным в [5]. Также авторами не дается описание поведения и состояния контактов после испытания индукторов (токи – до 1,6 МА), что является существенным моментом для устройств многократной генерации. По всей видимости, такой задачи не ставилось.

К общим недостаткам аналогов, имеющих типовую для одновитковых индукторов конструкцию, в частности, приведенных в [5], следует отнести следующее.

1. Малая длина рабочего канала (витка) индуктора в сравнении с длиной контактов и одновременно близкое расположение витка к поверхности подключения приводит к

выраженному коллекторному эффекту [4]. Вследствие этого, область затекания тока в контактах значительно меньше их ширины, что приводит к сильной и неравномерной их эрозии.

2. На внутренней поверхности канала индуктора в области напротив щели находится область интенсивных механических напряжений растяжения, которые инициируют быстрое разрушение индуктора.

3. Массивный виток соленоида с токопроводами приходится изготавливать цельной деталью. Во-первых, это требует больших затрат материала, поскольку диаметр витка соленоида, как правило, больше суммарной толщины токопроводов в 3 и более раз. Во-вторых, это приводит к увеличению массогабаритных характеристик индукторной системы. Применение для этих целей пайки или сварки снижает долговечность индуктора. Использование токопроводов на поджиме к витку индуктора, как, например, предложено в [6], имеет существенное ограничение на размеры индукторной системы, также приводит к увеличению массогабаритных характеристик и не решает в должной мере вопроса эрозии контактов.

Наиболее близким аналогом – прототипом, авторы считают индуктор, описанный в [7].

Схематичное изображение принципиальных элементов конструкции прототипа приведено на Фиг. 1. Виток такого индуктора или, точнее сказать, тело 1 и токопроводы 3 и 4 выполнены из цельной пластины. Отверстие в пластине образует рабочий канал индуктора 2, а выполненный разрез от отверстия до края пластины есть щель индуктора 5, разделяющая часть пластины на два токопровода разной полярности, 3 и 4. Отверстия 6 по краям пластин токопроводов служат для присоединения индуктора к коллекторному устройству (клеммам) генератора тока.

Приблизительная область контакта 7 показана штриховкой, контакт есть и с противоположной стороны пластины. Для ясности, с типом коллекторного устройства можно ознакомиться там же в [7].

В отличие от типовой конструкции аналогов, плоскость затекания тока в прототипе перпендикулярна оси индуктора. Далее ток протекает по внутренним поверхностям передающей линии (в области щели). При этом длина передающей линии порядка двух толщин пластины является достаточной для исключения влияния на распределение тока в канале индуктора коллекторного эффекта, обусловленного перетеканием тока от контактов в передающую линию показанным стрелками на Фиг. 1.

Описанная конструкция прототипа по сравнению с аналогами проще в изготовлении и характеризуется снижением затрат материала и массогабаритных характеристик. Все это следует отнести к достоинствам прототипа. К недостаткам прототипа следует отнести нерешенную в должной мере проблему снижения плотности тока в контактах, которая может быть решена, в частности, путем подбора ширины пластины и/или количества крепежных элементов и/или типа коллекторного устройства. Другим его недостатком является достаточно высокая индуктивность передающей линии за счет ее малой ширины, равной толщине пластины, сравнимая с индуктивностью витка индуктора, что снижает эффективность передачи магнитной энергии в рабочую область индуктора. Также нерешенной проблемой остается наличие области интенсивных механических напряжений растяжения на внутренней поверхности канала индуктора в области напротив щели, инициирующих быстрое его разрушение.

Все вышеизложенное составляет суть технической проблемы. Технической задачей изобретения является создание конструкции индуктора, лишенной части недостатков прототипа, а именно, со сниженной линейной плотностью тока в контактах разъёмного подключения и индуктивностью,

а также без области интенсивных механических напряжений растяжения на внутренней поверхности канала индуктора в области напротив щели.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ СУЩНОСТИ

Поставленная задача решается благодаря тому, что одновитковый индуктор выполняется составным и разъемным из двух или из трёх токопроводов - прямоугольных пластин, имеющих в определенном месте вырез по ширине в виде трапеции и симметричное относительно продольной оси этих пластин утолщение в виде бобышки, имеющей на внутренней грани полуцилиндрическую выемку, так что при составлении пластин образуется бифилярная передающая линия с обеспечением равномерного изоляционного зазора между токопроводами разной полярности, содержащая сквозное отверстие поперек пластин – рабочий канал индуктора. С одной стороны пластины соединяются между собой, а с другой – с токовыводами генератора тока. В случае использования трех пластин, одна является потенциальным токопроводом, две другие – нулевыми; при составлении вместе потенциальный токопровод располагается в середине. В такой системе ток протекает преимущественно по примыкающим поверхностям токопроводов, образующим бифилярную линию, а при приближении к трапециевидным участкам с бобышками перетекает на их внутренние грани – области щели и канала индуктора. Достаточно широкие пластины позволяют снизить линейную плотность тока в контактах и обеспечивают пониженную индуктивность токопроводов в сравнении с прототипом. Разъемная конструкция индуктора делает его более технологичным в изготовлении и обслуживании.

ОПИСАНИЕ ФИГУР

Предложенное изобретение будет описано со ссылкой на следующие чертежи:

Фиг. 1 иллюстрирует схематичное изображение принципиальных элементов конструкции выбранного прототипа по [7] (предшествующий уровень техники), где 1 – тело индуктора из пластины, 2 – цилиндрический канал индуктора, 3, 4 – потенциальный и нулевой токопроводы, 5 – изоляционный зазор (щель), 6 – крепежные отверстия для соединения индуктора с коллекторным устройством, 7 – приблизительная область перетекания тока в контактах.

Фиг. 2 иллюстрирует вариант конструкции одновиткового индуктора, выполненного из двух пластин. На Фиг. 2а показаны эскизы деталей, на Фиг. 2б – индуктор в сборе и сечение в области канала индуктора, где 1 – потенциальный токопровод, 2 – нулевой токопровод, 3 – рабочий канал индуктора, 4 – поверхность контакта между деталями, 5 – контактные области для подключения к токовыводам генератора тока, 6 – изоляционный зазор, 7 – фаска на кромках рабочего канала. Стрелками схематично показано направление протекания тока.

Фиг. 3 иллюстрирует вариант конструкции одновиткового индуктора, выполненного из трех пластин. На Фиг. 3а показаны эскизы деталей, на Фиг. 3б – индуктор в сборе и сечение в области канала индуктора, где 1 – потенциальный токопровод, 2 – нулевые токопроводы, 3 – рабочий канал индуктора, 4 – поверхность контакта между деталями, 5 – контактные области для подключения к токовыводам генератора тока, 6 – изоляционный зазор, 7 – фаска на кромках рабочего канала. Стрелками схематично показано направление протекания тока.

Фиг. 4 иллюстрирует типичные импульсы тока (а) и магнитной индукции (б) при разряде емкостного накопителя ($C = 425$ мкФ, зарядное напряжение 8 кВ) для индукторов двух конструкций: (1) – заявляемый индуктор, (2) – аналог. Размеры рабочей области индукторов: длина 12 мм у обоих, диаметр 8,6 мм у заявляемого, 8,3 мм у аналога.

ПОДРОБНОЕ ОПИСАНИЕ

Согласно настоящему изобретению, предлагаются два варианта конструкции одновиткового индуктора, выполненного из пластин и избавленного от части недостатков прототипа, а именно, со сниженными линейной плотностью тока в контактах разъёмного подключения и индуктивностью, а также без области интенсивных механических напряжений растяжения на внутренней поверхности канала индуктора в области напротив щели.

В первом варианте индуктор состоит из двух токоведущих прямоугольных пластин (токопроводов): “потенциальной” 1 и “нулевой” 2 (Фиг. 2а). Каждая пластина имеет в определенном месте, как показано на Фиг. 2а, вырез по ширине в виде трапеции и симметричное по форме относительно продольной оси пластины утолщение в виде бобышки, имеющей на внутренней грани полуцилиндрическую выемку, выполненную по всей толщине. Вырезы и бобышки изготавливают в таких размерах, что при составлении двух пластин (Фиг. 2б) образуется бифилярная передающая линия с равномерным зазором δ между токоведущими деталями разной полярности, а рабочий канал индуктора 3 формируется полуцилиндрическими соосными выемками на гранях токопроводов разной полярности. С одной стороны токопроводы соединяются между собой, а с другой – с токовыводами генератора тока через контактные площадки 5; при этом в контактной области 4 пластины соединяются разъёмно, и в одной из них или в обеих пластинах выполняется утолщение, равнозначное по суммарной толщине изоляционному зазору δ , или соединяются через металлическую прокладку по толщине изоляционного зазора δ , составляющего 0,1–1 мм. Зазор менее 0,1 мм будет иметь недостаточную электрическую прочность, а зазор более 1 мм – приводить к необоснованному увеличению индуктивности. Количество и типоразмер крепежных элементов определяется требуемым усилием прижатия пластин друг к другу.

Поскольку высокочастотный импульсный ток протекает преимущественно в приповерхностном слое деталей в местах, где детали располагаются близко друг к другу, и проходит по пути наименьшего полного сопротивления (импеданса), этот путь будет стремиться охватить контур наименьшей длины и площади. В такой системе ток протекает по внутренним поверхностям передающей линии и при приближении к участкам с бобышками перетекает на их внутренние грани – области щели(ей) и канала индуктора. Таким образом, ток будет концентрироваться на поверхности рабочего канала индуктора 3, сформированного полуцилиндрическими выемками в токопроводах. Направление тока по поверхностям деталей схематично показано на Фиг. 2 стрелками.

Во втором варианте (Фиг. 3) индуктор состоит из трех токоведущих прямоугольных пластин (токопроводов): “потенциальной” 1 и двух “нулевых” 2, имеет вдвое меньшую плотность тока в контактах и характеризуется сниженной их эрозией. Индуктор может быть подключен к трехпроводному коллектору генератора тока или коллектору коаксиального типа, как будет описано далее.

Как и в предыдущей конструкции (вариант 1), каждая пластина-токопровод имеет в определенном месте, как показано на Фиг. 3а, вырез в виде трапеции и симметричное по форме относительно продольной оси токопровода утолщение в виде бобышки, имеющей на внутренней грани полуцилиндрическую выемку, выполненную по всей толщине. В отличие от предыдущей конструкции, “потенциальный” токопровод 1 имеет утолщения в виде трапеции по обеим сторонам, а “нулевые” 2 – с одной стороны, и составляют друг с другом зеркальную пару. При этом площадь контактных поверхностей в данной конструкции вдвое больше. Упомянутые вырезы

и бобышки изготавливают в таких размерах, что при составлении трех токопроводов так, что “потенциальный” токопровод располагается между “нулевыми”, образуется трехпроводная бифилярная передающая линия с равномерными зазорами δ между токоведущими деталями разной полярности, а рабочий канал индуктора Z формируется полуцилиндрическими соосными выемками на гранях токопроводов разной полярности (Фиг. 3б). С одной стороны три токопровода соединяются между собой, а с другой – с токовыводами генератора тока; при этом в контактной области 4 пластины соединяются разъёмно, и в одной, двух или во всех пластинах выполняется утолщение, равнозначное по суммарной толщине изоляционному зазору δ , или через металлические прокладки по толщине изоляционного зазора δ , составляющего 0,1–1 мм. Количество и типоразмер крепежных элементов определяется требуемым усилием прижатия пластин друг к другу.

Прохождение тока по поверхностям деталей аналогично предыдущей конструкции, с той лишь разницей, что по средней детали ток протекает с обеих сторон, что вдвое снижает линейную плотность тока. Направление тока по поверхностям деталей схематично показано на Фиг. 3 стрелками. При необходимости, для увеличения индукции поля длина рабочего канала индуктора может быть уменьшена изготовлением фасок 7, как показано на Фиг. 2 и 3, с углом относительно оси канала в интервале 90–45° (на фигурах приведена фаска с углом 75°). Изготовление фасок с углом меньше 45° приводит к чрезмерному перераспределению тока из рабочего канала на поверхности фасок.

В предложенных вариантах конструкции индуктора проблема снижения плотности тока в контактах решается путем подбора ширины токопроводов (передающей линии) и/или количества крепежных элементов и/или типа коллекторного устройства. Кроме того, достаточно широкие токопроводы обеспечивают пониженную индуктивность, в отличие от прототипа.

Как было упомянуто ранее, малые времена нарастания индукции магнитного поля обуславливают малые диффузионные потери, что позволяет использовать в качестве материала индуктора сталь, несмотря на ее относительно низкую электропроводность. Предложенная конструкция может быть выполнена из малоуглеродистых качественных или среднеуглеродистых конструкционных сталей, предпочтительнее последних, имеющих значение временного сопротивления разрыву после улучшения термообработкой не менее 1 ГПа с удельным электросопротивлением в интервале 20–60 мкОм·см или других металлических сплавов с характеристиками не хуже указанных. Значение 1 ГПа соответствует давлению на проводник магнитного поля в 50 Тл; в случае применения материала с удельным сопротивлением значительно больше 60 мкОм·см значительно возрастают диффузионные потери.

Технический результат предложенного решения состоит в улучшении технологичности изготовления, использования и обслуживания индуктора за счет его разъёмной конструкции; увеличении его долговечности за счет формирования двух симметричных щелей, снижающих разрушающее действие концентраторов напряжений; в увеличении стойкости контактов и, соответственно, периода обслуживания, из-за снижения линейной плотности тока в контактных областях за счет использования токопроводов в виде передающей линии с достаточной шириной токопроводов, обеспечивающей, к тому же, сниженную индуктивность; в улучшении массогабаритных характеристик индуктора за счет бифилярной конструкции. Предложенная конструкция индуктора может быть также использована в качестве первичной катушки магнитной системы с концентратором потока.

Предлагаются следующие варианты конструкции индуктора:

1. Одновитковый индуктор сильного аксиального магнитного поля, выполненный в виде прямоугольной пластины и имеющий цилиндрический канал, расположенный поперек пластины, потенциальный и нулевой токопроводы, разделенные изоляционным зазором, и контактные области с крепежными отверстиями для подключения к клеммам генератора тока, отличающийся тем, что индуктор выполнен разъемным из двух прямоугольных пластин – токопроводов, потенциального и нулевого, имеющих вырез по ширине в виде трапеции и симметричное по форме относительно продольной оси токопровода утолщение в виде бобышки, имеющей на внутренней грани полуцилиндрическую выемку по всей толщине, составленных бифилярно с образованием плоскопараллельной передающей линии из токопроводов с обеспечением равномерного изоляционного зазора между токопроводами разной полярности и формированием цилиндрического канала индуктора полуцилиндрическими соосными выемками на гранях токопроводов разной полярности, и соединенных электрически и механически с одной стороны между собой, непосредственно с изготовлением в одной из пластин или обеих пластинах утолщения, равнозначного по суммарной толщине изоляционному зазору, или через металлическую прокладку по толщине изоляционного зазора, а с другой стороны – с токовыводами генератора тока; при этом для увеличения индукции поля длина рабочего канала индуктора может быть уменьшена изготовлением фасок с углом относительно оси канала в интервале $90-45^\circ$, а допустимые параметры линейной плотности тока в контактах и механическая жесткость конструкции достигаются подбором толщины и ширины токопроводов в передающей линии и/или количества и типоразмера крепежных элементов, а также по возможности упрочняющей обработкой используемых материалов, например, малоуглеродистых качественных или среднеуглеродистых конструкционных сталей, предпочтительнее последних, имеющих значение временного сопротивления разрыву после улучшения термообработкой не менее 1 ГПа с удельным электросопротивлением в интервале 20–60 мкОм·см или других металлических сплавов с характеристиками не хуже указанных.

2. Одновитковый индуктор сильного аксиального магнитного поля, выполненный в виде прямоугольной пластины и имеющий цилиндрический канал, расположенный поперек пластины, потенциальный и нулевой токопроводы, разделенные изоляционным зазором, и контактные области с крепежными отверстиями для подключения к клеммам генератора тока, отличающийся тем, что индуктор выполнен разъемным из трех прямоугольных пластин – токопроводов, потенциального и двух нулевых, имеющих в определенном месте вырез по ширине в виде трапеции и симметричное по форме относительно продольной оси пластины утолщение в виде бобышки, имеющей на внутренней грани полуцилиндрическую выемку по толщине, причем потенциальный токопровод имеет утолщения по обеим сторонам, а нулевые – с одной стороны, и составляют друг с другом зеркальную пару, составленных бифилярно с образованием плоскопараллельной передающей линии из трех токопроводов с обеспечением равномерных изоляционных зазоров между токопроводами разной полярности и формированием цилиндрического канала индуктора полуцилиндрическими соосными выемками на гранях токопроводов разной полярности, и соединенных электрически и механически с одной стороны между собой, непосредственно с изготовлением в одной или двух или всех пластинах утолщения, равнозначного по суммарной толщине изоляционному зазору, или через металлические прокладки по толщине изоляционного зазора, а с другой стороны – с токовыводами генератора тока; при этом для увеличения индукции поля длина рабочего канала индуктора может быть уменьшена изготовлением фасок с углом относительно оси канала в интервале $90-45^\circ$, а допустимые параметры линейной плотности тока в контактах и механическая жесткость конструкции достигаются подбором толщины и ширины токопроводов в передающей линии

и/или количества и типоразмера крепежных элементов, а также по возможности упрочняющей обработкой используемых материалов, например, малоуглеродистых качественных или среднеуглеродистых конструкционных сталей, предпочтительнее последних, имеющих значение временного сопротивления разрыву после улучшения термообработкой не менее 1 ГПа с удельным электросопротивлением в интервале 20–60 мкОм·см или других металлических сплавов с характеристиками не хуже указанных.

ПРИМЕР ИСПОЛНЕНИЯ

Одновитковый индуктор сильного аксиального магнитного поля, лишенный части недостатков прототипа, а именно, со сниженными линейной плотностью тока в контактах разъёмного подключения и индуктивностью, а также без области интенсивных механических напряжений растяжения на внутренней поверхности канала индуктора в области напротив щели, выполненный из трёх прямоугольных пластин-токопроводов и имеющий цилиндрический канал, расположенный поперек этих пластин, потенциальный и нулевой токопроводы, разделенные изоляционным зазором, и контактные области с крепежными отверстиями для подключения к клеммам генератора тока был изготовлен из стали 30ХГСА с временным сопротивлением разрыву после улучшения термообработкой около 1,1–1,2 ГПа и удельным электросопротивлением 42 мкОм·см. Потенциальная и нулевые пластины-токопроводы были изготовлены из листовой заготовки толщиной 20 мм фрезерованием и сверлением, последующей закалкой и отпуском по стандартному режиму и финишной обработкой шлифованием. С целью повышения индукции поля в рабочем канале индуктора в токопроводах были выполнены фаски по кромкам канала. При сборке индуктора использовали комбинированную изоляцию: наносили тонкие слои полиуретана в виде спрея, применяли лавсан в виде пленки толщиной 0,02 мм (несколько слоев) и фторопласт-4 в виде пленки толщиной 0,25 мм.

Изготовленный трёхпроводный образец индуктора сравнили с традиционным одновитковым индуктором типовой конструкции, также изготовленным из закаленной стали 30ХГСА. Индуктор-аналог представлял собой цельную токарно-фрезерованную деталь с клеммами для подключения к генератору тока. Индукторы обеих конструкций были изготовлены с рабочим каналом примерно одинаковых размеров (Таблица 1).

Для тестирования трёхпроводный образец индуктора подключали к коаксиальному токовому коллектору генератора импульсных токов ГИТ-135 (ИЭФ УрО РАН). Для подключения обоих индукторов использовали переходные узлы. Генератор тока представляет собой емкостной накопитель энергии ($C = 425$ мкФ) с максимальным зарядным напряжением 25 кВ, выполненный с низкими собственными омическим сопротивлением и индуктивностью, соответственно 1,5 мОм и 15 нГн; ток короткого замыкания до 2,5 МА с временем нарастания около 5 мкс.

Индукторы тестировали при различных зарядных напряжениях генератора, в экспериментах регистрировали производную тока di/dt через индуктор с помощью пояса Роговского, производную магнитного поля dB/dt индуктивным датчиком в центре индукторов. Временные зависимости тока и магнитного поля получали численным интегрированием. Индуктивность и сопротивление разрядного контура определяли из временных зависимостей разрядного тока по методике, описанной в [4].

На Фиг. 4а, б приведены временные зависимости тока и магнитного поля для индукторов двух конструкций при зарядном напряжении генератора 8 кВ. Частота разрядного тока (Фиг. 4а) для обоих индукторов практически не отличалась и составляла около 37 кГц. Также незначительно

отличается и сопротивление контура, что хорошо видно по затуханию колебаний тока. В Таблице 1 обобщены геометрические и электрические характеристики индукторов двух конструкций, измеренные при зарядном напряжении ГИТ 8,0 кВ.

Таблица 1

Геометрические и электрические характеристики индукторов двух конструкций.

Характеристика	Обознач.	Ед. измер.	Заявляемый	Аналог
Габаритная длина индуктора	l_m	мм	24*	30
Длина рабочего канала	l_k	мм	12	12
Диаметр рабочего канала	d_k	мм	8,6	8,3
Полупериод тока	$T/2$	мкс	13,2	13,0
Амплитуда тока	I_m	кА	666	684
Амплитуда магнитного поля	B_m	Тл	33,8	34,0
Геометрический фактор	B_m/I_m	Тл/МА	50,8	49,7
Индуктивность контура	L	нГн	48	46
Сопротивление контура	R	МОм	4,8	3,9

* – по краям нулевых пластин, без крепёжных болтов.

Таким образом, сравнение разработанного индуктора с индуктором типовой конструкции – аналогом, показало идентичность его потребительских характеристик, таких как индуктивность разрядного контура в сборе с индуктором и эффективность преобразования электрической энергии емкостного накопителя в магнитную энергию (геометрический фактор B_m/I_m). При этом было достигнуто снижение линейной плотности тока в сильноточных контактах и улучшение их стойкости к эрозии, а также снижена концентрация напряжений в области напротив щели за счет увеличенной жесткости витка с прорезью и частичной компенсации усилий в области щели индуктора конструктивным исполнением токопроводов. В натурных испытаниях индуктор продемонстрировал стабильность характеристик в серии из ста импульсов СМП с индукцией на уровне 20 Тл. Деградации в области канала индуктора и контактов не наблюдалось.

ЦИТИРУЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Миронов В.А. Магнитно-импульсное прессование порошков // Рига: Зинатне, 1980, 196 с.
2. Herlach F. Megagauss fields in single turn coils / F. Herlach, R. McBroom // J. Phys. E. 1973. Vol. 6 (7). P. 652–654.
3. Fridman B.E. Electrical contacts and conductors for megaamperes pulse currents / B.E. Fridman, P.G. Rutberg // PPPS-2001 Pulsed Power Plasma Science 2001. 28th IEEE International Conference on Plasma

Science and 13th IEEE International Pulsed Power Conference. Digest of Papers (Cat. No.01CH37251). IEEE, 2002. Vol. 1. P. 314–317.

4. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля: методы генерации и физические эффекты, связанные с созданием импульсных полей мегаэрстедного диапазона / Гейнц Кнопфель; [пер. с англ. Ф. А. Николаева и Ю. П. Свириденко]. М.: Мир, 1972. - 392 с.

5. Дашук П.Н. Техника больших импульсных токов и магнитных полей / П.Н. Дашук, С.Л. Зайенц, В.С. Комельков и др.; Под общ. ред. д-ра техн. наук В.С. Комелькова. – М. : Атомиздат, 1970. - 472 с.

6. Pat. 6137094 United States, Int. Cl.⁷ H05B 6/36. External inductor for magnetic-pulse welding and forming / Kistersky Ludmila, Dudko Daniil, Shevchenko Viacheslav. - Appl. № 09/383,822; Filed Aug. 27, 1999; Pub. Oct. 24, 2000.

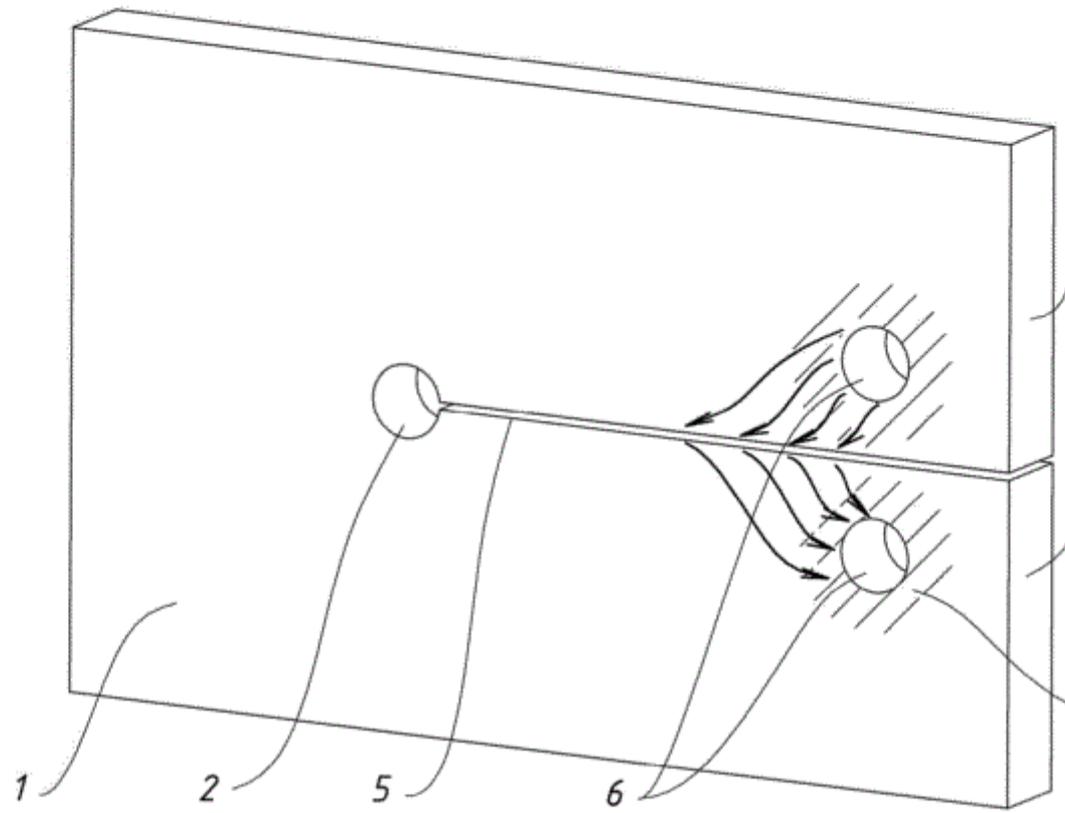
7. Chikazumi S. Production of magnetic fields in megagauss region and related measuring techniques / S. Chikazumi, N. Miura, G. Kido, M. Akihiro // IEEE Trans. Magn. 1978. Vol. 14, № 5. P. 577–585.

Формула изобретения

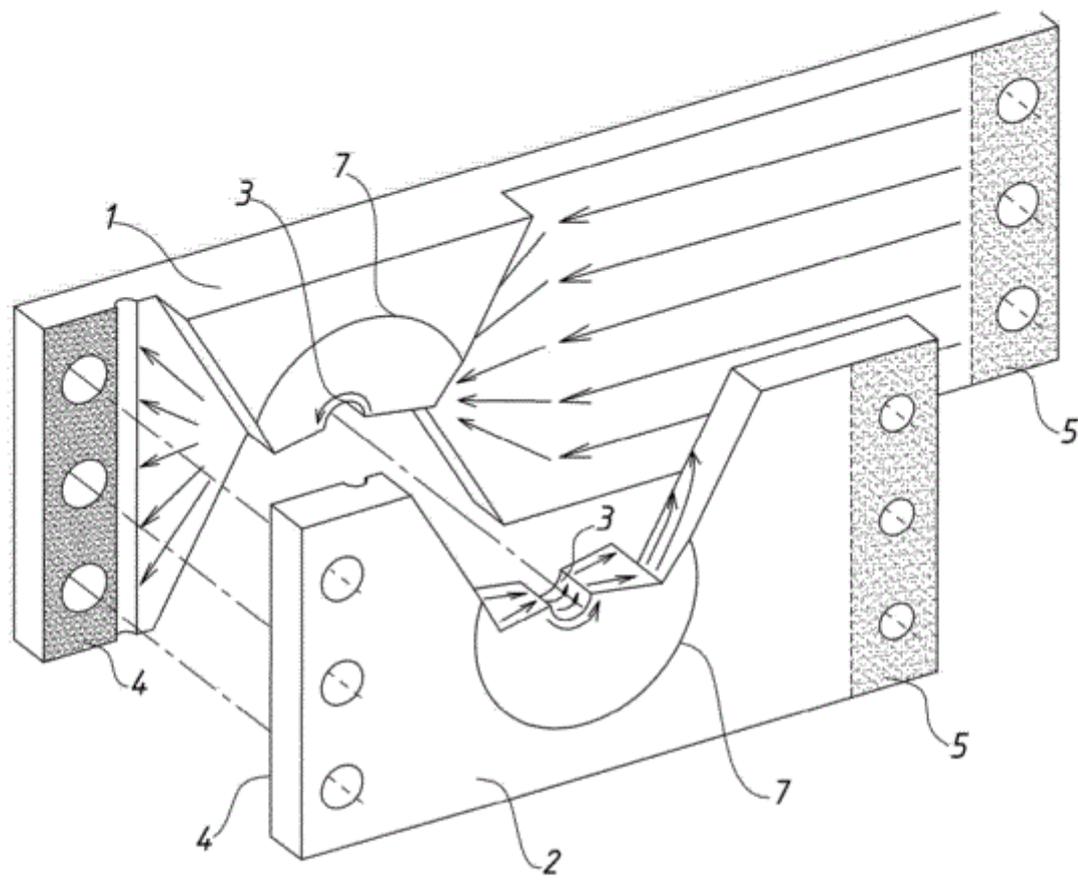
1. Одновитковый индуктор сильного аксиального магнитного поля, выполненный в виде прямоугольной пластины и имеющий цилиндрический канал, расположенный поперек пластины, потенциальный и нулевой токопроводы, разделенные изоляционным зазором, и контактные области с крепежными отверстиями для подключения к клеммам генератора тока, отличающийся тем, что индуктор выполнен разъемным из двух прямоугольных пластин – токопроводов, потенциального и нулевого, имеющих вырез по ширине в виде трапеции и симметричное по форме относительно продольной оси токопровода утолщение в виде бобышки, имеющей на внутренней грани полуцилиндрическую выемку по всей толщине, составленных бифилярно с образованием плоскопараллельной передающей линии из токопроводов с обеспечением равномерного изоляционного зазора между токопроводами разной полярности и формированием цилиндрического канала индуктора полуцилиндрическими соосными выемками на гранях токопроводов разной полярности и соединенных электрически и механически с одной стороны между собой, непосредственно с изготовлением в одной из пластин или обеих пластинах утолщения, равнозначного по суммарной толщине изоляционному зазору, или через металлическую прокладку по толщине изоляционного зазора, а с другой стороны – с токовыводами генератора тока; на кромках рабочего канала изготовлены фаски с углом относительно оси канала в интервале 90–45°, а допустимые параметры линейной плотности тока в контактах и механическая жесткость конструкции достигаются подбором толщины и ширины токопроводов в передающей линии и/или количества и типоразмера крепежных элементов, а также упрочняющей обработкой используемых материалов, имеющих значение временного сопротивления разрыву после улучшения термообработкой не менее 1 ГПа с удельным электросопротивлением в интервале 20–60 мкОм·см.

2. Одновитковый индуктор сильного аксиального магнитного поля, выполненный в виде прямоугольной пластины и имеющий цилиндрический канал, расположенный поперек пластины, потенциальный и нулевой токопроводы, разделенные изоляционным зазором, и контактные области с крепежными отверстиями для подключения к клеммам генератора тока, отличающийся тем, что индуктор выполнен разъемным из трех прямоугольных пластин – токопроводов, потенциального и двух нулевых, имеющих в определенном месте вырез по ширине в виде

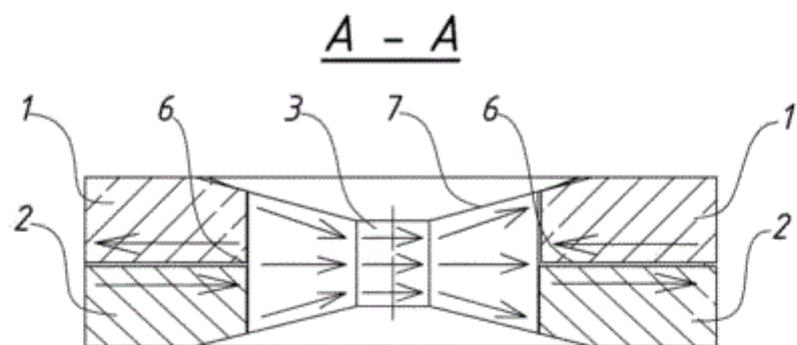
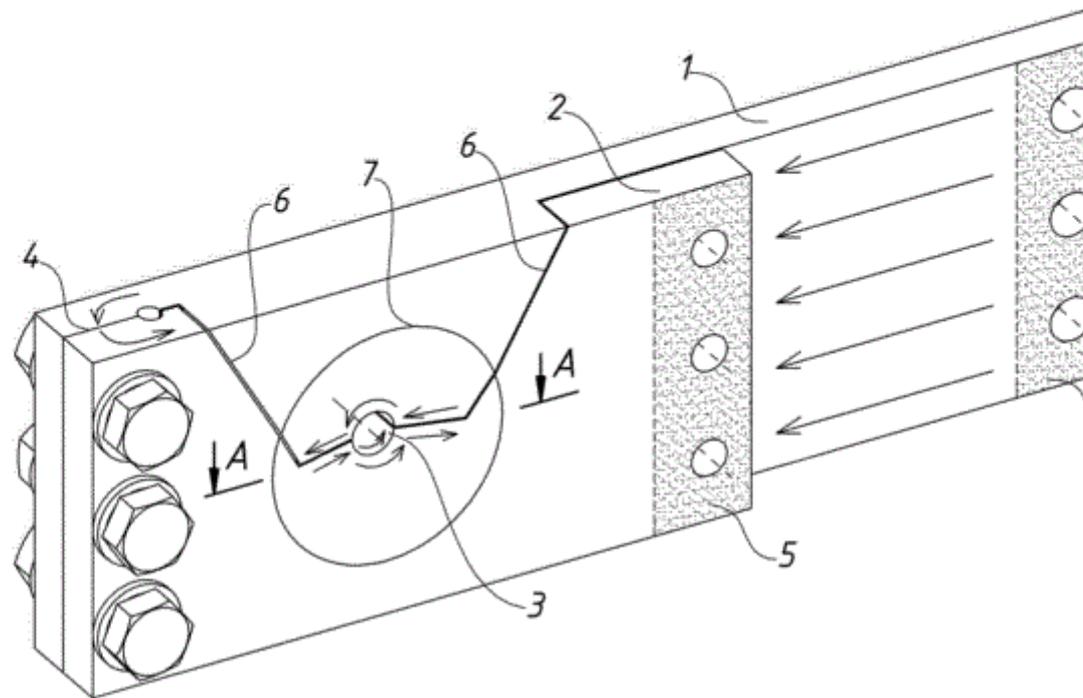
трапеции и симметричное по форме относительно продольной оси пластины утолщение в виде бобышки, имеющей на внутренней грани полуцилиндрическую выемку по толщине, причем потенциальный токопровод имеет утолщения по обеим сторонам, а нулевые – с одной стороны, и составляют друг с другом зеркальную пару, составленных бифилярно с образованием плоскопараллельной передающей линии из трех токопроводов с обеспечением равномерных изоляционных зазоров между токопроводами разной полярности и формированием цилиндрического канала индуктора полуцилиндрическими соосными выемками на гранях токопроводов разной полярности и соединенных электрически и механически с одной стороны между собой, непосредственно с изготовлением в одной или двух или всех пластинах утолщения, равнозначного по суммарной толщине изоляционному зазору, или через металлические прокладки по толщине изоляционного зазора, а с другой стороны – с токовыводами генератора тока; на кромках рабочего канала изготовлены фаски с углом относительно оси канала в интервале $90-45^\circ$, а допустимые параметры линейной плотности тока в контактах и механическая жесткость конструкции достигаются подбором толщины и ширины токопроводов в передающей линии и/или количества и типоразмера крепежных элементов, а также упрочняющей обработкой используемых материалов, имеющих значение временного сопротивления разрыву после улучшения термообработкой не менее 1 ГПа с удельным электросопротивлением в интервале 20–60 мкОм·см.



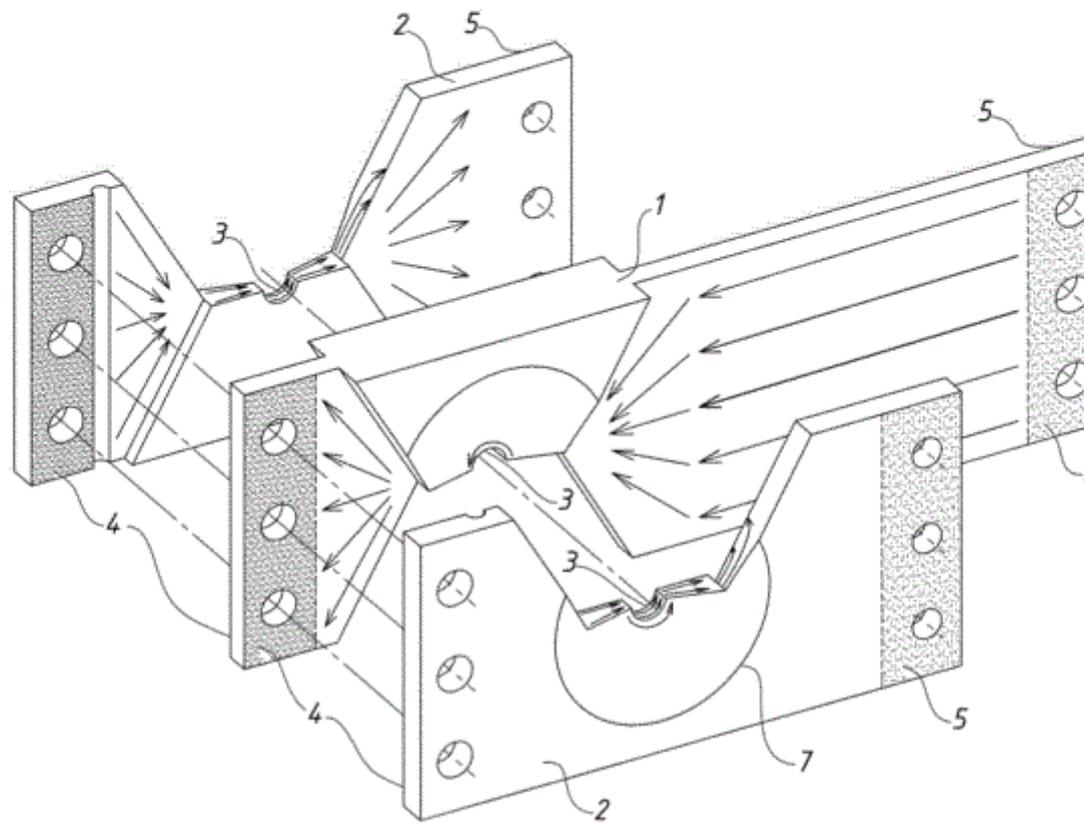
Фиг. 1



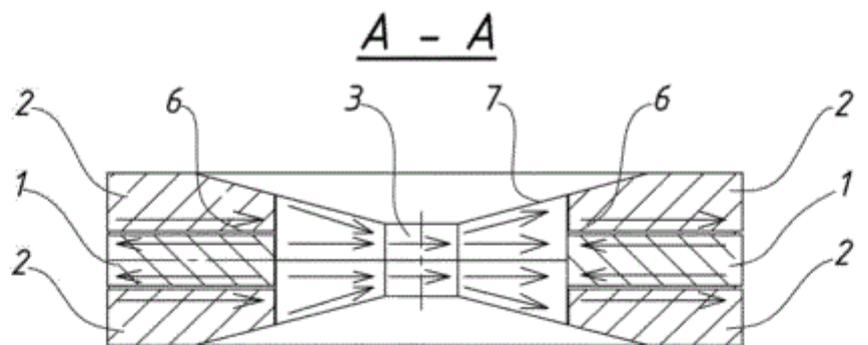
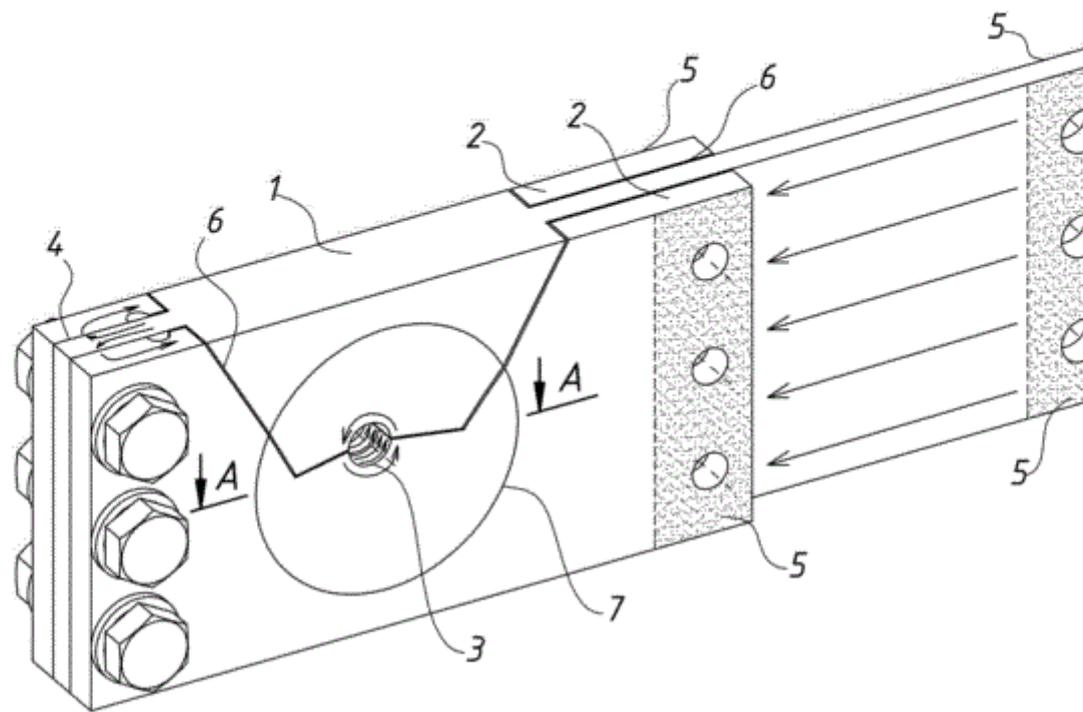
Фиг. 2а



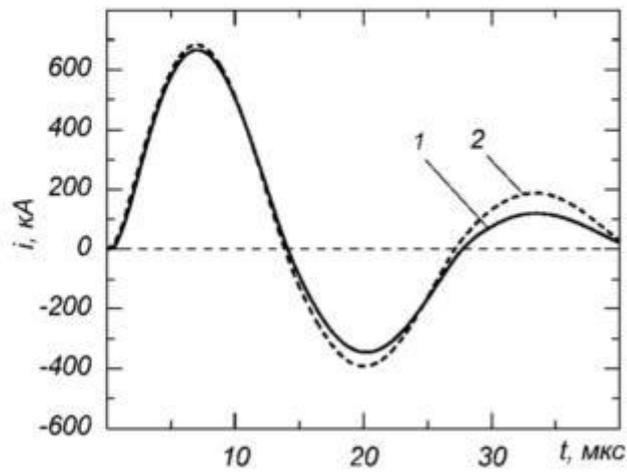
Фиг. 26



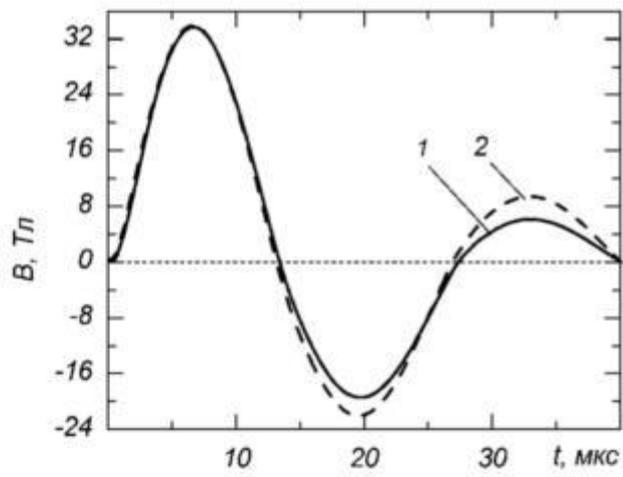
Фиг. 3а



Фиг. 36



(a)



(б)

Фиг. 4

