



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК  
*H02M 5/45 (2024.01)*

(21)(22) Заявка: 2023123521, 12.09.2023

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
12.09.2023

Дата регистрации:  
24.05.2024

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 12.09.2023

(45) Опубликовано: 24.05.2024 Бюл. № 15

Адрес для переписки:

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, УрФУ,  
Центр интеллектуальной собственности,  
Маркс Т.В.

(72) Автор(ы):

Камаев Дмитрий Алексеевич (RU),  
Лузгин Владислав Игоревич (RU),  
Фризен Василий Эдуардович (RU),  
Николаев Дмитрий Андреевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Уральский федеральный  
университет имени первого Президента  
России Б.Н. Ельцина" (RU)

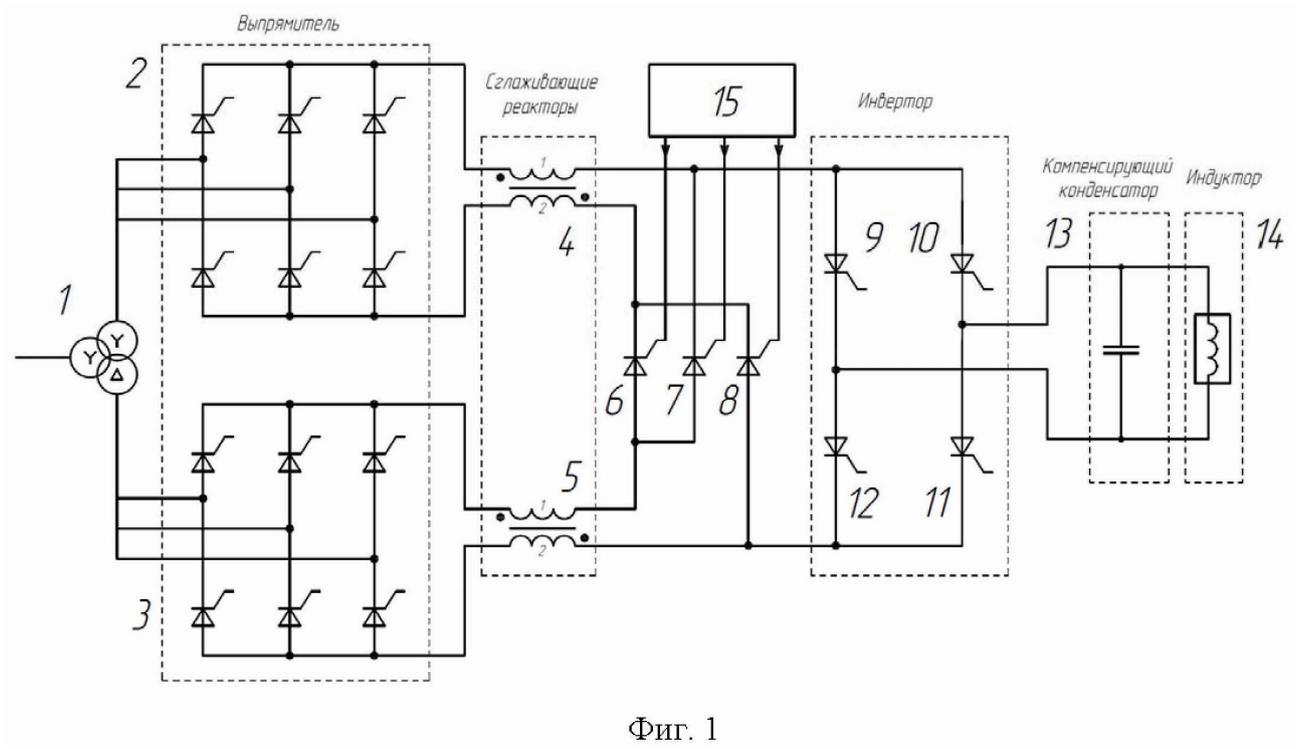
(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: SU 917282 A1, 30.03.1982. CN 1089409  
A, 13.07.1994. SU 688073 A1, 15.04.1987. CN  
103684201 A, 26.03.2014. SU 1130996 A1,  
23.12.1984. RU 2559804 C1, 10.08.2015.

(54) Преобразователь частоты с устройством коммутации постоянного тока

(57) Реферат:

Предлагаемое изобретение относится к области электротехники и металлургии, а именно к оборудованию для индукционного нагрева и плавки металлов. Техническим результатом заявленного изобретения является повышение качества потребляемой электроэнергии и снижение массогабаритных показателей сглаживающих реакторов. Преобразователь частоты состоит из двухмостового 12-пульсного выпрямителя, входные зажимы которого подключены к вторичным обмоткам силового трансформатора, а полюсы постоянного тока через обмотки двухобмоточных сглаживающих реакторов соединены параллельно и подключены к входным зажимам инвертора тока, выходные зажимы которого соединены с нагрузкой, зашунтированной компенсирующим конденсатором. Новым в предлагаемом

преобразователе является то, что в его схему дополнительно введены три тиристора, образующих устройство коммутации постоянного тока выпрямителя, один из которых включен последовательно в цепь постоянного тока между мостами выпрямителя через обмотки сглаживающих реакторов, общие выводы которых с этим тиристором соединены через два других дополнительных тиристора и другие обмотки сглаживающих реакторов с одноименными полюсами постоянного тока мостов выпрямителя. Кроме этого блок управления дополнительными тиристорами подает на первый из дополнительных тиристорov импульсы управления с регулируемой задержкой, а на два других - одновременно с импульсами управления тиристорov инвертора. 3 ил.



Фиг. 1

RU 2819809 C1

RU 2819809 C1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC  
*H02M 5/45 (2024.01)*

(21)(22) Application: **2023123521, 12.09.2023**

(24) Effective date for property rights:  
**12.09.2023**

Registration date:  
**24.05.2024**

Priority:

(22) Date of filing: **12.09.2023**

(45) Date of publication: **24.05.2024** Bull. № 15

Mail address:

**620002, g. Ekaterinburg, ul. Mira, 19, UrFU, Tsentr  
intellektualnoj sobstvennosti, Marks T.V.**

(72) Inventor(s):

**Kamaev Dmitrii Alekseevich (RU),  
Luzgin Vladislav Igorevich (RU),  
Frizen Vasilii Eduardovich (RU),  
Nikolaev Dmitrii Andreevich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federal State Autonomous Educational  
Institution of Higher Education Ural Federal  
University named after the first President of  
Russia B.N.Yeltsin (RU)**

(54) **FREQUENCY CONVERTER WITH DC SWITCHING DEVICE**

(57) Abstract:

FIELD: electrical engineering; metallurgy.

SUBSTANCE: proposed invention relates to equipment for induction heating and melting of metals. Frequency converter consists of two-bridge 12-pulse rectifier, input terminals of which are connected to secondary windings of power transformer, and DC poles are connected in parallel through windings of double-winding smoothing reactors and connected to input terminals of current inverter, output clamps of which are connected to the load shunted by the compensating capacitor. Novelty in the proposed converter is that its circuit additionally includes three thyristors forming a rectifier DC switching device, one of which is connected in series to the DC circuit between the rectifier bridges

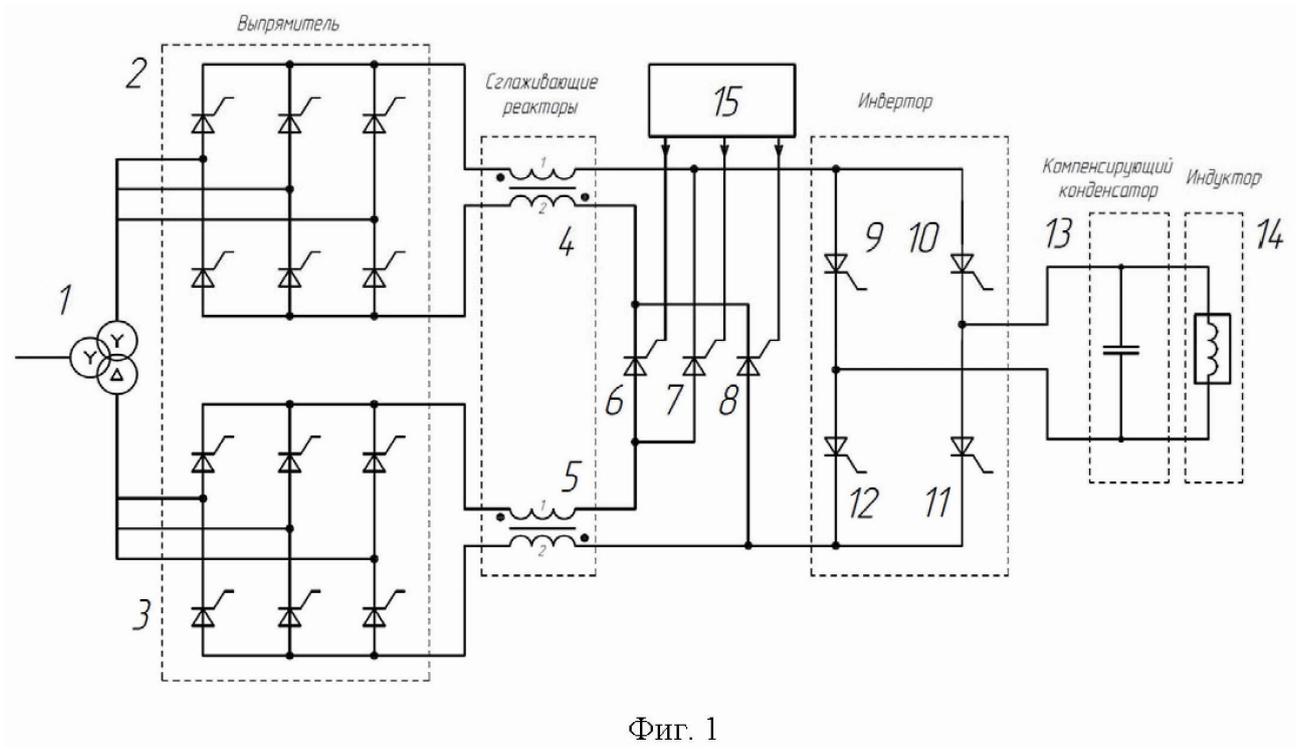
through the smoothing reactor windings, common outputs of which are connected to this thyristor through two other additional thyristors and other windings of smoothing reactors with similar poles of direct current of rectifier bridges. In addition, the additional thyristors control unit supplies to the first of the additional thyristors control pulses with an adjustable delay, and to the other two—simultaneously with the inverter thyristor control pulses.

EFFECT: improved quality of consumed electric power and reduced weight and dimensions of smoothing reactors.

1 cl, 3 dwg

**RU 2 819 809 C1**

**RU 2 819 809 C1**



Фиг. 1

RU 2819809 C1

RU 2819809 C1

Предлагаемое изобретение относится к области электротехники и металлургии, а именно, к оборудованию для индукционного нагрева и плавки металлов. В качестве источника электропитания для установок индукционного нагрева широко используются полупроводниковые преобразователи частоты, которые включают как правило, управляемый силовой выпрямитель и автономный инвертор. В установках большой мощности силовой выпрямитель выполняется по многофазной схеме выпрямления, например, по двухмостовой 12-ти фазной схеме выпрямления с параллельным или последовательным включением вентильных мостов (см. Розников Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А Силовая электроника: учебник для вузов - М.: Издательский дом МЭИ, 2009 - 632с., рис. 5.18, рис. 5.20; Информационный каталог продукции фирмы АВР "THERISTOR COBVERTER WITH PARALLEL RESONANT CIRCUIT", приложение 1; Информационный каталог продукции фирмы JUNKER "Medium-Frequency Coreless Induction Furnaces", приложение 2).

Чем выше фазность выпрямителя, тем ближе форма фазных токов к синусоидальной и ниже уровень гармонических составляющих во входном токе. Автономный инвертор может выполняться по схеме инвертора напряжения или инвертора тока. При больших мощностях электротермических установок наиболее рациональным является применение тиристорного параллельного инвертора тока (см. Розников Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А Силовая электроника: учебник для вузов - М.: Издательский дом МЭИ, 2009 - 632с, рис. 7.17).

При индукционном нагреве металлов наблюдается значительное изменение эквивалентных параметров индуктора. Наиболее широко параметры индукторной установки изменяются при нагреве ферромагнитных металлов. Для предотвращения перегрузки оборудования преобразователя частоты в процессе нагрева необходимо осуществлять регулирование входного напряжения выпрямителя и инвертора. Наиболее простым способом регулирования выпрямителя является фазовый способ управления тиристорами, при котором импульсы управления подаются на тиристоры с управляемым запаздыванием по отношению к моментам их естественной коммутации. При увеличении угла управления выпрямителя возрастает пульсация выходного тока и напряжения и уменьшается коэффициент мощности потребляемой электроэнергии. Для обеспечения коммутационной устойчивости работы инвертора при регулировании индуктивность сглаживающего реактора должна быть достаточной, при которой пульсация выходного тока не превышает допустимого уровня и не возникает режим прерывистого тока выпрямителя.

Коэффициент мощности и коэффициенты искажения входных тока и напряжения существенно зависят от угла регулирования выпрямителя, при увеличении которого снижается качество потребляемой электроэнергии. Фазовый способ регулирования постоянного тока имеет значительные недостатки, обусловленные существенными снижением качества потребляемой электроэнергии при регулировании режимов работы инвертора.

Другим способом регулирования выходного тока является использование импульсного регулятора постоянного тока, например, регулятора с последовательным ключом (см. Розников Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А Силовая электроника: учебник для вузов - М.: Издательский дом МЭИ, 2009 - 632с, рис. 6.9), позволяющий осуществлять широтно-импульсное регулирование постоянного тока. Однако для устранения коммутационных перенапряжений на выходе выпрямителя требуется установка конденсатора достаточной мощности, что увеличивает размеры и стоимость оборудования такого регулятора. Кроме этого, для снижения пульсаций в цепи

постоянного тока необходимо увеличивать индуктивность сглаживающего реактора, подвергающегося воздействию полного перепада выпрямленного напряжения при коммутации коллюча постоянного тока.

Для устранения указанных недостатков авторами предлагается преобразователь частоты с тиристорным переключателем в цепи постоянного тока двухмостового выпрямителя, в котором осуществляется переключение мостов выпрямителя с последовательного соединения на параллельное и обратно и осуществлять регулирование постоянного тока широтно-импульсным способом.

Технический результат изобретения заключается в том, что в процессе нагрева и плавки металла при изменении эквивалентного сопротивления нагрузки в широких пределах осуществляется регулирование режимов работы инвертора устройством коммутации постоянного тока при неуправляемом режиме работы выпрямителя и без снижений качества потребляемой электроэнергии на входе преобразователя.

Наиболее близким по технической сущности к заявляемому изобретению является преобразователь частоты для индукционной плавки, содержащий двухмостовой 12-пульсный выпрямитель, входы которого подключены к вторичным обмоткам силового трансформатора, а полюсы постоянного тока через обмотки двухобмоточных сглаживающих реакторов соединены параллельно и подключены к входным зажимам инвертора тока, выходные зажимы которого соединены с нагрузкой, зашунтированной компенсирующим конденсатором, а управляющие электроприборы его тиристоры подключены к выходам блока автономного управления (см. Информационный каталог продукции фирмы JUNKER "Medium-Frequency Coreless Induction Furnaces", приложение 2).

Новым является то, что в схему преобразователя введены дополнительные три тиристора, один из которых включен последовательно в цепь постоянного тока между мостами выпрямителя через одни обмотки сглаживающих реакторов, общие выводы которых с этим тиристором, соединены через два других дополнительных тиристора и другие обмотки сглаживающих реакторов с одноименными полюсами мостов выпрямителя. Кроме этого, преобразователь частоты снабжен блоком синхронного управления дополнительными тиристорами, вход которого подключен к блоку управления инвертора, а выходы соединены с управляющими электродами дополнительных тиристоры, на первый из которых, импульсы управления подаются с регулируемой задержкой, а на два других одновременно с импульсами управления тиристоры инвертора.

На фиг. 1 приведена схема преобразователя частоты, в которой обозначено:

- 1 - силовой трансформатор;
- 2, 3 - трехфазные мосты выпрямителя (образуют 12-пульсный выпрямитель);
- 4, 5 - двухобмоточные сглаживающие реакторы;
- 6, 7, 8 - дополнительные тиристоры;
- 9, 10, 11, 12 - тиристоры инвертора;
- 13 - компенсирующий конденсатор;
- 14 - индуктор;
- 15 - блок синхронного управления дополнительными тиристорами.

Преобразователь частоты работает следующим образом. При подаче силового электропитания выпрямленное напряжение появляется на выходе каждого моста выпрямителя 2, 3, равное  $E_d$ . При пуске инвертора и подаче импульсов управления, например, на тиристоры 6, 9, 11 под действием суммы напряжений на мосты выпрямителя  $2E_d$  протекает ток по контуру: 2 - 4.1 - 9 - 13, 14 - 11 - 5.2 - 3 - 5.1 - 4.2 - 2. В

момент включения тиристора 6 мосты выпрямителя соединяются последовательно, а через нагрузочный контур, образованный компенсирующим конденсатором 13 и индуктором нагревателя 14 протекает импульс тока слева направо. В следующем такте работы инвертора подаются импульсы управления на тиристоры 10, 12. При этом тиристоры 9, 11 выключаются, а дополнительный тиристор 6 остается включенным и ток протекает через нагрузку 13,14 справа налево по контуру: 2 - 4.1 - 10 - 13,14 - 12 - 5.1 - 3 - 5.2 - 6 - 4.2 - 2 под действием суммы напряжений мостов выпрямителя  $2E_d$ .

В последних тактах работы инвертора через нагрузку переменный ток прямоугольной формы под воздействием удвоенного постоянного напряжения последовательно включенных мостов выпрямителя увеличивается. Следовательно, напряжение на нагрузке так же будет удвоенным по отношению к режиму параллельного включения мостов выпрямителя. Режим работы преобразователя частоты с параллельным включением мостов выпрямителя достигается при включении дополнительных тиристоров 7, 8 при пуске инвертора.

В этом режиме преобразователь частоты работает следующим образом. При подаче импульсов управления на тиристоры 7, 8, 9, 11 под действием выходного напряжения выпрямителя, равного  $E_d$  протекает ток через нагрузку 13, 14 слева направо по параллельным контурам:

2 - 4.1 - 9 - 13,14 - 11 - 8 - 4.2 - 2;  
3 - 5.1 - 7 - 9 - 13,14 - 11 - 5.2 - 3.

Во втором такте работы инвертора импульсы управления подаются на тиристоры 10, 12, что обеспечивает выключение тиристоров 9, 11, при этом тиристоры 7, 8 остаются включенными и ток протекает через нагрузку 13, 14 справа налево:

2 - 4.1 - 10 - 13,14 - 12 - 8 - 4.2 - 2;  
3 - 5.1 - 10 - 13,14 - 12 - 7 - 5.2 - 3.

В последующих тактах работы инвертора через нагрузку протекает переменный ток прямоугольной формы под воздействием постоянного напряжения мостов выпрямителя  $E_d$ .

Таким образом, режим работы преобразователя частоты может быть установлен при пуске инвертора включением дополнительных тиристоров 6 или 7, 8 в зависимости от величины эквивалентного сопротивления нагрузки оборудования при изменении параметров нагрузки в широких пределах.

Кроме этого, переключение режимов работы преобразователя частоты может осуществляться не только при пуске инвертора, но и при работающем инверторе, когда коммутация дополнительных тиристоров обеспечивается энергией, накопленной в нагрузочном контуре 13, 14.

На фиг. 2 приведены диаграммы работы преобразователя частоты при периодическом переключении его режимов работы дополнительными тиристорами 6, 7, 8. В этом случае от блока синхронного управления 15 импульсы управления подаются на тиристор 6 ( $i_{y6}$ ), с запаздыванием ( $t_3$ ) относительно импульсов уравнения инвертора ( $i_{y9, 11}$ ,  $i_{y10, 12}$ ), когда к нему прикладывается положительное анодное напряжение нагрузочного контура ( $U_6$ ,  $U_H$ ).

При включении тиристора 6 по нему протекает ток ( $i_6$ ), равный выходному току выпрямителя ( $i_d$ ), а его выходное напряжение равно удвоенному напряжению мостов ( $2e_d$ ). При этом на входе инвертора тока формируется знакопеременное напряжение ( $U_d$ ), среднее значение которого равно среднему напряжению выпрямителя ( $2U_d = 2E_d$ ).

Это же напряжение прикладывается в обратном направлении к тиристорам 7, 8 ( $U_{7,8}$ ).

Режим последовательного соединения мостов выпрямителя длится в течение заданного интервала времени ( $t_{\text{ПСЛ}}$ ), по истечении которого от блока синхронного управления 15 подаются импульсы управления на тиристоры 7, 8 ( $i_{y7,8}$ ) одновременно с импульсами управления инвертора тока в момент, когда к ним прикладывается положительное анодное напряжение. При их включении ток тиристора 6 ( $U_{\text{H}}$ ) снижается до нуля, и он выключается под действием обратного напряжения ( $U_6$ ) в течение интервала времени  $t_6$ , обусловленного напряжением на нагрузочном контуре ( $U_{\text{H}}$ ). При этом ток в тиристорах 7, 8 нарастает до значения выходного тока выпрямителя  $i_d$  и режим работы преобразователя частоты переходит в режим с параллельным включением мостов выпрямителя. В течение времени параллельной работы мостов выпрямителя  $t_{\text{ПРЛ}}$  выходные напряжения и ток инвертора ( $U_{\text{H}}, i_{\text{H}}$ ) уменьшаются вдвое, а также среднее значение тока выпрямителя  $I_d$  снижается до уровня  $0,5I_d$ . В конце интервала  $t_{\text{ПРЛ}}$  от блока синхронного управления 15 импульс управления подается на тиристор 6 с запаздыванием  $t_3$  относительно импульсов управления инвертора, когда к нему прикладывается положительное анодное напряжение. В этот момент выключаются тиристоры 7, 8 и к ним прикладывается обратное напряжение на интервале времени  $t_7, 8$ , а ток  $i_d$  протекает через тиристор 6 и последовательно соединенные мосты выпрямителя.

Таким образом, режимы работы преобразователя частоты могут переключаться с периодом  $T_S$  при обеспечении условий коммутации дополнительных тиристоров 6 и 7, 8, которые достигаются при синхронном управлении по отношению к работе инвертора тока. Регулирование выходных тока и напряжения преобразователя частоты, а также его выходной мощности осуществляется изменением соотношения интервалов времени переключения его режимов работы  $t_{\text{ПСЛ}}/T_S, t_{\text{ПРЛ}}/T_S$ . Однако, при снижении частоты переключений режимов работы преобразователя ( $f_S = 1/T_S$ ) пульсация тока выпрямителя  $i_d$  увеличивается и определяется перепадами его среднего значения при переключении, достигающего двукратной величины. Снижение уровня пульсаций выпрямленного тока при регулировании мощности обеспечивается увеличением частоты переключения режимов работы преобразователя ( $f_S$ ) наибольшее значение которой достигается при переключении в каждом такте работы инвертора.

Диаграммы работы преобразователя при переключении его режимов с удвоенной частотой работы инвертора приведены на фиг. 3.

В первом такте работы импульсы управления подаются на тиристоры инвертора 9, 11 ( $i_{y9,11}$ ) и на дополнительные тиристоры 7, 8. При этом происходит выключение тиристора 6 и включение тиристоров 7, 8, что соответствует переходу режима с параллельным соединением мостов выпрямителя и его ток ( $i_d$ ) спадает под воздействием половинного выходного напряжения ( $E_d$ ). Импульс управления на дополнительный тиристор 6 подается с задержкой  $t_3$  ( $i_{y6}$ ) когда к нему прикладывается положительное анодное напряжение, под действием которого он включается и режим работы преобразователя переходит в режим с последовательным соединением мостов выпрямителя. Под воздействием удвоенного выходного напряжения выпрямителя его ток  $i_d$  увеличивается. Перепад тока  $i_d$  определяет уровень пульсаций выходного тока

выпрямителя при переключении его режимов работы и скачкообразном изменении выходного напряжения выпрямителя от  $E_d$  до  $2E_d$ . При этом средние значения тока и напряжения на входе инвертора  $I_d$ ,  $U_d$  могут плавно регулироваться в зависимости от времени задержки подачи импульсов управления на дополнительный тиристор б ( $t_3$ ) в пределах периода коммутации переключающего устройства ( $t_3/T_S$ ).

Во втором такте работы инвертора импульсы управления подаются на тиристоры 7, 8. При этом происходит выключение тиристора б и включение тиристоров 7, 8, что соответствует переходу режима работы преобразователя в режим с параллельным соединением мостов выпрямителя. При подаче импульса управления на дополнительный тиристор б с задержкой  $t_3$  ( $i_{y6}$ ), когда к нему прикладывается положительное анодное напряжение он включается, и мосты выпрямителя включаются последовательно.

Таким образом, за два такта работы инвертора на его выходе формируется один период тока и напряжения ( $i_n$ ,  $U_n$ ), а на входе формируется два периода пульсаций тока выпрямителя ( $i_d$ ), следовательно, частота пульсаций выпрямленного тока в два раза выше частоты выходного тока инвертора.

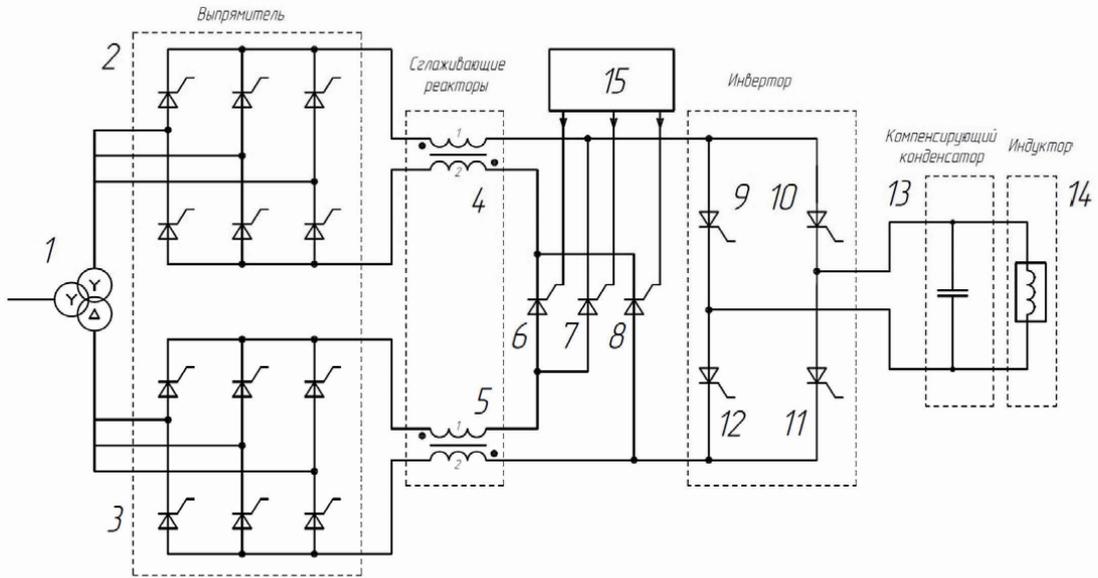
Как правило, частота тока установок индукционного нагрева и плавки металлов значительно выше промышленной частоты питающего напряжения, следовательно, частота пульсаций постоянного тока ( $i_d$ ) при работе переключающего его устройства существенно больше частоты пульсаций выпрямленного тока промышленной частоты, что позволяет значительно снизить амплитуду ( $\Delta i_d$ ) пульсаций постоянного тока по сравнению с фазовым способом управления выпрямителя.

Таким образом, регулирование режимов работы преобразователя частоты посредством устройства коммутации постоянного тока с синхронным управлением позволяет повысить качество потребляемой электроэнергии по сравнению с фазовым способом управления выпрямителем и существенно снизить массогабаритные показатели сглаживающих реакторов при регулировании постоянного тока на высокой частоте устройства коммутации.

#### (57) Формула изобретения

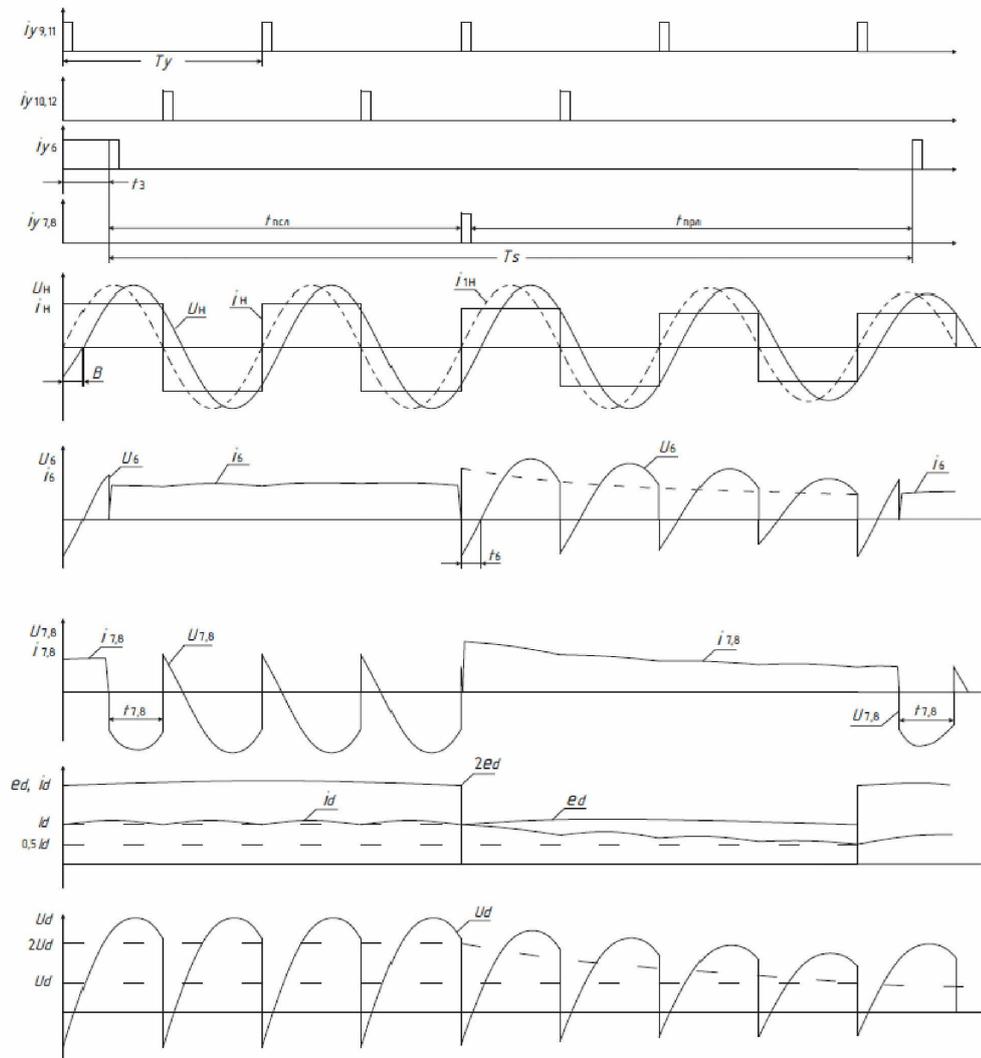
Преобразователь частоты, состоящий из двухмостового 12-пульсного выпрямителя, входные зажимы которого подключены к вторичным обмоткам силового трансформатора, а полюсы постоянного тока через обмотки двухобмоточных сглаживающих реакторов соединены параллельно и подключены к входным зажимам инвертора тока, выходные зажимы которого соединены с нагрузкой, зашунтированной компенсирующим конденсатором, а управляющие электроды его тиристоров подключены к выходам блока автономного управления, отличающийся тем, что дополнительно введены три тиристора, один из которых включен последовательно в цепь постоянного тока между мостами выпрямителя через обмотки сглаживающих реакторов, общие выводы которых с этим тиристором соединены через два других дополнительных тиристора и другие обмотки сглаживающих реакторов с одноименными полюсами постоянного тока мостов выпрямителя.

1

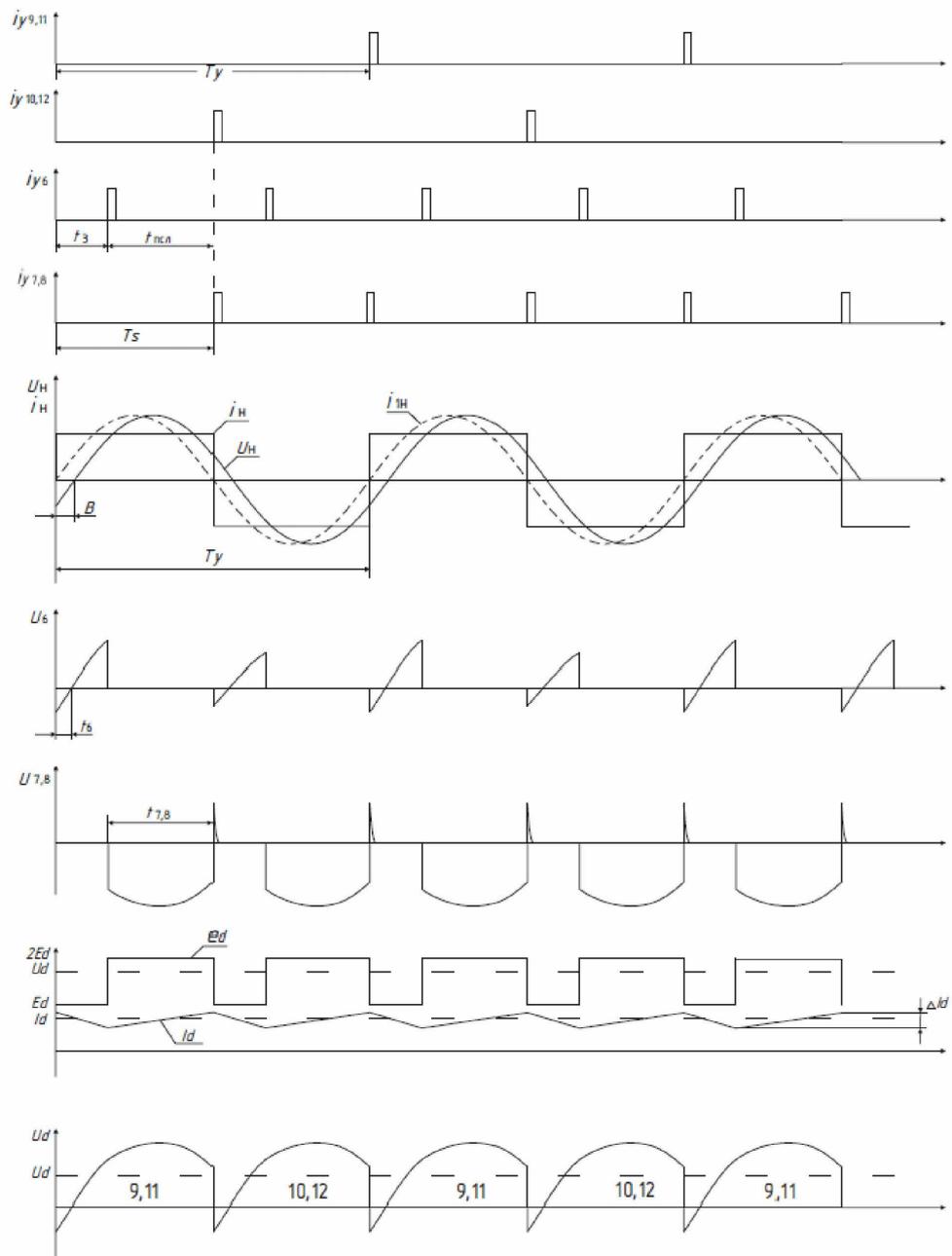


Фиг. 1

2



Фиг. 2



Фиг. 3