

## **Выпрямительно-инверторный преобразователь электровозов переменного тока на новой элементной базе**

А. Ф. Боок, А. А. Курганов, Т. М. Сергунина, А. А. Хапугин,  
Д. Ю. Немаев, Р. Ш. Биктиев, А. В. Гришанин  
ПАО «Электровыпрямитель», г. Саранск

**Аннотация:** Представлен анализ путей повышения надёжности выпрямительно-инверторных преобразователей электровозов. Представлен новый тиристорный преобразователь М-ОПП-950-1,1к-(1-)У2 для поосного регулируемого тягового электропривода магистральных электровозов.

**Ключевые слова:** Тиристор, охладитель, тяговый преобразователь, интенсивность отказов.

Техническое состояние преобразовательной техники электропривода определяется параметрами ее компонентной базы, в первую очередь – силовыми полупроводниковыми приборами (СПП). Тяговый электропривод на базе коллекторных двигателей постоянного тока в нашей стране по-прежнему играет значимую роль в организации грузовых и пассажирских перевозок. Данные преобразователи комплектуются тиристорами и диодами отечественного производства [1]. Исторически специализируясь в области производства силового полупроводникового приборостроения, ПАО «Электровыпрямитель» обладает полностью законченным технологическим циклом изготовления диодов и тиристоров на основе монокристаллического кремния. В настоящее время сохраняется возможность серийного выпуска тиристоров и диодов, надёжно зарекомендовавших себя в электроподвижном составе ОАО «РЖД».

Надёжность узлов электровозов при вождении поездов повышенной массы, на сложных профилях пути во многом зависит от соблюдения установленных режимов эксплуатации и технического обслуживания локомотивов. По состоянию на 01.01.2025 г. количество эксплуатируемых преобразователей ВИП-4000-2М разработки и производства ПАО «Электровыпрямитель» в составе электровозов серии 2(3)ЭС5К, выпускаемых ООО «ПК «НЭВЗ», составляет 4374 единиц, из них 2092 единицы – в гарантийном парке. В 2024 г. статистика отказов преобразователей составила 0,144 случаев на 1 млн. км пробега, что на 44,19% меньше, чем в 2023 г. Значительный вклад в поддержание нормального технического состояния преобразователей и локомотивов, эксплуатируемых на Восточном полигоне вносит АО «ДЦВ Красноярской железной дороги», коллектив которого осуществляет свою многолетнюю и успешную работу [2]. Напомним, что, согласно техническим условиям, данный параметр установлен на уровне 0,303 случаев на 1 млн. км. Каждый преобразователь ВИП-4000-2М комплектуется тиристорами Т853-800 в количестве 64 шт. Таким образом, на текущий момент в

подконтрольной эксплуатации в составе электровозов серии 2(3)ЭС5К находятся порядка 280 000 шт. тиристоров.

Из 34 случаев неисправностей, отнесенных за преобразователем ВИП-4000-2М, 16 случаев связаны с отказом тиристоров Т853-800. Вероятные причины их отказов определялись исходя из анализа характера повреждений полупроводниковых элементов тиристоров на основании результатов первичного расследования, с учетом расшифровки файлов микропроцессорной системы управления и диагностики (МСУД). Анализ записей файлов регистратора МСУД не может дать полную картину причин возникновения неисправности преобразователя ВИП-4000-2М, так как дискретность записи данных в регистраторе МСУД составляет 100 мс, при срабатывании защит – 10 мс. Переходные процессы при работе тиристоров протекают с временами, находящимися в субмиллисекундной длительности импульсов напряжения и токов.

Аварийный характер выхода из строя тиристоров ВИП-4000-2М по причине внешних факторов также описан в ряде работ [3, 4]. Основная часть повреждений и сбоев работы силовой части электровозов происходят из-за отказа электронных элементов и сбоев в работе цепей системы управления. Половина таких отказов приходится на пропуск импульсов управления на управляющие электроды тиристоров плеч преобразователя. В случае отказа любого выходного канала аппаратуры формирования импульсов управления, «ложного» включения возникает отказ отдельных выходных каскадов на всех преобразователях электровоза.

Задача повышения надежности преобразователей электроэнергии связана, в том числе, с сокращением количества применяемых СПП. Иными словами, чем меньше номенклатура и меньшее количество элементов насчитывается в составе электронного устройства, тем надежнее его работа. В процессе эволюции СПП происходит непрерывное увеличение допустимой плотности тока, сопровождающееся снижением уровня статических и динамических потерь. Опираясь на результаты анализа эксплуатации тиристоров Т853-800 и ВИП-4000-2М, новые требования и решения по повышению энергоэффективности преобразователей [5], был разработан новый преобразователь М-ОПП-950-1,1к-(1-)У2. Преобразователь М-ОПП-950-1,1к-(1-)У2 относится к новому поколению тягового преобразователя для электровозов переменного тока серии 2(3,4)ЭС5К с поосным регулированием силы тяги, который может заменить серийно выпускаемый преобразователь ВИП-4000-2М-УХЛ2. Преобразователь имеет два исполнения: М-ОПП-950-1,1к-У2 укомплектован блоком реактивных токов (БРТ) и М-ОПП-950-1,1к-1-У2 – без блока БРТ. Применение плеча БРТ, основу которого составляет схемное решение по управлению реактивной энергией, позволяет повысить коэффициент мощности электровоза на 4% до величины 0,88. Повышение коэффициента мощности на 4 % дает снижение удельного расхода электроэнергии электровоза в режиме тяги поездов примерно на 4-5 % по сравнению с существующими электровозами серии «Ермак».

Преобразователь по габаритным, установочным и присоединительным размерам, а также по схемам подключения взаимозаменяем с ВИП-4000-2М-УХЛ2 и ВИУ-4000-2М-УХЛ2.

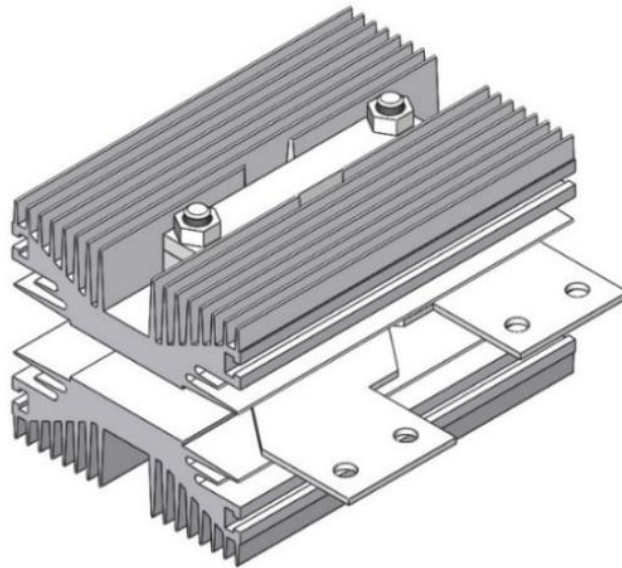
В основу преобразователя заложен производимый ПАО «Электровыпрямитель» тиристор Т373-1600 собственной разработки. Его основные параметры приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные параметры тиристора Т373-1600

Наименование параметра	Значение
Повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии / повторяющееся импульсное обратное напряжение, В	4000
Максимально допустимый средний ток в открытом состоянии, А, $f = 50$ Гц, $T_C = 70^\circ\text{C}$	1915 ( $85^\circ\text{C}$ ) 2348 ( $70^\circ\text{C}$ )
Ударный ток в открытом состоянии, кА, $t_p = 10$ мс, $T_j = 125^\circ\text{C}$	34
Импульсное напряжение в открытом состоянии, В ( $I_T = 5030$ А, $T_j = 25^\circ\text{C}$ )	2,10
Пороговое напряжение, В	1,10
Динамическое сопротивление, МОм	0,27
Время выключения, мкс $d_{iT}/dt = -10$ А/мкс, $d_{vD}/dt = 50$ В/ мкс	400
Ток обратного восстановления, А	100
Тепловое сопротивление переход – корпус, $^\circ\text{C}/\text{Вт}$	0,0079
Усилие сжатия, кН	40 – 70
Габаритно-присоединительные размеры, диаметр $\times$ диаметр контакта $\times$ высота, мм	112 $\times$ 75 $\times$ 26,8
Масса, кг	1,20

Количество тиристорov для комплектации одного преобразователя М-ОПП-950-1,1к-(1-)У2 составляет 32 шт.

Основное влияние на ресурс преобразовательных устройств оказывают тепловые характеристики. В преобразователе применены новые воздушные охладители О573 (рисунок 1) собственной разработки [6] с высокой удельной теплопроводностью, которые имеют более развитую теплоотдающую поверхность. Вместе с выбором нового СПП с помощью специализированного программного обеспечения произведен тепловой расчет системы охлаждения М-ОПП-950-1,1к-(1-)У2, в результате чего получены данные по температуре и скорости воздуха в межрёберном пространстве (рисунок 2).



*Рисунок 1 – Охладитель O573*

Проведены испытания (моделирование) при естественном и принудительном охлаждении для определения переходного теплового импеданса (состояния) данного охладителя (рисунок 3).

Преобразователь М-ОПП-950-1,1к-(1-)У2 состоит из 32-х тиристоров в сборе с охладителем O573, находящихся в 16-ти секциях, изолированных друг от друга. Каждая секция выполнена из 2-х последовательно установленных тиристорных блоков тиристора. Для объективного определения тепловой картины проведено моделирование одной секции (рисунок 4).

В отличие от диагностики исправности тиристорных плеча в преобразователе ВИП-4000-2М-УХЛ2 в преобразователе М-ОПП-950-1,1к-У2 применена цифровая диагностика исправности каждого тиристора и системы формирования импульсов, позволяющая своевременно диагностировать техническое состояние преобразователя.

Преобразователь М-ОПП-950-1,1к-У2 обладает лучшим показателем надежности, расчетное значение параметра интенсивности отказов преобразователя не более 0,115 случая на 1 млн. км пробега.

Повышенная надежность преобразователя ведет к снижению затрат на приобретение комплектующих изделий сервисными локомотивными депо при ремонтно-восстановительных работах преобразователя, экономии затрат по контракту жизненного цикла локомотива, а также снижению трудоемкости при обслуживании преобразователя.

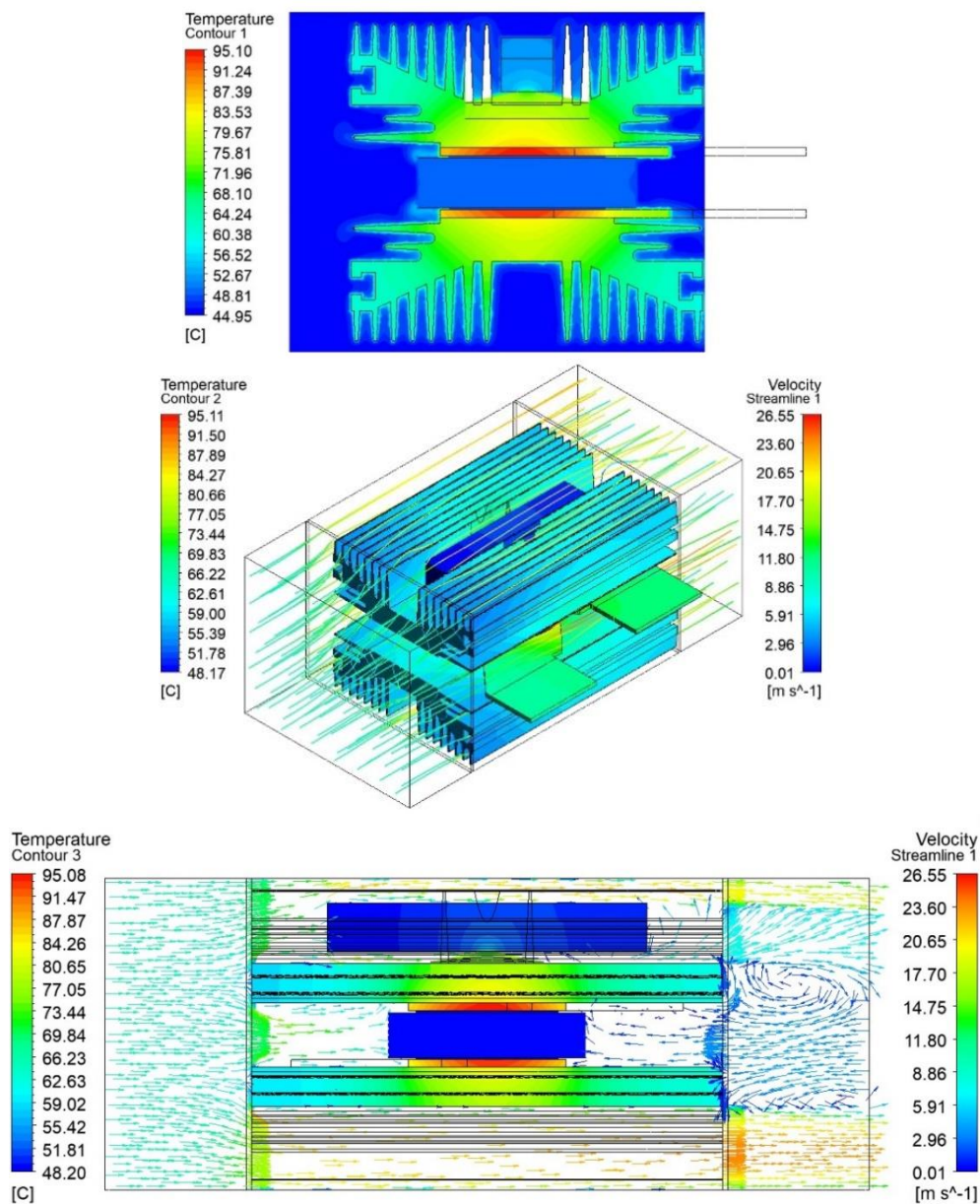


Рисунок 2 – Распределение температуры и скорости воздуха в охладителе O573

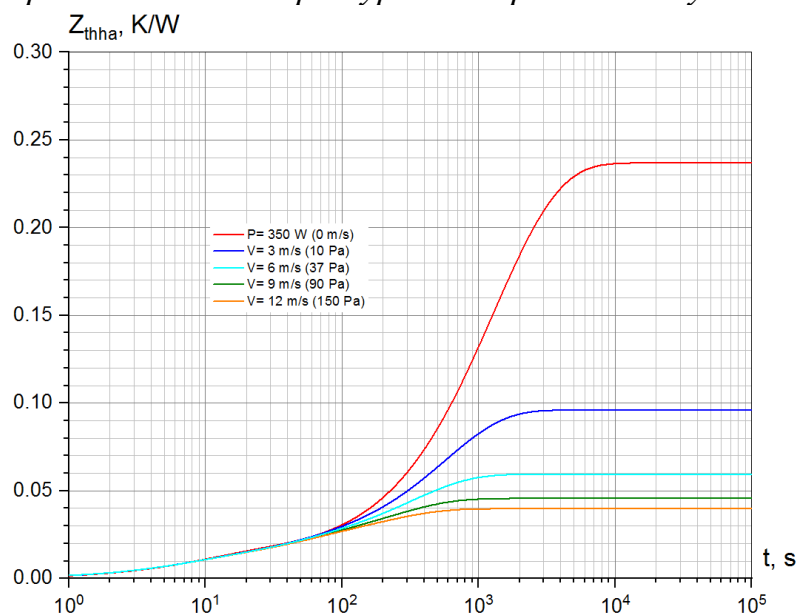
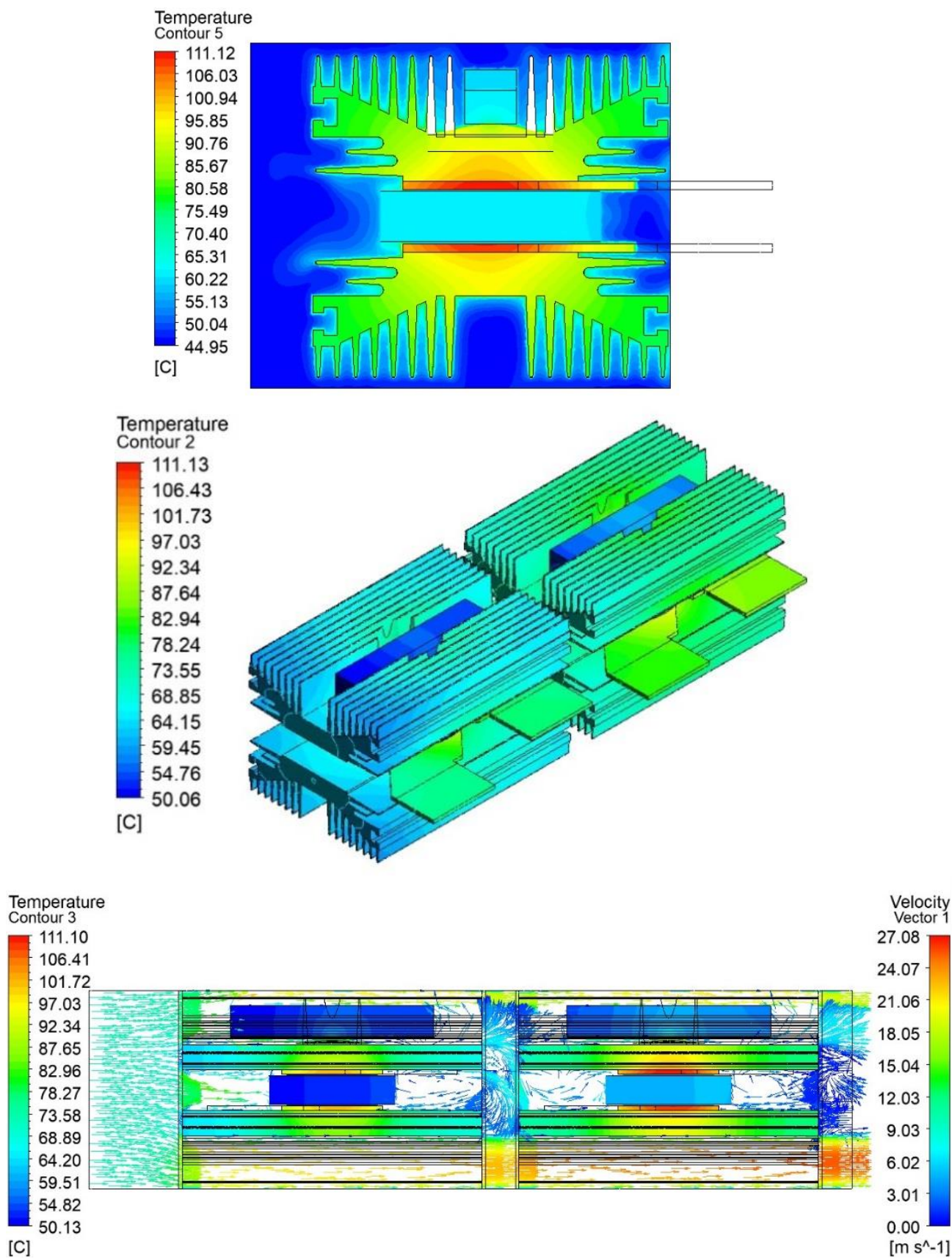


Рисунок 3 – Тепловой импеданс охладителя O573 с тиристором T373-1600



*Рисунок 4 – Распределение температуры и скорости воздуха в охладителе O573 для секции блока тиристора*

В преобразователе М-ОПП-950-1,1к-У2 имеется возможность размещения дополнительного оборудования, например – размещение выпрямительной установки возбуждения (ВУВ).

Применение выпрямительно-инверторного преобразователя в новом исполнении вместе с усовершенствованным алгоритмом управления [7], позволят повысить работоспособность электровоза в режиме рекуперативного торможения, что в значительной степени повышает безопасность движения поездов, сохраняет энергоэффективность электровозов переменного тока, повышает пропускную способность тяговых плеч при эксплуатации тягового электроподвижного состава.

#### **Список использованных источников:**

1 Локомотивам – современные полупроводниковые приборы / Г.Ю. Каменцев // Локомотив. 2012. №7. С. 6-8.

2 Семченко В.В., Лакин И.К. Особенности управления надёжностью оборудования локомотивов на примере выпрямительно-инверторных преобразователей // Материалы научно-практической конференции «Современное состояние и перспективы развития силовой электроники и преобразовательной техники на ее основе», г. Саранск – 2021 г., с. 65-68.

3 Устинов Р.И. Повышение работоспособности выпрямительно-инверторных преобразователей электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения // Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук, Хабаровск – 2020 г. 180 с.

4 Власьевский С.В., Скорик В.Г., Супрун Д.А. Математическая модель для исследования электромагнитных процессов при аварийных режимах силового преобразователя электровоза переменного тока // Материалы научно-практической конференции «Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования ТПС», г. Красноярск – 2021 г. с. 184-189.

5 Устройство для повышения коэффициента мощности выпрямительно-инверторного преобразователя однофазного переменного тока. Патент на полезную модель RU 192 613 U1.

6 Охладитель для силовых полупроводниковых приборов. Патент на промышленный образец № 139475.

7 Способ управления многозонным выпрямительно-инверторным преобразователем однофазного переменного тока. Патент на изобретение RU 2 716 493 C1.