

## Active Power Distribution System between Phases of the Transformer's Converter

**Morozov P.V., Morozov Yu.V.**  
Novosibirsk State Technical University,  
Novosibirsk, Russian Federation

**Abstract.** The paper proposes the system that distributes automatically active power between phases at the secondary side of a traction transformer-based converter. The application area for this system is ac railways with big volumes of delivered items. The purpose of the paper is to develop and investigate the equivalent circuit of the proposed system as an electrical complex for automatic power distribution between phases of the transformer-based converter with phases of the railway traction power system at the secondary side. The equivalent circuit of the mentioned above electrical complex is stated. The expressions describing the process of automatic distribution of active power are based on the instantaneous power theory. It is shown how the unbalance factor and total harmonic distortion depend on the number of switching element cells at each phase and pulse-width modulation switching frequency. As it follows from the simulation, the proposed electrical complex should consist of eight cells of switching elements connected to each phase to provide values of the unbalance factor and total harmonic distortion no more than two percent. The pulse-width modulation phase has to be a multiple of 45 degrees. The most important result is the proposed equivalent circuit of the system for active power distribution between the transformer-based converter phases at its secondary side, distinguished by the capability of getting the optimal number of switching element cells by simulation based on the instantaneous power theory. The results relevance include improvement of the electric power quality indicators such as unbalance and total harmonic distortion and decrease of wear factor values for transformers and transmission lines.

**Keywords:** transformer-based converter, big volumes of goods delivery, ac railways, unbalance, total harmonic distortion, pulse-width modulation, active power, switching element.

**DOI:** <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2025.2-66.14>

**UDC:** 621.314.2

### Sistem activ de distribuție a puterii între fazele transformatorului

**Morozov P.V., Morozov Yu.V.**

Universitatea Tehnică de Stat Novosibirsk, Novosibirsk, Federația Rusă

**Rezumat.** Lucrarea propune sistemul care distribuie automat puterea activă între faze pe partea secundară a unui convertor bazat pe transformator de tracțiune. Domeniul de aplicare pentru acest sistem este căile ferate de curent alternativ cu volume mari de mărfuri livrate. Scopul lucrării este elaborarea și investigarea circuitului echivalent al sistemului propus în calitate de complexului electroenergetic pentru distribuția automată a puterii între fazele convertorului pe bază de transformator cu fazele sistemului de tracțiune feroviar pe partea secundară. Se precizează circuitul echivalent al complexului electric menționat mai sus. Expresiile care descriu procesul de distribuție automată a puterii active se bazează pe teoria puterii instantanee. Se arată cum factorul de dezechilibru și distorsiunea armonică totală depind de numărul de celule ale elementelor de comutare la fiecare fază și frecvența de comutare a modulației pe lățimea a impulsului. După cum rezultă din simulare, complexul electric propus ar trebui să fie format din opt celule de elemente de comutare conectate la fiecare fază pentru a furniza valori ale factorului de dezechilibru și distorsiunii armonice totale nu mai mult de două procente. Faza de modulare a lățimii impulsului trebuie să fie multiplu de 45 de grade. Cel mai important rezultat este circuitul echivalent propus al sistemului de distribuție a puterii active între fazele convertorului bazat pe transformator la partea sa secundară, care se distinge prin capacitatea de a obține numărul optim de celule de elemente de comutare prin simulare bazată pe teoria puterii instantanee. Relevanța rezultatelor include îmbunătățirea indicatorilor de calitate a energiei electrice, cum ar fi dezechilibrul și distorsiunea armonică totală și scăderea valorilor factorului de uzură pentru transformatoare și linii de transport.

**Cuvinte-cheie:** convertor pe bază de transformator, volume mari de produse livrate, căi ferate de curent alternativ, dezechilibru, distorsiune armonică totală, modulare pe lățimea impulsului, putere activă, element de comutare.

© Морозов Ю.В., Морозов П.В., 2025

### Система распределения активной мощности между фазами трансформаторного преобразователя Морозов П. В., Морозов Ю.В.

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Российская Федерация  
**Аннотация.** В настоящей работе для применения на железных дорогах переменного тока с постоянно растущими объемами грузоперевозок предложена система для автоматического распределения активной мощности между фазами тягового трансформаторного преобразователя на его вторичной стороне. Целью настоящей работы является разработка и исследование эквивалентной схемы замещения предложенной системы как электроэнергетического комплекса, предназначенного для автоматического распределения активной мощности между фазами трансформаторного преобразователя, к вторичным обмоткам которого подключены фазы системы электроснабжения железной дороги. Приведена эквивалентная схема замещения данного электроэнергетического комплекса. Даны основные расчетные соотношения, описывающие автоматическое распределение активной мощности, на основе теории мгновенных мощностей. Показано, как количество ячеек из коммутационных элементов на каждой фазе и частота переключения элементов влияют на коэффициент несимметрии и коэффициент несинусоидальности при использовании широтно-импульсной модуляции. Моделирование показало, что данный комплекс должен состоять из восьми ячеек из коммутационных элементов, присоединенных к каждой фазе, чтобы обеспечить значения коэффициентов несимметрии и несинусоидальности токов и напряжений, не превышающих два процента. Фаза широтно-импульсной модуляции должна быть кратна сорока пяти градусам. Наиболее важным результатом является предложенная эквивалентная схема системы автоматического распределения мощности между фазами трансформаторного преобразователя на вторичной стороне, отличающаяся тем, что позволяет путем математического моделирования на основе теории мгновенных мощностей получить оптимальное количество ячеек из коммутационных элементов. Значимость результатов заключается в повышении качества электроэнергии в части несимметрии и несинусоидальности токов и напряжений и уменьшении степени износа трансформаторов и линий электропередачи.

**Ключевые слова:** трансформаторный преобразователь, транспортировка больших объемов грузов, железные дороги переменного тока, несимметрия, несинусоидальность, широтно-импульсная модуляция, активная мощность, коммутационный элемент.

#### ВВЕДЕНИЕ

Производственные процессы на основе кооперации предприятий, находящихся на значительных расстояниях друг от друга в пределах одного или нескольких регионов, требуют организации перевозок значительных объемов грузов, включая сырье, комплектующие, полуфабрикаты, а также готовую продукцию. Для перевозки упомянутых грузов на дальние расстояния, как правило, используют железнодорожный транспорт. Объемы перевозок с течением времени постоянно растут [1]. Организации, занимающиеся добычей сырья и производством больших объемов продукции, уделяют большое внимание все более активному внедрению электрической тяги. Ожидаемый прирост объемов перевозок железнодорожным транспортом составляет сотни тысяч тонн в год. Железнодорожные составы, перевозящие упомянутые выше разновидности грузов, должны обладать повышенной грузоподъемностью.

На большинстве участков железных дорог России, не рассчитанных на высокую грузоподъемность, применяется постоянное напряжение питания 1500 В или 3000 В.

Чтобы обеспечить большую грузоподъемность товарных составов, необходимо использовать переменное напряжение не менее 25 кВ. Применение таких напряжений на железных дорогах России и зарубежных стран обусловлено необходимостью увеличивать грузоподъемность железнодорожных составов, а также повышать скорость их перемещения [2]. Кроме того, использование систем электроснабжения 25 кВ и 2 x 25 кВ позволяют увеличить расстояние между тяговыми подстанциями и за счет этого уменьшить площадь земельных участков, выделяемых под тяговые подстанции. В то же время, такие системы тягового электроснабжения оказывают негативное влияние на первичную сеть электроснабжения, поскольку из-за них возникает несимметрия по току и напряжению, а также порождаются высшие гармоники [3].

Одним из способов уменьшения уровня высших гармоник и несимметрии по току является усовершенствование структуры трансформаторных преобразователей, а также применение во вторичной цепи электронных

фильтрокомпенсирующих устройств. Например, в [4] предложено использовать на тяговой подстанции модифицированный трансформаторный преобразователь Вудбриджа, обеспечивающий при равномерной нагрузке вторичной цепи несимметрию по напряжению не более 1,5%.

Вопросы накопления энергии в суперконденсаторах фильтрокомпенсирующих устройствах рассмотрены в [5]. Проанализирован баланс мощностей в процессе работы фильтрокомпенсирующего устройства совместно с трансформаторным преобразователем в сети тягового электроснабжения. Показано, что трансформаторный преобразователь должен быть дополнен системой электронного распределения активной мощности. При этом следует учесть, что поскольку в тяговой сети используются высокие напряжения, электронная система распределения активной мощности должна состоять из многих ячеек.

Варианты подавления высших гармоник исследованы в [6]. В первую очередь в этой работе рассмотрен вопрос подавления высших гармоник в линиях электропередачи.

В [7] предложено использовать трансформаторный преобразователь на основе двух трехфазных трансформаторов с последовательным соединением фаз вторичных обмоток. Такое соединение повышает надежность трансформаторного преобразователя. В то же время, он имеет более простую структуру, чем трансформатор Скотта или Вудбриджа.

Трансформаторные преобразователи, упомянутые выше, обладают общим недостатком – они способны обеспечивать малый уровень несимметрии по току и напряжению только при одинаковых нагрузках во вторичной цепи трансформаторного преобразователя.

Для снижения несимметрии, а также несинусоидальности токов и напряжений в первичной сети электроснабжения применяют пассивные и активные фильтрокомпенсирующие устройства. Исследование пассивных фильтров в [8] показало, что данные устройства недостаточно снижают несинусоидальность токов и напряжений. Пассивные фильтрокомпенсирующие устройства применяют для предварительного подавления высших гармоник перед использованием

активного фильтрокомпенсирующего устройства [9]. Современные активные фильтрокомпенсирующие устройства включают в себя емкостные накопители энергии, управляемые мосты на основе GTO тиристоров или IGBT транзисторов, а также сглаживающие активно-индуктивные фильтры. Стандартные активные фильтры, как правило, предназначены для использования в трехфазных сетях [10]. Моделирование системы тягового электроснабжения осуществлено в [11], [12], [13], [14]. Однако, в этих работах в качестве основных результатов указаны небольшое увеличение КПД, а улучшение показателей качества электроэнергии подробно не рассматривается. В [15] активный фильтр для тяговой сети электроснабжения, который позволяет снизить коэффициент гармоник по току до 4%. Коэффициент гармоник по напряжению, а также коэффициенты несимметрии по току и напряжению в данной работе не рассматриваются.

Ниже сделан обзор работ, посвященных анализу и синтезу различных элементов системы автоматического распределения мощности, включая преобразователи переменного напряжения в постоянное и наоборот, конденсаторы большой емкости, цифровые аппаратные и программные средства автоматического регулирования.

Эффективность генерирования электроэнергии для распределенного электропитания систем тягового электроснабжения, особенно при использовании солнечных батарей, ветроэнергетических станций и прочих источников возобновляемой энергии проанализирована в [16]. Учтена нестабильность уровня генерируемого напряжения такими источниками, а также вероятностное распределение тяговых нагрузок вдоль железнодорожной линии.

Рассмотрен пример использования возобновляемых источников электроэнергии для высокоскоростного участка железной дороги Сычуань-Тайбэй, проходящего через высокогорные массивы и труднопроходимые регионы с очень малой плотностью населения. Отмечается неопределенность нагрузки трансформаторных преобразователей в течение времени. В данной работе в основном проводится статистический анализ изменения тяговых нагрузок и их влияние на показатели качества

электроэнергии. В тоже время, процессы управления преобразованием энергии между фазами трансформаторного преобразователя детально не рассматриваются.

В [17] предложено использовать ветроэнергетические установки для подзарядки суперконденсаторов, включенных между обмотками трансформаторного преобразователя в системе автоматического распределения мощности.

Обзор известных структур ячеек из управляемых полупроводниковых ключей сделан в [18]. Отмечается, что такие структуры могут иметь разное количество уровней. Проанализированы достоинства и недостатки различных вариантов таких структур [19].

Вопросы электромагнитной совместимости электронных преобразователей энергии рассмотрены в [20]. В данной работе упоминается, что повышение частоты переключения полупроводниковых элементов, уменьшение их массы и габаритных размеров привело к появлению полупроводниковых элементов третьего поколения. Кондуктивные электромагнитные помехи, распространяющиеся от тяговых двигателей через полупроводниковые преобразователи к трансформаторам или накопителям энергии, проанализированы во временной и частотной области.

Статья [21] посвящена исследованию работы тяговой сети и связанной с ней железнодорожной автоматики в установившемся и переходном режимах без учета первичной сети электроснабжения. Результаты этих исследований служат основой для разработки систем защиты элементов тяговой сети от коротких замыканий.

Моделирование асинхронных двигателей как источников электромагнитных помех в режиме короткого замыкания проведено в [22]. Приведена классификация методов подавления кондуктивных помех. Подавляется либо источник электромагнитных помех, либо совершенствуется структура полупроводникового преобразователя энергии.

Ранее было показано, что эффективным инструментом для автоматического распределения активной мощности между обмотками является цифровая фильтрация.

Повышение эффективности вычислений в процессе формирования управляющего воздействия при распределении активной мощности достигается за счет использования табличных методов, которые не приводят к значительному увеличению занимаемого объема памяти вычислителя.

Результаты, полученные в проанализированных выше работах, в основном ориентированы на высокоскоростные железные дороги, предназначенные в первую очередь для пассажирских перевозок.

Целью настоящей работы является разработка и исследование эквивалентной схемы замещения электротехнического комплекса, предназначенного для автоматического распределения активной мощности между фазами трансформаторного преобразователя.

Ко вторичным обмоткам трансформаторного преобразователя подключены фазы системы электроснабжения железной дороги, по которой перемещаются поезда повышенной грузоподъемности, предназначенные для перевозки твердых полезных ископаемых.

С учетом подвижности тяговых нагрузок и работы их в разных режимах, токи в фазах могут быстро и заметно изменяться во времени, и это становится причиной несимметрии и несинусоидальности токов и напряжения в первичной сети электроснабжения.

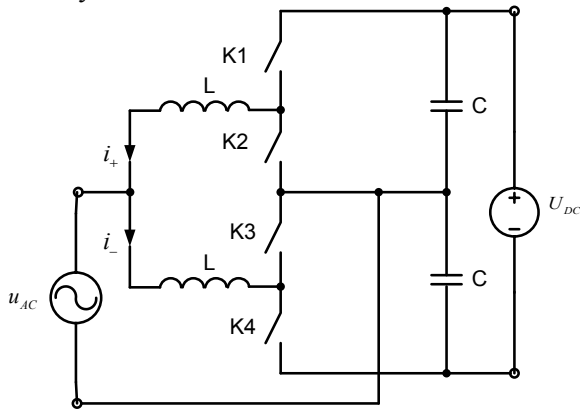
## 1. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Система для автоматического распределения активной мощности между фазами трансформаторного преобразователя состоит из дискретных ячеек, преобразующих постоянное напряжение в переменное и наоборот.

Такая ячейка состоит из емкостей на стороне постоянного тока, индуктивностей на стороне переменного тока двух полумостов: состоящих из ключей, управляемых с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) (рис 1.). Верхний полумост состоит из ключей K1 и K2, а нижний полумост состоит из ключей K3 и K4.

Верхняя емкость подключается к источнику переменного напряжения при замкнутых ключах K1 и K3 и разомкнутых ключах K2 и K4, а нижняя емкость, наоборот,

при разомкнутых ключах K1 и K3 и замкнутых ключах K2 и K4.



**Рис.1. Ячейка электротехнического комплекса для автоматического распределения мощности.**

**Fig. 1 A Cell of an electrical complex for automatic power distribution.**

Эквивалентная схема замещения ячейки электротехнического комплекса для автоматического распределения мощности приведена на рис. 2. Емкостной накопитель энергии представлен в виде источника постоянного напряжения. Источник переменного напряжения в верхней ветви с реактором соответствует замкнутому состоянию ключей K1 и K3, а источник переменного напряжения в нижней ветви с реактором соответствует замкнутому состоянию ключей K2 и K4.

На стороне переменного тока формируется компенсирующий ток для уравнивания мощностей во вторичной цепи трансформаторного преобразователя.

Напряжения в схеме на рис. 2 с помощью матричного уравнения

$$\begin{bmatrix} u_+ \\ u_- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{DC} / 2 \\ u_{AC} \end{bmatrix} - L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_+ \\ i_- \end{bmatrix} \quad (1)$$

где  $u_+$ ,  $u_-$  – напряжения эквивалентных источников напряжения, заменяющих полумосты,  $U_{DC}$  – общее напряжение на емкостных накопителях,  $u_{AC}$  – напряжение на полумосте со стороны переменного тока,  $L$  – индуктивность реактора,  $t$  – время,  $i_+$ ,  $i_-$  – токи в полумостах.

Каждое из алгебраических уравнений, входящих в состав матричного уравнения (1), соответствуют одной из двух возможных комбинаций состояний ключей.

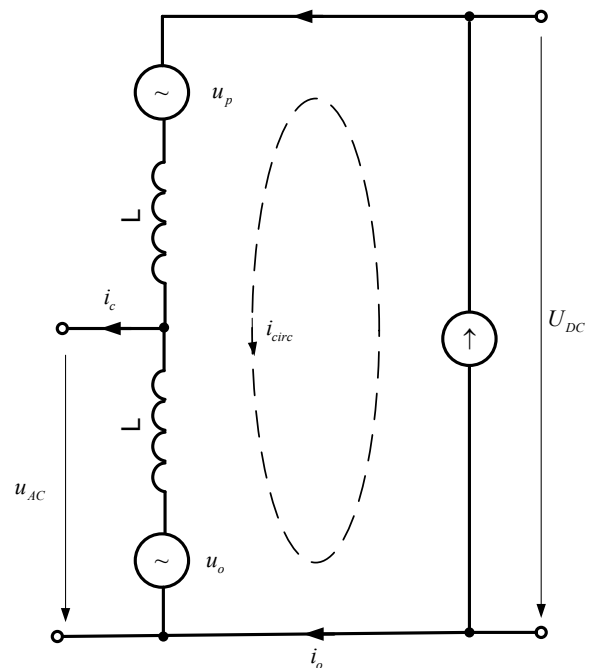
В выражении (1) отсутствует компенсирующий ток. Чтобы ввести его,

уравнение (1) преобразовано к следующей системе уравнений:

$$\begin{bmatrix} U_{DC} \\ u_{AC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_+ \\ u_- \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2i_{circ} \\ -(1/2)i_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} i_u \\ i_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_+ \\ i_- \end{bmatrix} \quad (3)$$

где  $i_{circ}$  – контурный ток, циркулирующий между сторонами постоянного и переменного тока, за счет которого происходит обмен энергией между ними,  $i_c$  – компенсирующий ток



**Рис.2. Эквивалентная схема замещения ячейки из коммутационных элементов.**

**Fig. 2. The equivalent circuit of the cell of switching elements.**

Компенсирующее напряжение, обеспечивающее обмен энергией, вычисляется по формуле:

$$u_c = \frac{1}{2} \left[ (u_+ - u_-) + \frac{1}{2} L \frac{d}{dt} i_c \right] \quad (4)$$

Описывать упомянутый обмен энергии между фазами трансформаторного преобразователя предлагается на основе теории мгновенных мощностей, так как использование средних мощностей требует наличия внешнего источника энергии. Приведенная на рис. 1 ячейка для автоматического распределения мощностей

сочетает в себе достоинства индуктивного полного четырехплечего моста и емкостного полумоста.

Мгновенная компенсирующая мощность вычисляется на основе мгновенного компенсирующего напряжения и мгновенного компенсирующего тока

$$p_c = u_c i_c = \sqrt{2} U_c \cos(\omega t + \varphi_c) \cdot \sqrt{2} I_c \cos(\omega t + \theta_c), \quad (5)$$

где  $U_c$ ,  $I_c$  – соответственно среднеквадратические значения компенсирующего напряжения и тока,  $\varphi_c, \theta_c$  – соответственно фазовые сдвиги компенсирующего напряжения и тока.

Описывать упомянутый обмен энергии между фазами трансформаторного преобразователя предлагается на основе теории мгновенных мощностей, так как использование средних мощностей требует наличия внешнего источника энергии. Приведенная на рис. 1 ячейка для автоматического распределения мощностей сочетает в себе достоинства индуктивного полного четырехплечего моста и емкостного полумоста.

После преобразований выражение (5) принимает вид суммы средней мощности и второй гармонической составляющей

$$p_c = U_c I_c [\cos(\varphi_c - \theta_c) + \cos(2\omega t + \varphi_c + \theta_c)] \quad (6)$$

Постоянная составляющая активной мощности, которой соответствует первое слагаемое в выражении (6), соответствует той части активной мощности, которая передается от одной ячейки к другой. Второе слагаемое в выражении (6) описывает циркуляцию тока между сторонами постоянного и переменного тока внутри ячейки.

Таким образом, обмен мгновенными мощностями между сторонами постоянного и переменного тока может быть описан с помощью уравнения баланса мгновенных мощностей:

$$P_c = P_{DC} \quad (8)$$

Ток  $i_{circ}$  состоит из двух составляющих

$$i_{circ} = I_{DC} + i_{circ-} \quad (9)$$

где  $i_{circ-}$  – переменная составляющая циркулирующего тока,  $I_{DC}$  – постоянная составляющая циркулирующего тока, которая связана с постоянной составляющей компенсирующего

тока через индекс широтно-импульсной модуляции (ШИМ), используемой для формирования управляющего воздействия на компенсирующий ток и компенсирующее напряжение:

$$m_{pwm} = \frac{2U_c}{U_{DC}} \quad (10)$$

С учетом выражений (6)-(10) постоянная составляющая циркулирующего тока связана с постоянной составляющей компенсирующего тока с помощью формулы

$$I_{DC} = m_{pwm} I_c \cos(\varphi_c - \theta_c) \quad (11)$$

Разность фаз в формуле (11) соответствует фазовому сдвигу между компенсирующим током и управляющим током, вырабатываемым с помощью схемы управления с широтно-импульсной модуляцией.

## 2. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ

Для автоматического распределения мощности между фазами тягового трансформаторного преобразователя на железной дороге переменного тока к стороне постоянного тока параллельно следует подключить несколько ячеек, приведенных на рис. 1. Структура предложенной системы автоматического распределения мощности приведена на рис. 3, структура алгоритма ее функционирования – на рис. 4.

Параллельно вторичным обмоткам (Secondary Windings) SW1 и SW2 тягового трансформаторного преобразователя подключены тяговые нагрузки (Traction Loads) соответственно TL1 и TL2 (рис. 3). К каждой из вторичных обмоток подключены наборы управляемых ячеек, соответственно, C11, C12, ..., C18 и C21, C22, ..., C28. Управление ячейками осуществляется с помощью ШИМ-контроллера (PWMС). ШИМ-контроллер одновременно поддерживает постоянное напряжение на емкостных накопителях и баланс мощностей между вторичными обмотками трансформаторного преобразователя. Если на одной из обмоток избыток мощности, то подключенные к ней ячейки работают в режиме выпрямления. Ячейки, подключенные ко второй обмотке, в которой имеет место недостаток мощности, работают в режиме инвертирования. Структурная схема, на кото-

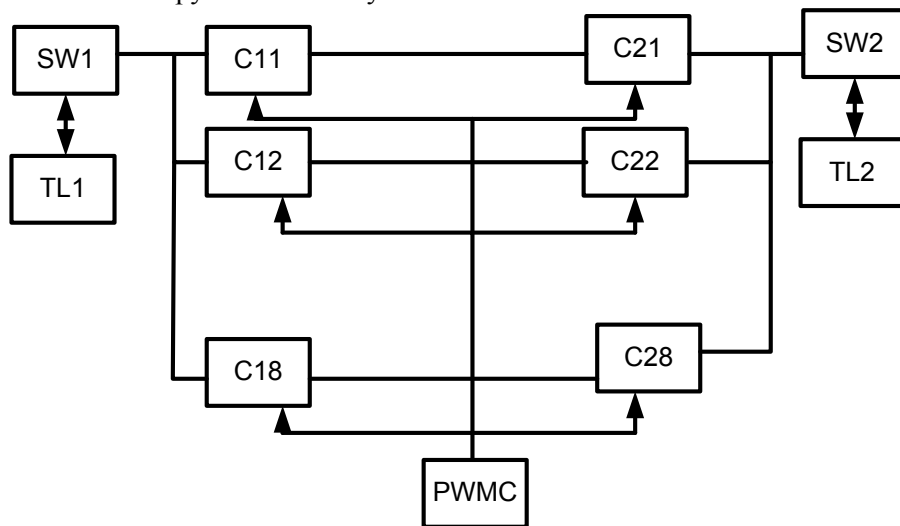
рой показан алгоритм регулирования, приведена на рис. 4.

ШИМ-контроллер использует для формирования управляющих воздействий на коммутационные элементы измеренные значения напряжений  $u_1$  и  $u_2$  на вторичных обмотках трансформаторных преобразователей, токи в тяговых нагрузках  $i_{L1}$  и  $i_{L2}$ , напряжение на емкостных накопителях  $u_{DC}$  и компенсирующее напряжение  $i_c$ . На основе напряжений на вторичных обмоток и токов в тяговых нагрузках вычисляются мгновенные мощности  $p_{L1}$  и  $p_{L2}$ . На емкостных накопителях поддерживается постоянное напряжение  $U_{DC}$  с помощью пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора PI1. Разность мгновенных мощностей на тяговых нагрузках использует-

ся для формирования опорного компенсирующего тока  $i_{cr}$  с учетом масштабного коэффициента  $k_c$ . Значение корректирующего тока, близкое к значению опорного, поддерживается с помощью регулятора PI2 и устройства PWM для выдачи управляющих воздействия на ячейки C11-C18. Аналогично формируются управляющие воздействия на ячейки C21-C28.

Было выполнено моделирование рассматриваемой системы автоматического распределения мощности между тяговыми нагрузками в среде типа Matlab.

Съем и обработка измеряемых токов и напряжений, вычисление управляющих воздействий с помощью ШИМК осуществлялись путем математического моделирования.



ШИМ- контроллер – PWMC, C- cell. TL – traction load, SW- secondary winding.

Рис. 3. Структура системы автоматического распределения мощности между тяговыми нагрузками на основе ШИМ с фазовым управлением.

Fig. 3 Structure of the system of automatic power distribution between traction loads based on phase-controlled PWM.

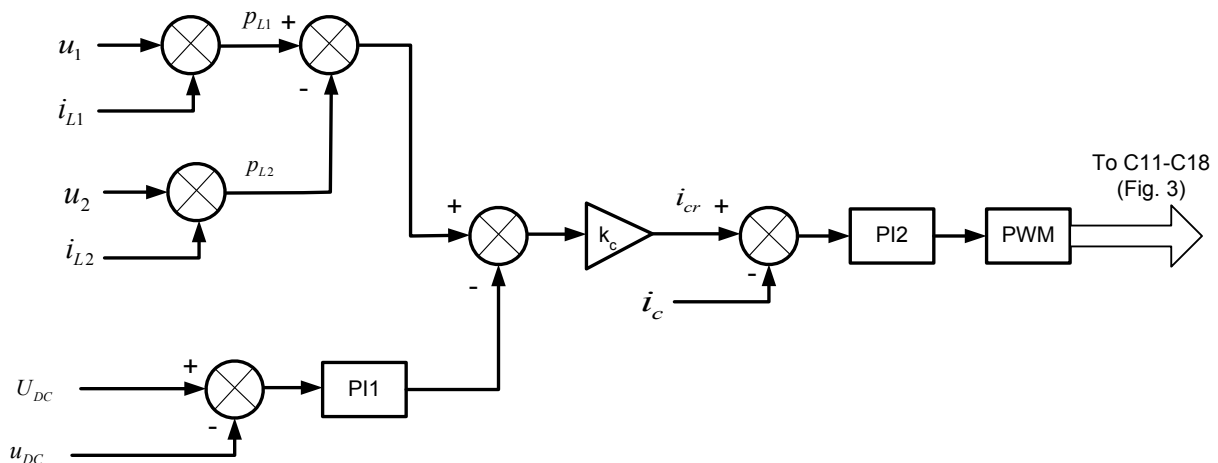


Рис. 4. Структура алгоритма функционирования ШИМ-контроллера.

**Fig. 4. Structure of the algorithm of PWM controller functioning.**

Измеренные значения токов и напряжений использовались для вычисления анализируемых показателей качества электроэнергии. Циклические изменение исходных параметров, в том числе количества ячеек и частоты переключения коммутационных элементов позволили получить результаты моделирования, приведенные в таблицах 1 и 2.

В таблице 1 приведена зависимость коэффициента несимметрии от количества ячеек, приходящихся на одну фазу и от частоты переключения ключей. В таблице 2 приведена аналогичная зависимость для коэффициента

несинусоидальности. Коэффициент несимметрии и коэффициент несинусоидальности уменьшаются с ростом частоты переключения ключей и с ростом количества ячеек, состоящих из коммутационных элементов. Уменьшение этих показателей возможно за счет увеличения массогабаритных показателей оборудования, предназначенного для автоматического распределения мощности между фазами трансформаторного преобразователя, потребления энергии.

Таблица 1. (Table 1)

**Зависимость коэффициента несимметрии от количества ячеек и от частоты переключения ключей.**  
**The dependence of unbalance factor on the cells number and keys switching frequency.**

Количество ячеек Cells number	6	7	8	9	10
Частота переключения, кГц Switching frequency, kHz					
1	4.0%	3.0%	2.3%	2.2%	2.1%
2	3.9%	2.8%	2.1%	2.1%	2.0%
3	4.1%	2.5%	1.8%	1.7%	1.6%
4	3.5%	2.3%	1.6%	1.5%	1.4%
5	3.0%	2.1%	1.5%	1.4%	1.3%

Таблица 2. (Table 2)

**Зависимость коэффициента несинусоидальности от количества ячеек и от частоты переключения ключей.**  
**Dependence of the non-sinusoidality coefficient on the number of cells and on keys switching frequency.**

Количество ячеек Cells number	6	7	8	9	10
Частота переключения, кГц Switching frequency, kHz					
1	5.0%	4.0%	2.3%	2.2%	2.0%
2	4.5%	3.9%	2.1%	2.1%	2.0%
3	4.2%	4.1%	1.9%	1.8%	1.8%
4	4.0%	3.5%	1.6%	1.5%	1.4%
5	3.5%	3.0%	1.5%	1.4%	1.4%

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Предложен такой вариант структуры, который способен обеспечить высокое качество электрической энергии на первичной стороне трансформаторного преобразователя, в том числе, низкий уровень несимметрии токов и напряжений, а также близкий к нулю коэффициент несинусоидальности

при наличии подвижных тяговых нагрузок на железной дороге переменного тока.

Схемотехническое моделирование показало, что несимметрия и несинусоидальность ниже 2% в соответствии с нормативно-технической документацией на качество электроэнергии обеспечивается при количестве ячеек, присоединенных к каждой фазе, равном восьми.

Дальнейшее увеличение количества ячеек приводит к увеличению массы и габаритных размеров системы автоматического распределения мощности, а также увеличению потребляемой мощности.

Кроме того, фазовые сдвиги управляющих сигналов широтно-импульсной модуляции следует выбирать кратными 45 градусам, причем фазовый сдвиг в ячейке С11 должен быть равен 0 градусам, а в ячейка С21 – 180 градусам. Отклонения фазовых сдвигов от этих значений приводят к заметному росту несимметрии.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основе анализа известных структур тяговых трансформаторных преобразователей предложен вариант системы автоматического распределения мощности между фазами трансформаторного преобразователя на вторичной стороне, который обеспечивает при минимально необходимом количестве ячеек, состоящих из коммутационных элементов, значения несимметрии и несинусоидальности не выше двух процентов. Показатели качества функционирования предложенной системы подтверждены путем схемотехнического и математического моделирования при разных исходных данных. Моделирование позволило найти минимальные значения количества ячеек из коммутационных элементов и частоты переключения элементов, которые обеспечивают необходимые значения показателей качества электроэнергии.

### Литература (References)

- [1] Kuznetsov S. M., Singizin I. I., Borzenkov A. N., Rozhkova M. V., Andriyashin S. N. Research of parameters of the traction network of electric locators of mining enterprises. *Mining informational and analytical bulletin*, 2023, no 10-1, pp. 127-140.
- [2] Borodulin B.M., Veksler M.I., Marskiy V.E., Pavlov I.V. *Systema tyagovogo electrosnabzheniya 2x25 kV* [Traction power supply system 2x25 kV], Moscow, Transport, 1989, 247 p. (in Russian)
- [3] Min M.-H., Go Yu-R., An T.-P., Lee T.-H., Lee B.-G. Analysis of voltage unbalance based on domestic and IEC Standard in AC electrical railway system. *The Transactions of Korean Institute of Electrical Engineering*, 2019, Vol.68, no. 12, pp. 1646-1651.
- [4] Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Avdienko I.M., Bezridny Ye.S. Modelirovaniye rezhimov tyagovogo electrosnabzheniya pri dvizhenii vysokoskorostnykh poezdov [Simulation of modes of traction power supply when a high-speed train moves], *Sovremenniyе thekhnologii. Systemniy analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Simulation], 2017, no. 3. pp. 126-135. (in Russian).
- [5] Chen M., Cheng Y., Z., Zhang D., Lv Y., Liu R. Energy storage traction power supply system and control strategy for an electrified railway. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2020, vol. 14, no.12, pp. 2304 - 2314. DOI: 10.1049/iet-gtd.2019.1540.
- [6] Zhang L., Liang S., Li X. Research on the harmonic in new continuous cable traction power supply system and its transmission characteristic. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2020, vol. 14, no.14, pp. 2710 - 2718. DOI: 10.1049/iet-gtd.2019.1715.
- [7] Chernov Yu. A., Dmitrieva N. Yu., Kokorina O. Yu. Power supply system with three-phase transformers for HSR . *World of Transport and Transportation*, 2017, Vol .15, no. 1, pp. 48-62.
- [8] Shandrygin Ye. A., Yegorov D.E., Novikov V.V., Dovgun V.P. Analiz effektivnosti passivnykh filtrocompensiruyushchikh ustroystv dlya system tyagovogo electrosnabzheniya [Analysis of effectiveness of passive filters for traction power supply systems]. *Docladi Akademii nauk vyshey shkoli Rossiyskoi Federatsii* [Reports of Academy of Science of High School of Russian Federation], 2019, no. 1, pp. 91-103. (in Russian).
- [9] Habibolahzadeh M., Roudsari H.M., Jalilian A., Jamali S. Using C-type filter with partial compensation method for capacity reduction of hybrid power quality conditioner in co-phase traction power system. *IET Power Electronics*, 2021, vol. 14, no.14, pp. 2350-2373. DOI: 10.1049/pel2.12185.
- [10] Akagi H., Watanabe E., Arades M. *Instantaneous Power Theory and applications to power conditions*. Hoboken, New Jercey, John Wiley & Sons, 2007, 389 p.
- [11] Zhemerov G.G., Kovalchuk O.I. Symmetrichnaya tryokhphaznaya electromagnitosovmestimaya c pitayushey set'yu systema electrosnabzheniya peremennogo toka dlya zheleznikh dorog [Symmetric 3-phase electromagnetically compatible with power line ac power supply system for railways]. *Electrotehnika i electromekhanika* [Electrical Engineering and Electromechanics], 2010, no. 2, pp. 57-62. (in Russian).
- [12] Yu X. General mathematical model of AC traction power supply system simulation based on mathematical reasoning and its application

- research. *2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems (ICAIS)*, Dalian, China, 2020, pp. 441-446.
- [13] Alphen G., Rens V.W.M., Smulders H.W.M. Analysis of AC traction power supplies using the SIMSPOG simulation tool. *Computers in Railways VII*, WIT Press, 2000, pp. 555-565.
- [14] Yang S., Liu C. Discrete modeling and calculation of traction return-current network for 400 km/h high-speed railway. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2022, Vol. 237, no. 4, pp. 445-457.
- [15] Otari S.S., Dhamangaonkar A. Comparative study of HBRPC with shunt active power filter for high-speed traction supply system. *International Journal of Creative Research Thoughts*, 2022, vol. 10, no. 6, pp. 908-913.
- [16] Feng D., Zhu H., Sun X., Lin Sh. Evaluation of power supply capability and quality for traction power supply system considering the access of distributed generations. *IET Renewable Power Generation*, 2020, vol. 14, no.18, pp. 3644-3652. DOI: 10.1049/iet-rpg.2020.0120.
- [17] Sun P., Li K., Li Y., Zhang L. DC voltage control for MMC-based railway power supply integrated with with renewable generation. *IET Renewable Power Generation*, 2020, vol. 14, no.18, pp. 3679-3689. DOI: 10.1049/iet-rpg.2020.0132.
- [18] Kapustin A. V., Shchurov N.I. An Overview of main multilevel inverter topologies. *Russian Electrical Engineering*, 2023, vol. 94, no. 5, pp. 334-339. DOI: 10.3103/S1068371223050061.
- [19] Myatezh S. V., Lisitsyn P. S. On output-voltage shape correction of two- and three-level single-phase autonomous inverters without pulse-width modulation. *Russian Electrical Engineering*, 2023, vol. 94, no. 5, pp. 351-355. DOI: 10.3103/S1068371223050115.
- [20] Wu X., Gao X., Wang J., Li Z., Du Sh., Gao Sh., Li. F., Du J., Shchurov N.I., Zhang X. Advances in modeling and suppression methods of EMI in power electronic converters of third-generation semiconductor devices. *Electronics*, 2023, vol. 12, no. 11, art. 2348 (26 p.). DOI 10.3390/electronics12112348. URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/12/11/2348> (accessed 08.02.2024).
- [21] Kuznetsov S. M., Malozyomov B. V., Latyshev R. N., Abramov E. Y., Borzenkov A. N. An investigation of the traction-network parameters of an electric locomotive with a short circuit. *Russian Electrical Engineering*, 2023, vol. 94, no. 5, pp. 345-350. DOI: 10.3103/S1068371223050097.
- [22] Lavrenov E. O., Vilberger M. E., Temlyakova Z. S., Morozov P. V., Temlyakov A. A. Simulation of a turn-to-turn short circuit in an induction-motor rotor winding. *Russian Electrical Engineering*, 2022, vol. 93, no. 5, pp. 326-330. DOI 10.3103/S1068371222050078.

**Сведения об авторах.**



**Морозов Юрий Владимирович**, кандидат технических наук, область научных интересов - информационные технологии в энергетике, алгоритмы обработки сигналов, системы искусственного интеллекта  
E-mail: [yu.morozov@corp.nstu.ru](mailto:yu.morozov@corp.nstu.ru)



**Морозов Павел Владимирович**, кандидат технических наук, область научных интересов, теоретические основы электротехники, тяговые трансформаторные преобразователи энергии, вопросы повышения качества электроэнергии  
E-mail: [p.morozov@corp.nstu.ru](mailto:p.morozov@corp.nstu.ru)