

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ, БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

УДК 629.423.1

DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_114

П. В. Григоренко, О. В. Мельниченко, А. Ю. Портной, А. С. Самойлова

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТОКОПРИЁМНИКЕ СОВРЕМЕННОГО ОТЕЧЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С КОЛЛЕКТОРНЫМ ПРИВОДОМ

Аннотация. Рассматриваются проблемы высокого расхода электроэнергии из тяговой сети современными отечественными электровозами переменного тока с коллекторным приводом и низкого качества электроэнергии на их токоприёмниках. Выяснено, что данные проблемы обусловлены наличием в контактной сети реактивной мощности, потребляемой электровозами практически в равных пропорциях с активной, и значительными искажениями напряжения и тока. Предложен новый способ управления пле-чами выпрямительно-инверторных преобразователей на базе IGBT-транзисторов, позволяющий повысить коэффициент мощности современного отечественного электровоза переменного тока с коллекторным приводом до 0,99 и снизить коэффициенты гармонических составляющих напряжения и тока на его токоприёмнике до 4 и 10 % соответственно. Предлагаемый способ позволит значительно повысить эффективность вождения поездов с применением технологии «Виртуальная сцепка».

Ключевые слова: качество электроэнергии, коэффициент мощности, энергоэффективность, электровоз переменного тока, выпрямительно-инверторный преобразователь, IGBT-транзисторы, коллекторный привод, технология «Виртуальная сцепка».

Для цитирования: Повышение качества электроэнергии на токоприёмнике современного отечественного электровоза переменного тока с коллекторным приводом / П. В. Григоренко, О. В. Мельниченко, А. Ю. Портной, А. С. Самойлова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 2. – С. 114–125. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_114.

Введение

Высокоэффективная и ресурсосберегающая энергетика – приоритетное направление научно-технологического развития России [1]. В связи с этим актуально разрабатывать новые способы экономии электроэнергии в наиболее значимых отраслях страны. Такой отраслью является железнодорожный транспорт, это один из наиболее энергоемких секторов российской экономики. В среднем 42132 млн кВт·ч электроэнергии ежегодно затрачивается на тягу поездов, что составляет 80 % от всей потребляемой электроэнергии компанией ОАО «РЖД» или 4 % от всей потребляемой электроэнергии в России (рис. 1) [2, 3].

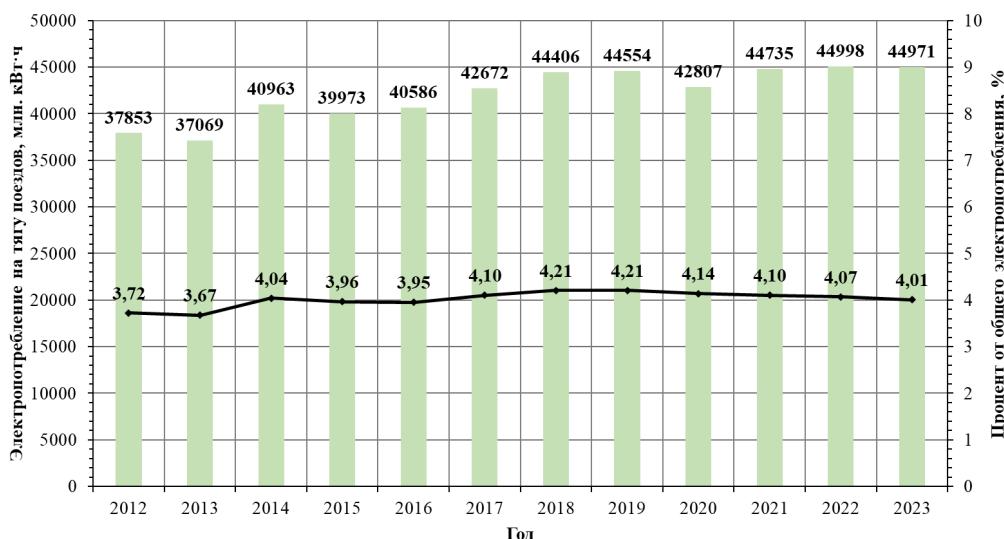


Рис. 1. Электропотребление на тягу поездов и его процент от общего электропотребления

Экономия электроэнергии на железнодорожном транспорте – актуальное направление развития. Проблемы высокого потребления электроэнергии на тягу поездов в значительно большей степени проявляют себя именно сегодня, при высоком темпе роста интенсивности движения поездов, особенно по Восточному полигону, при вождении поездов по технологии «Виртуальная сцепка» [4]. При использовании данной технологии снижается интервал времени попутного следования поездов, в результате чего увеличивается количество составов, одновременно движущихся по перегону. Однако при этом закономерно увеличивается и потребление мощности тяговых подстанций, которые в настоящее время работают на пределе своих мощностей. Поэтому для эффективного вождения поездов по технологии «Виртуальная сцепка» и, соответственно, повышения пропускной способности железных дорог, необходимо снижать расход электроэнергии на тягу поездов в тяговой сети.

Высокий расход электроэнергии современными отечественными электровозами переменного тока с коллекторным приводом обусловлен дополнительным потреблением реактивной мощности, практически в равных пропорциях с активной, что снижает КПД тяговой сети (до 0,89) за счёт увеличения в ней тока [5, 6]. Наличие реактивной мощности, в свою очередь, связано с индуктивностью оборудования электровоза (тяговые трансформаторы (ТТ), сглаживающие реакторы, тяговые двигатели и др.), с отсутствием возможности запирать тиристоры выпрямительно-инверторных преобразователей (ВИП) электровоза, а также с наличием значительных искажений напряжения и тока на токоприёмнике, вызванных распределённой ёмкостью контактной сети и коммутацией тиристоров. Коэффициент мощности современных отечественных электровозов переменного тока с коллекторным приводом в среднем в эксплуатации составляет 0,71 и не превышает 0,84 в режиме тяги [5, 7, 8], что противоречит требованиям ГОСТ 55364-2012, согласно которому его значение должно быть не менее 0,9. Коэффициент гармонических составляющих напряжения на токоприёмнике электровоза может достигать 18 % [9] при максимальном допустимом по ГОСТ 32144-2014 значении 5 %, а коэффициент гармонических составляющих тока превышает 50 % [10]. По качественным показателям электроэнергии электровозы переменного тока с коллекторным приводом значительно уступают электровозам переменного тока с асинхронным приводом, коэффициент мощности которых составляет 0,98–0,99, а коэффициенты гармонических составляющих напряжения и тока составляют 1,5–3 % и 4,5–15 % соответственно [10–12]. Низкое качество электроэнергии на токоприёмниках современных отечественных электровозов с коллекторным приводом негативно влияет на работу их электрического и электронного оборудования, значительно снижая его ресурс, поддерживая тем самым положительную динамику неплановых ремонтов. Однако до сих пор отечественные электровозы переменного тока эксплуатируются с недопустимыми коэффициентами несинусоидальности напряжения и тока на токоприёмнике.

Авторами разработано решение, позволяющее значительно снизить реактивную мощность, потребляемую современным отечественным электровозом переменного тока с коллекторным приводом. Решение заключается в реализации такого способа управления ВИП, который позволил практически полностью устраниТЬ угол отставания тока сети, потребляемого электровозом, от напряжения на его токоприёмнике [13–18]. Такое положение дел становится возможным только при замене полууправляемых тиристорных силовых полупроводниковых приборов ВИП электровоза на полностью управляемые IGBT-транзисторы (рис. 2). Коэффициент мощности электровоза переменного тока в режиме тяги, оборудованного ВИП на базе IGBT-транзисторов, в среднем составляет 0,95 [16], что значительно выше, чем у электровоза со штатным ВИП на базе тиристоров (0,71) [5, 7]. Однако у существующих способов управления ВИП на базе IGBT-транзисторов [16, 19] имеются значительные дополнительные резервы повышения как коэффициента мощности электровоза, так и показателей качества электроэнергии на его токоприёмнике при работе в режиме тяги.

В данной работе предлагается способ управления плечами ВИП на базе IGBT-транзисторов с целью повысить коэффициент мощности современного отечественного электровоза переменного тока с коллекторным приводом в режиме тяги и значительно снизить гармонические составляющие напряжения и тока на его токоприёмнике.

Описание предлагаемого авторами способа

Способ объединяет и усовершенствует ранее предложенные авторами способы управления ВИП на базе IGBT-транзисторов, позволяющие повысить качество электроэнергии на токоприёмнике электровоза переменного тока:

– способ разнесённого управления преобразователями, заключающийся в разнесении временных интервалов работы ВИП в полупериоде питающего напряжения тяговой сети, согласно которому при включении транзисторных плеч одного ВИП выключаются транзисторные плечи другого ВИП, а

моменты включения и выключения вблизи границ полупериода разносятся на угол разнофазного управления с чередованием их по полупериодам [20–22];

— способ организации коммутации, заключающийся в разбиении большого контура коммутации плеч ВИП на несколько малых, но протекающих последовательно друг за другом и тем самым создающих условия для снижения выбросов ЭДС самоиндукции обмоток ТТ [23].

Предлагаемый способ заключается в квантовании синусоидального сигнала, амплитуда которого зависит от напряжения управления зонами регулирования, с целью получения в полупериоде амплитудно-временной области n -х количеств временных уровней, определяющих длительность работы секций вторичных обмоток ТТ электровоза переменного тока. Данный способ позволяет привести форму тока на токоприёмнике электровоза к форме синусоиды и исключить выбросы ЭДС самоиндукции обмоток ТТ за счёт организации их противофазного наложения. Электромагнитные процессы на токоприёмнике и в выпрямленной цепи электровоза переменного тока с ВИП на базе IGBT-транзисторов при работе по предлагаемому способу аналогичны изложенным ранее в статьях [20–23]. В данной статье приведены этапы его реализации, которые представлены на рис. 3–5 для электровоза с четырьмя ВИП и потележечным регулированием силы тяги.

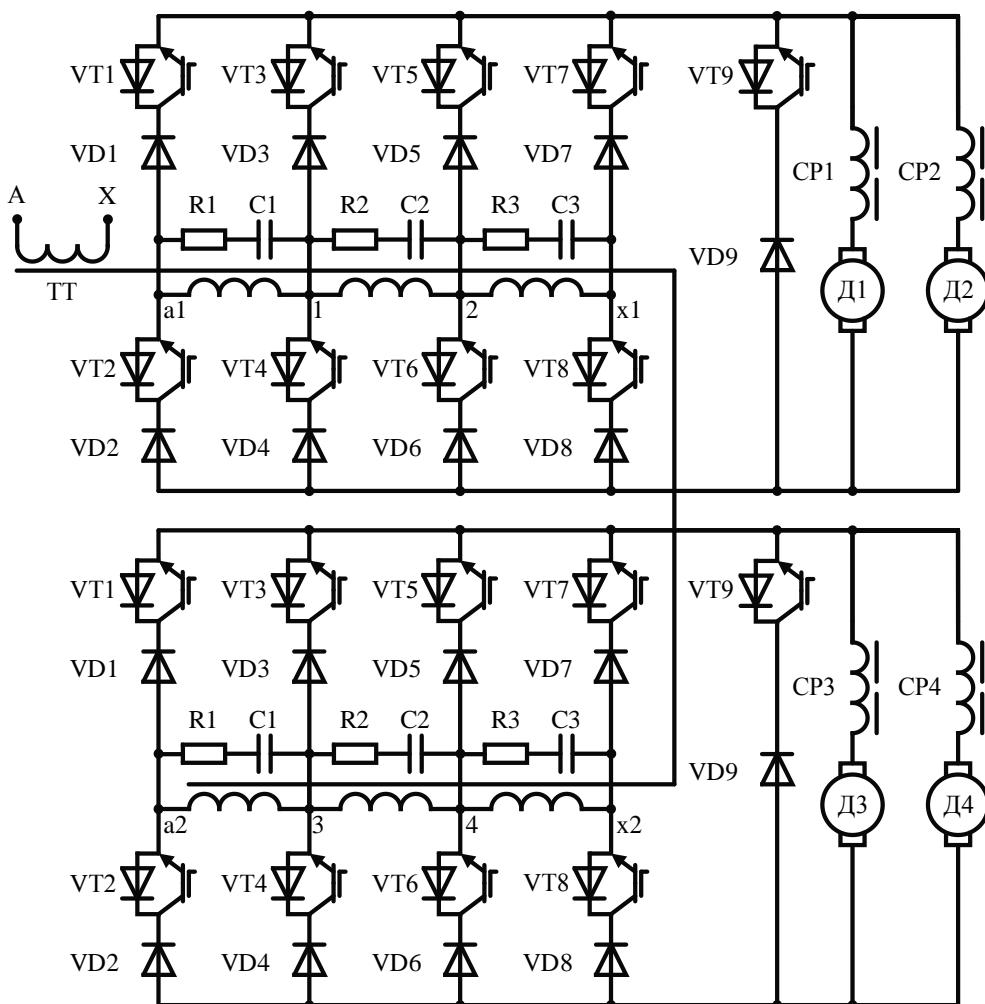


Рис. 2. Упрощённая принципиальная схема силовой цепи электровоза переменного тока с ВИП на базе IGBT-транзисторов:

VT1-VT9 – транзисторные плечи; VD1-VD9 – диодные плечи; TT – тяговый трансформатор;

A-X – первичная обмотка TT; a1-1-2-x1, a2-3-4-x2 – секции вторичной обмотки TT;

R1-R3, C1-C3 – снабберные цепи; CP1-CP4 – сглаживающие реакторы; Д1-Д4 – тяговые двигатели

На этапе 1 (рис. 3) задаётся напряжение управления зонами $U_{\text{управ. zone}}$, например, системой автоматики электровоза.

На этапе 2 (рис. 3) определяется значение амплитуды A_{sin} , пропорциональное напряжению управления зонами $U_{\text{управ. zone}}$, для формирования синусоидального сигнала \sin .

На этапе 3 (рис. 3) формируется синусоидальный сигнал \sin с амплитудой A_{sin} .

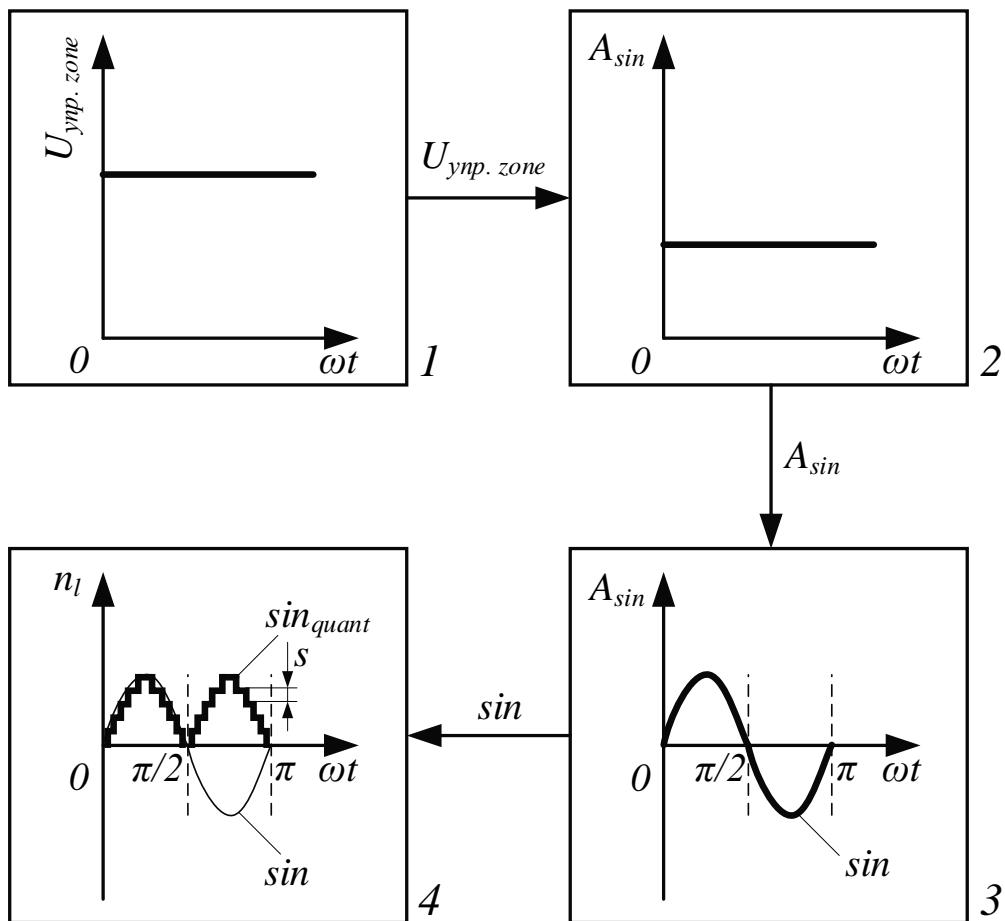


Рис. 3. Этапы получения квантованного синусоидального сигнала \sin_{quant} по заданному напряжению управления зонами регулирования $U_{\text{упр. zone}}$

На этапе 4 (рис. 3) синусоидальный сигнал \sin преобразуется в квантованный синусоидальный сигнал \sin_{quant} , с помощью алгоритма квантования сигнала с фиксированным шагом s по формуле (1):

$$n_l(\omega t) = s \cdot \text{sign}(\sin(\omega t)) \cdot \text{floor}(|\sin(\omega t)|/s) + 0,5, \quad (1)$$

где $\sin(\omega t)$ – синусоидальный сигнал \sin ;

s – шаг квантования по уровню;

floor – функция округления до меньшего целого числа;

sign – функция знака;

$n_l(\omega t)$ – уровень квантованного синусоидального сигнала \sin_{quant} .

Квантованный синусоидальный сигнал \sin_{quant} используется для установления в полупериоде амплитудно-временной области n -х временных уровней, определяющих алгоритм работы управляемых силовых полупроводниковых приборов плеч ВИП (рис. 2). Максимальное количество уровней квантованного синусоидального сигнала \sin_{quant} ограничено значением $n_{l\max}$, рассчитываемым по формуле (2):

$$n_{l\max} = n_{z(\max)} \cdot n_{\text{вип}(\max)}, \quad (2)$$

где $n_{z(\max)}$ – количество зон регулирования ВИП;

$n_{\text{вип}(\max)}$ – количество ВИП в электровозе.

В рассматриваемом случае (электровоз с четырьмя ВИП и потележечным регулированием силы тяги) $n_{z(\max)} = n_{\text{вип}(\max)} = 4$.

На этапе 5 (рис. 4) фиксируются и запоминаются временные моменты возрастания уровня $a_{n_{li}}^{n_{zi}}$ квантованного синусоидального сигнала \sin_{quant} , где n_{zi} – номер i -й зоны регулирования ВИП, n_{li} – номер i -го уровня сигнала \sin_{quant} . Нумерация индексов a осуществляется с первой зоны регулирования ($n_{zi} = 1$) и первого уровня сигнала \sin_{quant} ($n_{li} = 1$). В моменты возрастания уровня квантованного синусоидального

сигнала \sin_{quant} значение n_{li} увеличивается на единицу, если $n_{li} = n_{\text{end(max)}}$, то следующий момент возрастаания \sin_{quant} будет обозначен для следующей зоны регулирования, то есть для $n_{zi} = 2$, нумерация n_{li} начнётся снова с 1. Моменты убывания уровня $b_{n_{li}}^{n_{zi}}$ квантованного синусоидального сигнала \sin_{quant} рассчитываются как $b_{n_{li}}^{n_{zi}} = \pi - a_{n_{li}}^{n_{zi}}$. Каждый i -й уровень сигнала \sin_{quant} определяет длительность работы секций вторичных обмоток ТТ (рис. 2).

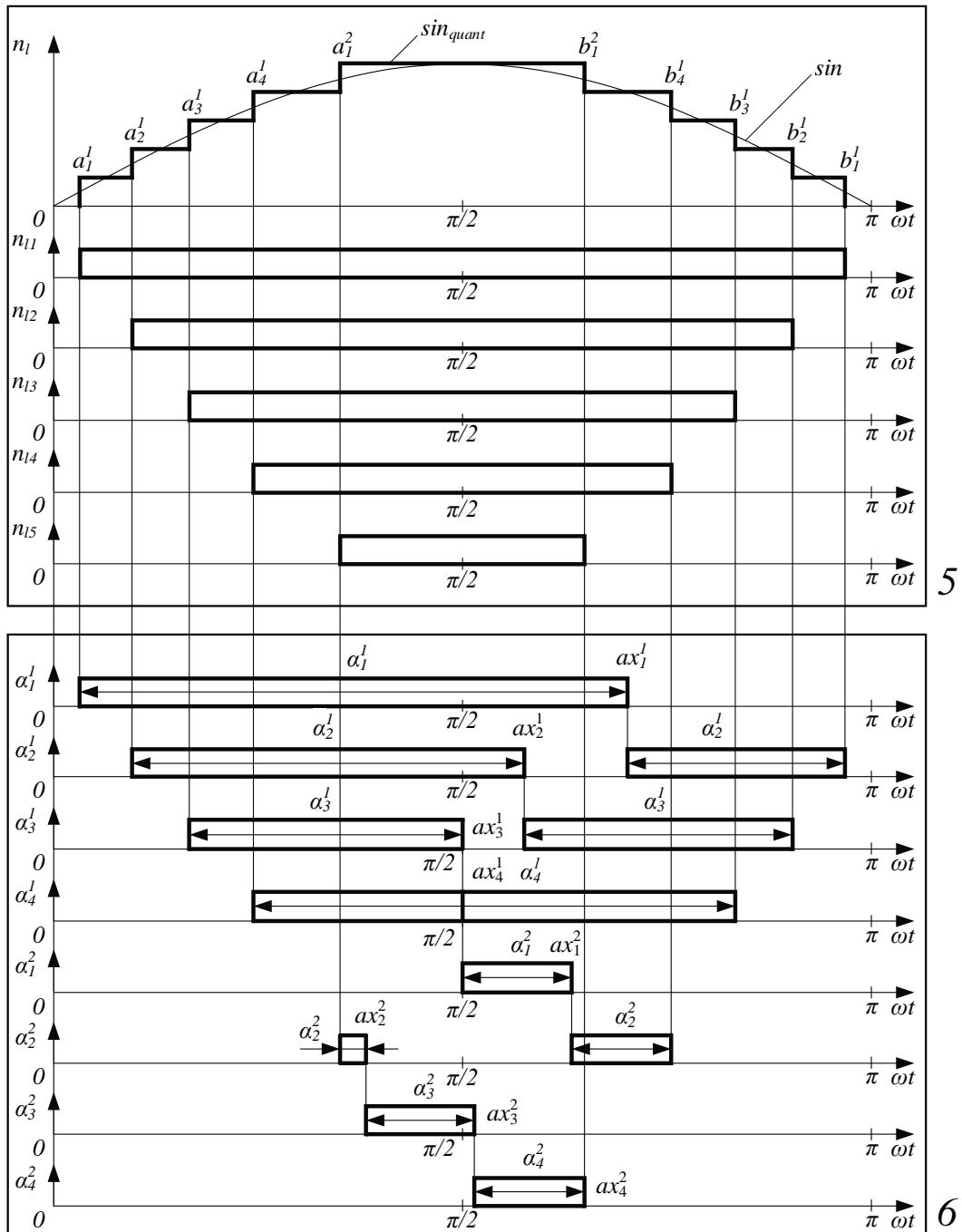


Рис. 4. Этапы реализации в полупериоде амплитудно-временной области n - x временных уровней, моментов подключения/отключения секций вторичных обмоток ТТ электровоза и их временных интервалов работы

На этапе 6 (рис. 4) моменты подключения и отключения секций вторичных обмоток ТТ приравниваются моментам возрастания $a_{n_{li}}^{n_{zi}}$ и убывания $b_{n_{li}}^{n_{zi}}$ квантованного синусоидального сигнала \sin_{quant} и определяются моменты подключения и отключения секций вторичных обмоток ТТ внутри амплитудно-временной области $ax_{n_{\text{bin}}}$, которые в совокупности с известными временными моментами $a_{n_{li}}^{n_{zi}}$ и $b_{n_{li}}^{n_{zi}}$ представляют собой временные интервалы работы секций вторичных обмоток

ТТ $\alpha_{n_{\text{випи}}}^{n_{zi}}$. При этом обеспечивается идентичное напряжение тяговых двигателей $U_{dreq}^{n_{zi}}$. Расчёт производится для всех ВИП, при этом каждому ВИП присваивается порядковый номер $n_{\text{випи}}$, лежащий в диапазоне от 1 до $n_{\text{випи(max)}}$, расчёт производится с первого ВИП и секции вторичной обмотки ТТ, образующей первую зону регулирования, то есть секции 1–2 (рис. 2), следующим образом. Момент подключения секции вторичной обмотки ТТ 1–2 (рис. 2), образующей первую зону регулирования ($n_{zi} = 1$) первого ВИП ($n_{\text{випи}} = 1$) принимается равным a_1^1 , то есть первому моменту возрастания квантованного синусоидального сигнала \sin_{quant} ($n_{li} = 1$). Далее производится расчёт момента отключения данной секции вторичной обмотки ТТ $ax_{n_{\text{випи}}}^{n_{zi}}$ по формуле (3):

$$ax_{n_{\text{випи}}}^{n_{zi}} = \cos^{-1} (\cos(a_{n_{li}}^{n_{zi}}) - \frac{\pi \cdot U_{dreq}^{n_{zi}}}{U_{\Delta 2} \cdot \sqrt{2}}), \quad (3)$$

где $U_{\Delta 2}$ – шаг изменения напряжения при переключении секций вторичных обмоток ТТ (315 В).

Таким образом, временной интервал работы секции вторичной обмотки ТТ 1–2 (рис. 2), образующей первую зону регулирования, первого ВИП $\alpha_{n_{\text{випи}}}^{n_{zi}} = a_1^1$, располагается между a_1^1 и ax_1^1 .

Момент подключения секции вторичной обмотки ТТ 3–4 (рис. 2), образующей первую зону регулирования ($n_{zi} = 1$), второго ВИП ($n_{\text{випи}} = 2$), принимается равным $ax_{n_{\text{випи}}(i-1)}^{n_{zi}}$, то есть моменту отключения секции вторичной обмотки ТТ 1–2 (рис. 2), образующей первую зону регулирования первого ВИП ax_1^1 . Далее производится проверка достаточности напряжения $U_{drem_{nli}}^{n_{zi}}$ оставшейся части n -го уровня амплитудно-временной области ($n_{li} = 1$), то есть $U_{drem_1}^1$, для обеспечения требуемого напряжения тяговых двигателей $U_{dreq}^{n_{zi}}$, то есть U_{dreq}^1 , по формуле (4):

$$U_{drem_{nli}}^{n_{zi}} = \frac{U_{\Delta 2} \cdot \sqrt{2}}{\pi} (\cos(ax_{n_{\text{випи}}(i-1)}^{n_{zi}}) - \cos(b_{n_{li}}^{n_{zi}})). \quad (4)$$

В случае если $U_{dreq}^{n_{zi}} \leq U_{drem_{nli}}^{n_{zi}}$, то расчёт момента отключения секции вторичной обмотки ТТ 3–4 второго ВИП (рис. 2) производится по формуле (5):

$$ax_{n_{\text{випи}}}^{n_{zi}} = \cos^{-1} (\cos(ax_{n_{\text{випи}}(i-1)}^{n_{zi}}) - \frac{\pi \cdot U_{dreq}^{n_{zi}}}{U_{\Delta 2} \cdot \sqrt{2}}). \quad (5)$$

В случае если $U_{dreq}^{n_{zi}} > U_{drem_{nli}}^{n_{zi}}$, то расчёт момента отключения секции вторичной обмотки ТТ 3–4 второго ВИП (рис. 2) производится по формуле (6):

$$ax_{n_{\text{випи}}}^{n_{zi}} = \cos^{-1} (\cos(ax_{n_{\text{випи}}(i-1)}^{n_{zi}}) + \cos(a_{n_{li}}^{n_{zi}}) - \cos(b_{n_{li}}^{n_{zi}}) - \frac{\pi \cdot U_{dreq}^{n_{zi}}}{U_{\Delta 2} \cdot \sqrt{2}}). \quad (6)$$

Аналогично производится дальнейший расчёт моментов подключения и отключения секций вторичных обмоток ТТ $a1-1, 1-2, 2-x1, a2-3, 3-4, 4-x2$ следующих ВИП электровоза, в том числе образующих $2 \dots n_{z(\max)}$ зоны регулирования. При этом напряжение тяговых двигателей, прикладываемое секциями вторичных обмоток ТТ, образующих зону регулирования, будет ограничено временным интервалом работы последнего по порядковому номеру ВИП, так как границами его работы в полупериоде будут выступать наиболее близкие к середине полупериода значения $a_{n_{li}}^{n_{zi}}$ и $b_{n_{li}}^{n_{zi}}$. Поэтому при выполнении равенства (7) дальнейшее увеличение напряжения тяговых двигателей осуществляется подключением дополнительных секций вторичных обмоток ТТ, образуя тем самым следующую зону регулирования, начиная с плеч первого ВИП электровоза.

$$\frac{U_{\Delta 2} \cdot \sqrt{2}}{\pi} (\cos(a_{n_{li}}^{n_{zi}}) - \cos(b_{n_{li}}^{n_{zi}})) = U_{dreq}^{n_{zi}}. \quad (7)$$

Момент подключения секций вторичной обмотки ТТ для образования следующей зоны регулирования (секций $a1-1$ и $a2-3$ для образования второй зоны регулирования) принимается равным $ax_{n_{\text{випи(max)}}}^{n_{z(i-1)}}$. То есть в момент отключения секции вторичной обмотки ТТ 3–4 четвёртого ВИП происходит подключение секции вторичной обмотки ТТ $a1-1$ первого ВИП (рис. 4).

На этапе 7 (рис. 5) суммируются полученные временные интервалы $\alpha_{n_{\text{вип}i}}^{n_{zi}}$ работы секций вторичных обмоток ТТ каждого ВИП, в результате получаем алгоритм работы силовых полупроводниковых приборов плеч ВИП $\alpha_{n_{\text{вип}i}}$. При $\alpha_{n_{\text{вип}i}} = s$ работают плечи ВИП, подключающие и отключающие секции вторичных обмоток ТТ для образования первой зоны регулирования, т. е. плечи VT3-VT6 подключают обмотки 1–2 и 3–4 (рис. 2), при $\alpha_{n_{\text{вип}i}} = 2 \cdot s$ работают плечи ВИП, подключающие и отключающие секции вторичных обмоток ТТ для образования второй зоны регулирования, то есть плечи VT1-VT2 подключают обмотки $a1-1$ и $a2-3$, а плечи VT3-VT6 подключают обмотки 1–2 и 3–4 (рис. 2), и т. д. до $\alpha_{n_{\text{вип}i}} = n_{z(\max)} \cdot s$.

Таким образом, в процессе регулирования напряжение тяговых двигателей равномерно распределяется в полупериоде, что приводит ток на токоприёмнике электровоза к форме синусоиды. При этом момент подключения секции вторичной обмотки ТТ к тяговым двигателям плечами ВИП всегда равен моменту отключения секции вторичной обмотки ТТ от тяговых двигателей плечами другого ВИП. Такой подход позволяет значительно ограничить выбросы ЭДС самоиндукции обмоток ТТ электровоза.

На рис. 6 представлены формы выпрямленного напряжения на выходе ВИП $U_{d\text{bus}}$, средневыпрямленное напряжение U_d , формы токов на токоприёмнике электровоза i_1 без индуктивности сети (чёрная линия) и с учётом индуктивности сети (красная линия).

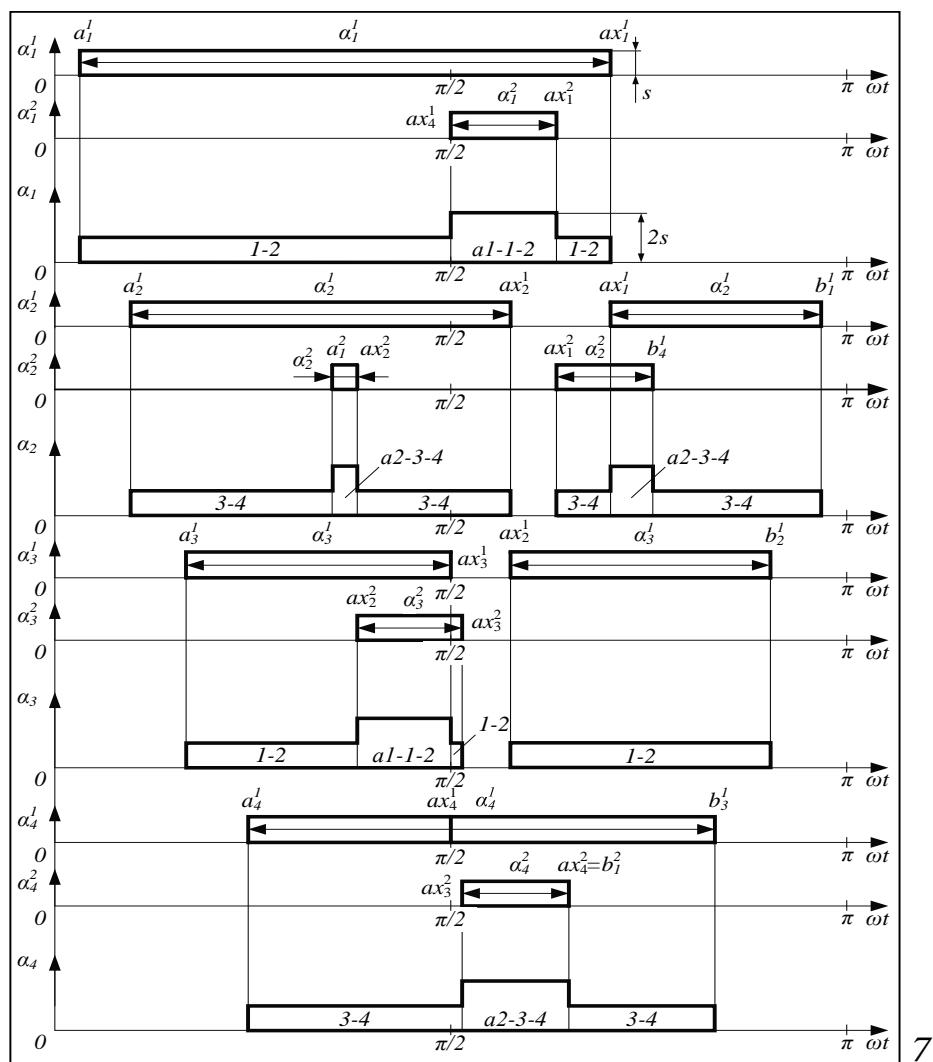


Рис. 5. Этап реализации итогового алгоритма работы ВИП по вычисленным временным интервалам работы секций вторичных обмоток ТТ электровоза

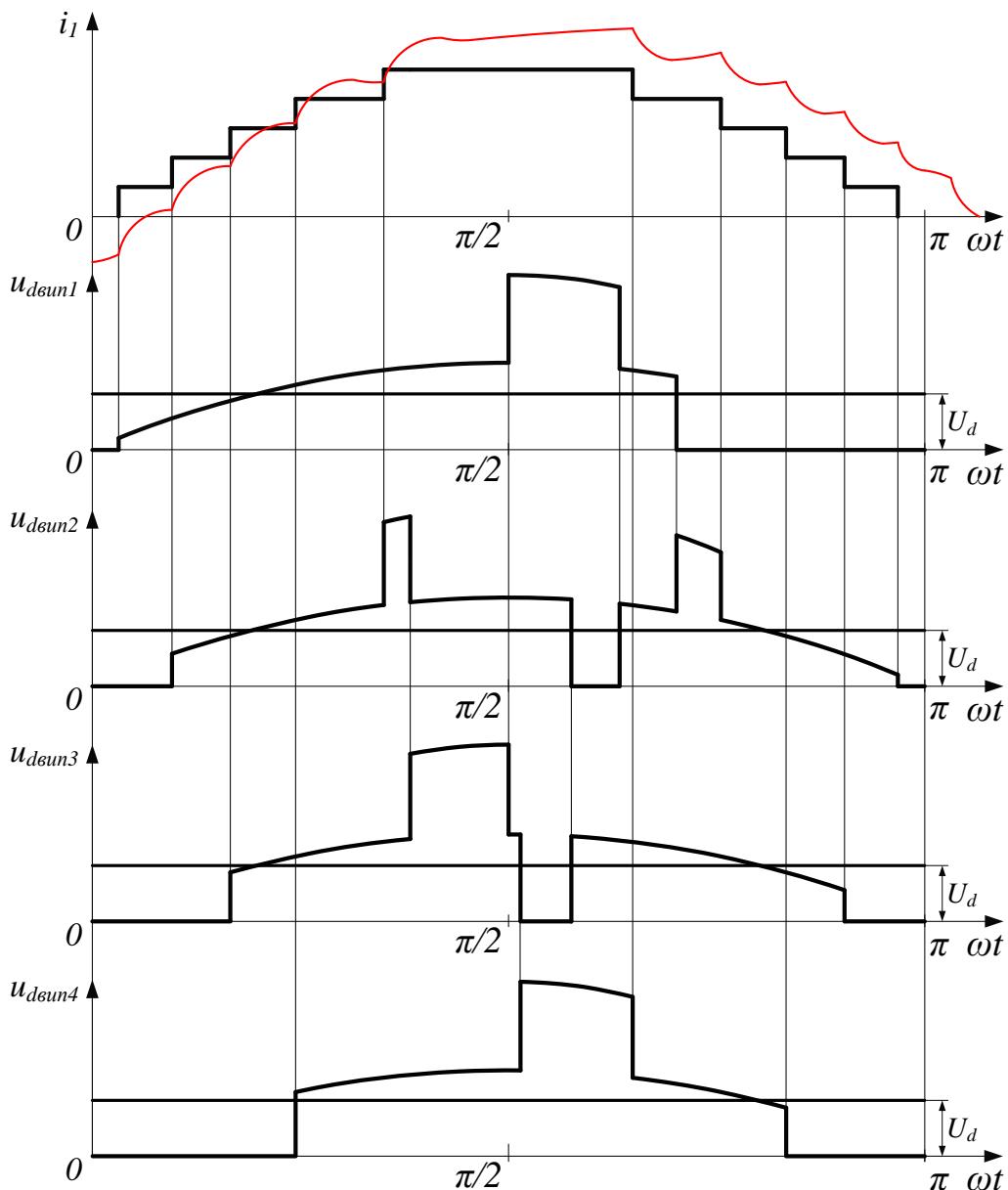


Рис. 6. Формы выпрямленного напряжения на выходе ВИП $u_{\text{дин}}$ и формы токов на токоприёмнике электровоза i_1 без индуктивности сети и с учётом индуктивности сети

Выводы

Современные отечественные электровозы переменного тока с коллекторным приводом и тиристорными ВИП при их работе имеют низкий коэффициент мощности (в среднем 0,71 в режиме тяги) и значительные коэффициенты гармонических составляющих напряжения и тока на токоприёмнике (18 и 50 % соответственно), что значительно ограничивает применение технологии «Виртуальная сцепка» на Восточном полигоне за счёт потребления реактивной мощности электровозами и низкого КПД тяговой сети (0,89).

Низкое качество электроэнергии на токоприёмниках современных отечественных электровозов с коллекторным приводом и тиристорными ВИП негативно влияет на работу их электрического и электронного оборудования, значительно снижая его ресурс, поддерживая тем самым положительную динамику неплановых ремонтов. Однако до сих пор отечественные электровозы переменного тока эксплуатируются с недопустимыми коэффициентами несинусоидальности напряжения и тока на токоприёмнике.

Эксплуатация современных отечественных электровозов переменного тока с коллекторным приводом и транзисторными ВИП с предлагаемым способом управления в режиме тяги позволит повысить коэффициент мощности электровоза до 0,99 и снизить коэффициенты гармонических составляющих напряжения и тока на токоприёмнике до 4 и 10 % соответственно, что значительно повысит

надёжность работы электровозов и эффект от вождения поездов с применением технологии «Виртуальная сцепка».

Список литературы

- 1 Указ Президента Российской Федерации от 18.06.2024 г. № 529 // Президент России : официальный сайт. – 2025. – URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/50755> (дата обращения: 17.04.2025).
- 2 Отчеты о функционировании ЕЭС // АО «СО ЕЭС» : официальный сайт. – 2025. – URL: <https://www.so-ups.ru/functioning/tech-disc/tech-disc-ups/> (дата обращения: 17.04.2025).
- 3 Отчеты об устойчивом развитии // ОАО «РЖД» : официальный сайт. – 2025. – URL: <https://company.rzd.ru/ru/9386/page/103290?id=17643> (дата обращения: 17.04.2025).
- 4 Технология «Виртуальная сцепка» // ООО «АВП Технология» : официальный сайт. – 2025. – URL: <https://avpt.ru/products/virtualnaya-stsepka/> (дата обращения: 17.04.2025).
- 5 Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава / под редакцией И. К. Лакина // Труды Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Красноярск, 24–25 марта 2020 г. – Красноярск : АО «ДЦВ Красноярской ж.д.», 2020. – 360 с.
- 6 **Фролов, Н. О.** Электрические железные дороги : методические рекомендации / Н. О. Фролов, Н. Г. Фетисова. – Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2012. – 93 с.
- 7 **Мамошин, Р. Р.** Энергетика системы переменного тока / Р. Р. Мамошин // Железнодорожный транспорт. – 1987. – № 9. – С. 69–70.
- 8 **Тихменев, Б. Н.** Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями / Б. Н. Тихменев, В. А. Кучумов. – Москва : Транспорт, 1988. – 311 с.
- 9 **Клинкова, О. А.** Внутрисистемный учет электрической энергии и контроль ее качества на электровозах переменного тока : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Клинкова Ольга Александровна ; Дальневосточный государственный университет путей сообщения. – Комсомольск-на-Амуре, 2008. – 149 с.
- 10 Показатели качества потребления энергии в коллекторном и асинхронном тяговых приводах электровозов переменного тока / А. А. Зарифьян, А. М. Евстахьев // Известия Петербургского университета путей

References

- 1 Decree of the President of the Russian Federation No. 529, dated June 18, 2024 // President of Russia : official website. – 2025. – URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/50755> (date of access: 04/17/2025).
- 2 Reports on the functioning of the UPS // JSC «SO UPS» : official website. – 2025. – URL: <https://www.so-ups.ru/functioning/tech-disc/tech-disc-ups/> (date of access: 04/17/2025).
- 3 Reports on sustainable development // JSC Russian Railways : official website. – 2025. – URL: <https://company.rzd.ru/ru/9386/page/103290?id=17643> (date of access: 04/17/2025).
- 4 Technology “Virtual Coupling” // LLC «AVP Technology» : official website. – 2025. – URL: <https://avpt.ru/products/virtualnaya-stsepka/> (date of access: 04/17/2025).
- 5 Operation and maintenance of electronic and microprocessor equipment of traction rolling stock / edited by I. K. Lakin // Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation, Krasnoyarsk, 24–25 March 2020. – Krasnoyarsk : JSC «Road Center for the Implementation of the Krasnoyarsk Railway», 2020. – 360 p.
- 6 **Frolov, N. O.** Electric railways : method. recommendations / N. O. Frolov, N. G. Fetisova. – Yekaterinburg : USURT Publishing House, 2012. – 93 p.
- 7 **Mamoshin, R. R.** Power engineering of an alternating current system / R. R. Mamoshin // Railway transport. – 1987. – No. 9. – P. 69–70.
- 8 **Tikhmenev, B. N.** AC electric locomotives with thyristor converters / B. N. Tikhmenev, V. A. Kuchumov. – Moscow : Transport, 1988. – 311 p.
- 9 **Klinkova, O. A.** In-system accounting of electric energy and control of its quality on electric locomotives of alternating current : specialty 05.09.03 “Electrotechnical complexes and systems” : dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Klinkova Olga Aleksandrovna ; Far Eastern State Transport University. – Komsomolsk-on-Amur, 2008. – 149 p.
- 10 Energy consumption quality indicators in collector and asynchronous traction drives of AC electric locomotives / A. A. Zarifyan, A. M. Evstafiev // Proceedings of Petersburg Transport University. – Vol. 20, No. 4.

- сообщения. – 2023. – Т. 20, № 4. – С. 987–998. – DOI 10.20295/1815-588X-2023-4-987-998.
- 11 Экспериментальное исследование энергетической эффективности асинхронного тягового привода электровозов при изменяющейся нагрузке / А. А. Зарифьян, П. Г. Колпахчян // Бюллетень результатов научных исследований. – 2023. – № 1. – С. 77–92. – DOI 10.20295/2223-9987-2023-1-77-92.
- 12 Режимы электротяговой сети при эксплуатации электровозов ВЛ-80р и УТУ-1 / А. Т. Бурков, М. М. Мирмайтов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2016. – Т. 13, № 2. – С. 146–160. – ISSN 1815-588X.
- 13 Разработка нового энергосберегающего алгоритма управления ВИП электровоза на IGBT модулях / Д. А. Яговкин, О. В. Мельниченко, А. Ю. Портной // Вестник института тяги и подвижного состава. – 2013. – № 9. – С. 17–24. – ISBN 978-5-262-00710-3.
- 14 Новый выпрямительно-инверторный преобразователь для тягового подвижного состава переменного тока с повышенными энергетическими характеристиками в режиме тяги / Д. А. Яговкин, О. В. Мельниченко, А. Ю. Портной, С. Г. Шрамко // Наука и техника транспорта. – 2014. – № 3. – С. 46–51. – ISSN 2074-9325.
- 15 Структура математической модели выпрямительно-инверторного преобразователя на IGBT-транзисторах для электровоза переменного тока в режиме тяги / Д. А. Яговкин, А. Ю. Портной, О. В. Мельниченко [и др.] // Электропривод на транспорте и в промышленности: труды II Всероссийской научно-практической конференции, Хабаровск, 20–21 сентября 2018 года. – Хабаровск : Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 2018. – С. 121–129. – ISBN 978-5-262-00831-5.
- 16 **Яговкин, Д. А.** Совершенствование выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза переменного тока и принципа его управления в режиме тяги 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Яговкин Дмитрий Андреевич; Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. – Иркутск, 2016. – 162 с.
- 17 Экспериментальный стенд для исследования процессов работы тиристорного и транзисторного выпрямительно-инверторных преобразователей электровоза переменного тока в режиме тяги на высших зонах регулирования / Д. А. Яговкин, О. В. Мельниченко, А. Ю. Портной, С. Г. Шрамко // – Р. 987–998. – DOI 10.20295/1815-588X-2023-4-987-998.
- 11 Experimental research of energetic efficiency of electric locomotive asynchronous traction Ddrive at changing load/ A. A. Zarifyan, P. G. Kolpakhchyan // Bulletin of scientific research results. – 2023. – No. 1. – P. 77–92. – DOI 10.20295/2223-9987-2023-1-77-92.
- 12 Modes of the electric traction network in the operation of VL80p and UTY-1 electric locomotives/ A. T. Burkov, M. M. Mirmaitov // Proceedings of Petersburg Transport University. – 2016. – Vol. 13, No. 2. – P. 146–160. – ISSN 1815-588X.
- 13 Development of a new energy-saving control algorithm for a RIC electric locomotive based on IGBT modules / D. A. Yagovkin, O. V. Mel'nichenko, A. Yu. Portnoy // Bulletin of the Institute of Traction and Rolling Stock. – 2013. – No. 9. – P. 17–24. – ISBN 978-5-262-00710-3.
- 14 The new rectifier-inverter converter for AC traction rolling stock with the high power characteristics in a traction mode / D. A. Yagovkin, O. V. Mel'nichenko, A. Yu. Portnoy, S. G. Shramko // Science and technology in transport. – 2014. – No. 3 – P. 46–51. – ISSN 2074-9325.
- 15 The structure of the mathematical model of a rectifier-inverter converter on IGBT transistors for an alternating current electric locomotive in traction mode / D. A. Yagovkin, A. Yu. Portnoy, O. V. Mel'nichenko and others// Electric drive in transport and industry : proceedings of the 2nd All-Russian scientific and practical conference, Khabarovsk, September 20–21, 2018. – Khabarovsk : FESTU, 2018. – P. 121–129. – ISBN 978-5-262-00831-5.
- 16 **Yagovkin, D. A.** Improvement of the rectifier-inverter converter of an alternating current electric locomotive and the principle of its control in traction mode 05.22.07 “Railway rolling stock, train traction and electrification” : dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Yagovkin Dmitry Andreevich; Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University. – Irkutsk, 2016. – 162 p.
- 17 Experimental stand for studying the processes of operation of thyristor and transistor rectifier-inverter converters of an alternating current electric locomotive in traction mode in higher control zones / D. A. Yagovkin, O. V. Mel'nichenko, A. Yu. Portnoy, S. G. Shramko // Bulletin of Irkutsk State

Вестник ИрГТУ. – 2014. – № 11 (94). – С. 251–259. – ISSN 1814-3520.

18 Выпрямительно-инверторный преобразователь электровоза на базе IGBT-транзисторов как способ повышения пропускной способности участков железной дороги / В. Н. Знаенок, А. О. Линьков, О. В. Мельниченко // Известия Транссиба. – 2021. – №. 1 (45). – С. 66–75. – ISSN 2220-4245.

19 **Мельниченко, О. В.** Повышение энергетической эффективности тяговых электроприводов электровозов переменного тока : 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Мельниченко Олег Валерьевич ; Дальневосточный государственный университет путей сообщения. – Хабаровск, 2015. – 392 с.

20 Разработка способа разнесенного управления транзисторными тяговыми преобразователями электровоза на первой зоне регулирования выпрямленного напряжения / П. В. Григоренко, О. В. Мельниченко, А. Ю. Портной, А. С. Самойлова // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2024. – Т. 21, № 1. – С. 252–264. – DOI 10.20295/1815-588X-2024-01-252-264.

21 **Григоренко, П. В.** Увеличение пропускной способности железных дорог при повышении коэффициента мощности электровозов и качества электроэнергии тяговой сети / П. В. Григоренко, О. В. Мельниченко, А. С. Самойлова // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2024. – Т. 1. – С. 91–96. – ISBN 978-5-262-00975-6.

22 **Григоренко, П. В.** Повышение энергоэффективности электровозов переменного тока для увеличения пропускной способности железных дорог Восточного полигона / П. В. Григоренко, А. С. Самойлова // Молодежная наука : Труды XXVIII Всероссийской студенческой научно-практической конференции, Красноярск, 25 апреля 2024 года. – Красноярск : ФГБОУ ВО ИрГУПС, 2024. – С. 100–105. – ISBN 978-5-907865-01-3.

23 Повышение качества электроэнергии на токо-приемнике электровоза переменного тока с транзисторными выпрямительно-инверторными преобразователями в режиме тяги / П. В. Григоренко, О. В. Мельниченко, А. Ю. Портной, А. С. Самойлова // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4 (64). – С. 42–54. – DOI 10.20291/2079-0392-2024-4-42-54.

Transport University. – 2014. – No. 11 (94). – P. 251–259. – ISSN 1814-3520.

18 Rectifier-inverter converter of an electric locomotive based on IGBT-transistors as a way to increase the capacity A. O. Linkov, O. V. Mel'nichenko of railway sections / V. N. Znaenok, O. V. Mel'nichenko // Izvestiya Transsiba. – 2021. – No. 1 (45). – P. 66–75. – ISSN 2220-4245.

19 **Melnichenko, O. V.** Improving the energy efficiency of traction electric drives of alternating current electric locomotives :05.09.03 “Electrotechnical Complexes and Systems” : dissertation for the degree of doctor of engineering sciences / Mel'nichenko Oleg Valerievich ; Far Eastern State Transport University. – Khabarovsk, 2015. – 392 p.

20 Development of a method for spaced control of transistor traction converters of an electric locomotive in the first rectified voltage regulation zone / P. V. Grigorenko, O. V. Mel'nichenko, A. Yu. Portnoy, A. S. Samoilova // Proceedings of Petersburg Transport University. – 2024. – Vol. 21, No. 1. – P. 252–264. – DOI 10.20295/1815-588X-2024-01-252-264.

21 **Grigorenko, P. V.** Increasing the capacity of railways by an increase in the power factor of electric locomotives and the quality of electricity in the traction network / P. V. Grigorenko, O. V. Mel'nichenko, A. S. Samoilova // Scientific, technical and economic cooperation between Asia-Pacific countries in the 21st century. – 2024. – Vol. 1. – P. 91–96. – ISBN 978-5-262-00975-6.

22 **Grigorenko, P. V.** Improving the energy efficiency of AC electric locomotives to increase the capacity of the railways of the Eastern polygon / P. V. Grigorenko, A. S. Samoilova // Youth Science : Proceedings of the XXVIII All-Russian student scientific and practical conference, Krasnoyarsk, April 25, 2024. – Krasnoyarsk : ISTU, 2024. – P. 100–105. – ISBN 978-5-907865-01-3.

23 Improving the quality of electricity at current collector of an alternating current electric locomotive with transistor rectifier-inverter converters in traction mode / P. V. Grigorenko, O. V. Mel'nichenko, A. Yu. Portnoy, A. S. Samoilova // Herald of the Ural State University of Railway Transport. – 2024. – No. 4 (64) – P. 42–54. – DOI 10.20291/2079-0392-2024-4-42-54.

P. V. Grigorenko, O. V. Mel'nicenko, A. Yu. Portnoy, A. S. Samoilova

IMPROVING THE POWER QUALITY ON THE PANTOGRAPH OF A MODERN DOMESTIC ALTERNATING CURRENT ELECTRIC LOCOMOTIVE WITH A COLLECTOR DRIVE

Abstract. The article discusses the problems of high consumption of electricity from the traction network by modern domestic AC electric locomotives with collector drive and low power quality on their pantographs. It was found out that these problems are caused by the presence of reactive power in the contact network, consumed by electric locomotives in almost equal proportions with the active one, and significant distortions of voltage and current. A new method for controlling the arms of rectifier-inverter converters based on IGBT transistors is proposed, which makes it possible to increase the power factor of a modern domestic AC electric locomotive with a collector drive to 0.99 and reduce the coefficients of the harmonic components of voltage and current on its current collector to 4 % and 10 %, respectively. The proposed method will significantly improve the efficiency of driving trains using the "Virtual Coupling" technology.

Keywords: power quality, power factor, energy efficiency, alternating current electric locomotive, rectifier-inverter converter, IGBT transistors, collector drive, Virtual Coupling technology.

For citation: Improving the power quality on the pantograph of a modern domestic alternating current electric locomotive with a collector drive / P. V. Grigorenko, O. V. Mel'nicenko, A. Yu. Portnoy, A. S. Samoilova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 2. – P. 114–125. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_2_114.

Сведения об авторах

Григоренко Павел Владимирович

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), кафедра «Электроподвижной состав», аспирант, e-mail: grigorenko.pv@mail.ru

Мельниченко Олег Валерьевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), кафедра «Электроподвижной состав», доктор технических наук, профессор, e-mail: olegmelnval@mail.ru

Портной Александр Юрьевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), кафедра «Физика, механика и приборостроение», доктор физико-математических наук, доцент, e-mail: portnoy_alexander@mail.ru

Самойлова Анастасия Сергеевна

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), кафедра «Электроподвижной состав», аспирант, e-mail: a.s.samoilova@mail.ru

Information about the authors

Grigorenko Pavel Vladimirovich

Irkutsk State Transport University (ISTU), Chair “Electric Rolling Stock”, Postgraduate Student, e-mail: grigorenko.pv@mail.ru

Mel'nicenko Oleg Valerievich

Irkutsk State Transport University (ISTU), Chair “Electric Rolling Stock”, Doctor of Engineering Sciences, Professor, e-mail: olegmelnval@mail.ru

Portnoy Alexander Yurievich

Irkutsk State Transport University (ISTU), Chair “Physics, Mechanics and Instrument Engineering”, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, e-mail: portnoy_alexander@mail.ru

Samoilova Anastasia Sergeevna

Irkutsk State Transport University (ISTU), Chair “Electric Rolling Stoc”, Postgraduate Student, e-mail: a.s.samoilova@mail.ru