

ПРИМЕНЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО КАРЬЕРНОГО ТРАНСПОРТА

А. А. Степанов¹, И. И. Сингизин¹, Р. Н. Латышев¹

¹ Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

Аннотация: Показаны пути повышения энергетической эффективности тяговых преобразовательных подстанций (ТПП) в сетях питания контактных электровозов горных и шахтных (рудничных) предприятий. Отмечены причины снижения питающего напряжения на выходе ТПП в сетях питания энергетического оборудования горных предприятий, шахтных (рудничных) контактных электровозов, что приводит к потерям напряжения в наиболее отдаленных пунктах контактной сети. Приведены основные способы стабилизации питающего напряжения на выходе тяговых преобразовательных подстанций в сетях питания энергетического оборудования горных предприятий, шахтных (рудничных) контактных электровозов. Результаты проведенных имитационных испытаний выпрямителей позволяют провести сопоставительную оценку их энергоэффективности и оптимального подбора схемотехнического решения. Установлено, что мощность потерь на тяговых преобразовательных подстанциях (ТПП) горных и шахтных предприятий характеризуется также степенью искажения форм кривой выпрямленного тока и напряжения. Полученные результаты исследований энергетических характеристик шести- и двенадцатипульсовых выпрямителей могут быть использованы в дальнейшем при создании эффективных схемотехнических решений для проектирования новых, а также модернизации существующих ТПП, питающих наземные и шахтные электровозы горнорудных предприятий.

Ключевые слова: пульсации напряжения, вентиль, вентильная схема, многофазный выпрямитель, трансформатор, тяговая подстанция, гармоники, КПД, внешняя характеристика.

Для цитирования: Степанов А. А., Сингизин И. И., Латышев Р. Н. Применение энергоэффективных выпрямителей тяговых подстанций железнодорожного карьерного транспорта // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 10-1. – С. 156–176. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_101_0_156.

Application of energy-efficient rectifiers of traction substations of railway quarry transport

A. A. Stepanov¹, I. I. Singizhin¹, R. N. Latyshev¹

¹ Novosibirsk State Technical University, K. Marx Ave., 20, Novosibirsk, 630073, Russia

Abstract: Shows ways to increase the energy efficiency of traction transformative substations (CCIs) in the power supply networks of contact electric locomotives of mountain and mine (mine) enterprises. It was noted that the reasons for reducing the supply voltage at the output of CCI in the power supply networks of energy equipment of mining enterprises, mine (mine) contact electric locomotives. Which leads to voltage loss at the most remote points of the contact network. The main ways to stabilize the supply voltage at the output of traction transformative substations in the power supply networks of energy equipment of mining enterprises, mine (ore) contact electric locomotives. The results of the simulation tests of rectifiers allow us to compare their energy efficiency and the optimal selection of a schematic solution. It was established that the power of losses at traction transformative substations (CCIs) of mountain and mine enterprises is also characterized by the degree of distortion of the forms of the rectified current and voltage curve. The obtained results of studies of the energy characteristics of 6 and 12 pulse rectifiers can be used in the future when creating effective schematic solutions of uncontrollable rectifiers to design new ones, as well as the modernization of existing, CCA feeding ground and mine electric locomotives of eaterings.

Key words: voltage pulsations, valve, valve circuit, multiphase rectifier, transformer, traction substation, harmonics, efficiency, external characteristics.

For citation: Stepanov A. A., Singizin I. I., Latyshev R. N. Application of energy-efficient rectifiers of traction substations of railway quarry transport. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(10-1):156–176. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_101_0_156.

1. Введение

Для достижения устойчивого развития экономики страны необходимо увеличить объемы добычи руд черных и цветных металлов, угля, строительных материалов и других видов минерального сырья. Это можно сделать путем применения новых геотехнологий большой единичной мощности, учитывая постоянное усложнение и ухудшение горнотехнических и горно-геологических условий разработки месторождений полезных ископаемых, особенно при увеличении глубины карьеров. Важно также разработать и внедрить новое электрооборудование и энергетические системы [1, 2].

Главная составляющая энергосберегающих мероприятий развития энергетической стратегии России заключается в уменьшении потерь электроэнергии и повышении энергоэффективности. Добыча полезных ископаемых является развивающейся и одновременно одной из энергоемких отраслей экономики, требующей разработки новых

и совершенствования существующих систем электроснабжения, позволяющих повысить энергоэффективность при использовании высокотехнологичных электропотребителей, работающих на переменном и на постоянном токе [3, 4]. В настоящее время на горнорудных предприятиях используется оборудование, питаемое постоянным током. Электрический транспорт горно-шахтных предприятий является основным потребителем постоянного тока. Большое влияние на качество потребления электроэнергии оказывают выпрямительные устройства тяговых преобразовательных подстанций (ТПП), где происходят потери электроэнергии, обусловленные порядком преобразования в постоянный ток трехфазного переменного напряжения. Поэтому повышение энергоэффективности выпрямительных устройств ТПП в сетях питания энергетического оборудования горных и шахтных (рудничных) предприятий является своевременным и злободневным.

Широкое распространение неуправляемых выпрямителей по сравнению с управляемыми на ТПП, шахтных предприятиях обусловлено тем, что они позволяют оставить значительным коэффициент мощности, при этом существенно снижают значения высших гармонических составляющих, оказывающих вредное влияние на линии связи и систем управления. Современные выпрямительные устройства ТПП, преобразующие трехфазный переменный ток в постоянный, широко используются в сетях энергетического оборудования горных предприятий, для питания мощных карьерных электровозов, шахтных (рудничных) контактных электровозов, электрических подъемников и др. Основу указанных выпрямительных устройств ТПП в основном составляют зарекомендовавшие себя и длительно используемые неуправляемые трехфазные мостовые выпрямители (схема Ларионова) [4, 5]. На длинных железнодорожных путях с большим количеством мощных электровозов используют стационарные трансформаторные подстанции (ТПП), а на удаленных участках контактной сети применяют передвижные подстанции. В стационарных ТПП для выпрямления переменного тока в постоянный ток используются установки выпрямительные УВКП-1, оснащенные кремниевыми вентилями ВК-200-4 и другими аналогичными устройствами. Установки УВКП-1 снабжаются трансформаторными преобразователями ТМРУ-6200/35 и ТМРУ-3500/35. Кроме того, используют установки УВКЭ+1, которые выпрямляют ток до 200 А (напряжение 1650 В), а также ПВЭ-3М и ПВЭ-5А, которые работают с токами 3000 и 9000 А и напряжением 3300 В. Все эти выпрямительные агрегаты сопровождаются мощными силовыми трансформаторами, такими,

как ТДН-40000/110, ТМН-16000/100, ТМН-6300/110, ТДН-10000/110, ТДН-16000/110, ТДН-25000/110, ТДН-32000/110. На шахтных (рудничных) предприятиях для питания контактных электровозов в комплекс откатки входят выпрямительные устройства ТПП, преобразующие трехфазный переменный ток шахтной сети в постоянный ток напряжением 250 или 600 В. На отечественных шахтах используется автоматизированная тяговая преобразовательная установка рудничная модификаций АТПУ-250, АТПУ-500, АТПУ-1250, АТПУ-550.257У, в составе которых используется также неуправляемые трехфазные мостовые выпрямители Ларионова, предназначенные для приема электроэнергии переменного тока напряжением 230 В, 460 В и преобразования в напряжение постоянного тока 275 В, 600 В соответственно для питания контактных сетей шахт, рудников и разрезов, не опасных по взрыву газа и пыли. Выпрямительные устройства ТПП электрического транспорта являются нелинейными элементами. Выпрямленное напряжение делится на два компонента: постоянный и переменный. Переменная составляющая включает в себя ряд гармонических колебаний, и их частота зависит от конкретной схемы выпрямления [1, 6]. Так, у шестипульсовых мостовых выпрямителей, используемых в ТПП горных и шахтных (рудничных) предприятий, выполненных по схеме Ларионова, переменная составляющая тока определяется как 12–16 % от величины постоянной составляющей, что оказывает влияние на выпрямленное напряжение, подаваемое в тяговую сеть, кроме того, вызывает искажение тока в сети внешнего электроснабжения. Возникающие в выпрямителях гармонические составляющие токов и напряжений вызывают ухудшение энергетических характе-

ристик тяговых подстанций, приводя к снижению коэффициента мощности, коэффициента полезного действия (КПД), и ухудшение внешней (нагрузочной) характеристики [7]. ТПП, оборудованные шестипульсовыми выпрямительными схемными решениями, имеют низкий уровень преобразования электрической энергии при ее высоких потерях в процессе преобразования переменного напряжения в постоянное [8]. Гармонические составляющие этого выпрямителя вызывают потери в силовых цепях и цепях управления для систем телеуправления, телесигнализации, телефонной, громкоговорящей, высокочастотной и радиосвязи. Для уменьшения этого негативного влияния на тяговых подстанциях, преобразующих переменный ток в постоянный, устанавливают специальные аппараты для уменьшения помех, вызванных выпрямительной аппаратурой. К ним относятся сглаживающие устройства для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения. Эти устройства предназначены, прежде всего, для снижения воздействия колебаний постоянного тока, возникающих в результате работы выпрямителя, на параллельно проходящие линии связи и системы управления, сопряженные с контактной сетью электровозов и железнодорожными магистралями [9, 10].

Эти негативные явления, возникающие в шестипульсовых выпрямителях ТПП горных и шахтных (рудничных) предприятий, снижают качество электрической энергии и вызывают дополнительные потери энергии, уменьшая пропускную способность электрических сетей, что приводит к сокращению срока службы электрооборудования, электрических машин, конденсаторных установок и т. д. [10].

На ТП постоянного тока ГЭТ, метрополитена, железнодорожного

транспорта шестипульсовые выпрямительные устройства перестали быть актуальными из-за их низкой энергоэффективности, они были почти все (более 80 %) заменены на перспективные многопульсовые выпрямители с частотой пульсации 12 и более. Аналогично такая ситуация стала злободневной и для шестипульсовых выпрямителей горных, шахтных (рудничных) предприятий. Таким образом, стало необходимо путем совершенствования выпрямителей переменного тока в постоянный повысить энергетическую эффективность ТПП. Для уменьшения гармоник в питающей сети и выпрямленном токе можно рассматривать в первую очередь применение многопульсовых выпрямителей с числом пульсаций более шести, поскольку для осуществления этого не требуется дополнительных капитальных затрат, напротив, ведет к их снижению, так как упрощаются сглаживающие фильтры, следовательно снижается их стоимость и массогабаритные показатели [11].

С увеличением частоты пульсаций в выпрямительных агрегатах (ВА) снижается уровень высших гармоник, вызывающих помехи в линиях связи и управления, и ухудшается качество электроэнергии питающих сетей, тем самым снижаются потери энергии при выпрямлении переменного тока в постоянный на ТПП. Из данного утверждения можно сделать вывод о том, что построение выпрямителей с большими токовыми нагрузками и низким выпрямленным напряжением с частотой пульсаций, начиная с 18, 20, 24 и более, является технологически сложным процессом, требующим увеличения количества вентилялей и усложнения технологии изготовления вентильных обмоток (ВО) и трансформаторного оборудования. Это может привести к увеличению затрат

на производство и эксплуатацию таких выпрямителей, что не позволяет рекомендовать их для практического применения [12].

Широкое распространение на ТП, преобразующих в постоянный переменный ток метрополитена, городского электрического транспорта (ГЭТ) и железнодорожного транспорта, получили неуправляемые двенадцатипульсовые выпрямительные устройства, обладающие приоритетным достоинством энергетических характеристик в сравнении с шестипульсовыми [8, 11]. В статье исследуется вопрос возможности повышения энергетической эффективности ТПП горно-рудничного комплекса при замене шестипульсовых выпрямителей на двенадцатипульсовые. Для решения этого вопроса возникает необходимость проведения сравнительного анализа шестипульсового мостового выпрямителя с двенадцатипульсовыми кольцевым и мостовым схмотехническими решениями, выполнения расчета энергетических показателей на математических моделях и построения энергетических характеристик для оценки энергоэффективности ТПП для систем электропитания постоянного тока горных и шахтных (рудничных) предприятий [12, 13].

Целью настоящей статьи является исследование энергетических характеристик шести- и двенадцатипульсовых выпрямительных агрегатов для выявления аспектов, повышающих энергетическую эффективность ТПП горно-рудничного комплекса. Во введении представлена актуальность снижения потерь электроэнергии на горных и шахтных (рудничных) предприятиях путем повышения энергоэффективности выпрямительных устройств ТПП в сетях питания энергетического оборудования горно-рудничного комплекса.

В разделе 2 проведен анализ схмотехнических решений выпрямительных устройств ТПП. Разделы 3, 4 и 5 посвящены исследованию основных энергетических характеристик (внешней характеристики, коэффициента мощности и КПД) на математических моделях. В разделе 6 проведен анализ результатов исследования основных энергетических характеристик выпрямительных устройств ТПП. В разделе 7 сделан вывод о возможности снижения потерь электроэнергии и повышения качества электроэнергии.

2. Анализ схмотехнических решений

Эффективным методом повышения частоты пульсаций выпрямителя является использование преобразовательных трансформаторов с расщепленными вторичными обмотками. Например, преобразовательный трансформатор мостового выпрямителя по схеме Ларионова (рис.1, а) можно модернизировать, т. е. вторичную обмотку расщепить на две части, которые можно соединить в звезду и треугольник, что позволяет создать две трехфазные системы напряжений со сдвигом фаз между ними в 30 электрических градусов (эл. град). Применение таких преобразовательных трансформаторов позволяет создать различные многопульсовые ВА и является основой для интегрирования двенадцатипульсовых мостовых и кольцевых схем выпрямления [12, 13].

Шестипульсовая мостовая выпрямительная схема Ларионова является базисом для интеграции двенадцатипульсовых мостовых схем выпрямления [14], где две шестипульсовые схемы могут быть соединены по выходу либо последовательно (рис. 1, б), либо параллельно (рис. 2, а). Такие мостовые схемы, включая кольцевую схему выпрямле-

ния (рис. 2, б), могут быть базовыми для выпрямительных устройств ТПП горных и шахтных (рудничных) предприятий, учитывая, что они себя зарекомендовали на практике [1, 15, 16]. В табл. 1 отображены основные расчетные данные этих схемотехнических решений выпрямителей. Анализ схем, представленных на рис. 1, рис. 2, и основных расчетных соотношений, приведенных в табл. 1, позволяет провести их сравнение и выявить их основные достоинства и недостатки, что дает возможность в установлении приоритета для использования одного из схемных решений в качестве выпрямителя в ТПП горно-рудничного комплекса [17, 18].

Основное достоинство шестипульсового мостового выпрямителя схемы Ларионова [18], представленного на (рис. 1, а), — прежде всего, простота исполнения трансформатора, одна фазная (вентильная) обмотка, шесть выпрямительных вентиляей, а в цепи выпрямленного тока принимают участие только два вентиля. Недостаток — достаточно высокий коэффициент пульсаций (K_n) 0,057, приводящий к появлению 5, 7, 9-ой гармоник, обладающих наибольшей искажающей способностью выпрямленного напряжения и тока, что снижает энергетические характеристики выпрямителя [19, 20].

К основным достоинствам двенадцатипульсовой схемы, представленной

Таблица 1
Основные расчётные соотношения схем выпрямления
Basic calculation relations of straightening schemes

Схемы выпрямления	Параметры									
	трансформатора				вентилей				пульсаций	
	$\frac{U_2}{U_0}$	$\frac{I_2}{I_0}$	$\frac{I_1}{I_0}$	$\frac{P_T}{P_0}$	$\frac{U_{обр\max}}{U_0}$	$\frac{I_a}{I_0}$	$\frac{I_{a\max}}{I_0}$	N_B	mq	K_n
трёхфазная мостовая	0,427	0,817	0,817	1,045	1,05	0,333	1,0	2	6	0,057
двенадцатипульсовая параллельная	0,427	0,41	0,789	1,027 + УР	1,045	0,167	0,5	2	12	0,014
двенадцатипульсовая последовательная	0,214	0,816	1,578	1,027	0,523	0,333	1,0	4	12	0,014
двенадцатипульсовая кольцевая	0,214	0,816	1,576	1,027	1,013	0,228	0,5	3	12	0,014

Примечание: U_2/U_0 — напряжение вентильной обмотки; I_2/I_0 — ток вентильной обмотки; I_1/I_0 — ток сетевой обмотки; P_T/P_0 — типовая мощность; $U_{обр\max}/U_0$ — обратное напряжение; I_a/I_0 — анодный ток вентиля; $I_{a\max}/I_0$ — амплитуда анодного тока; N_B — число вентиляей в цепи выпрямленного тока; mq — пульсность; K_n — коэффициент пульсаций.

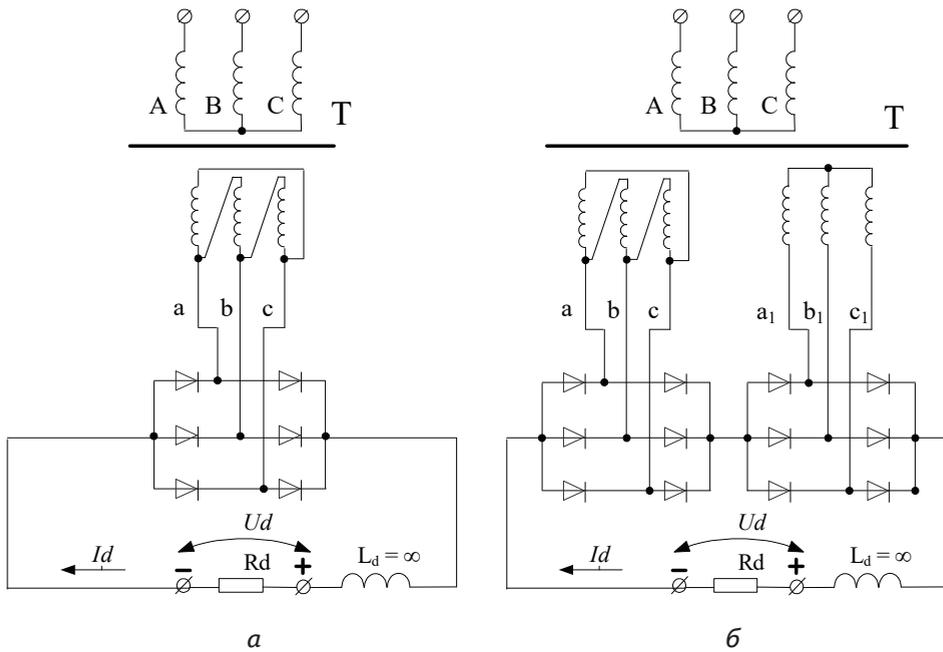


Рис. 1. Схемы выпрямительные: а – шестипульсовая мостовая (Ларионова); б – двенадцатипульсовая с последовательным соединением двух мостовых выпрямителей
 Fig. 1. Rectifier circuits: а – six-pulse bridge (Larionov); б – twelve-pulse with a series connection of two bridge rectifiers

на (рис. 1, б), на основе двух мостовых выпрямителей, соединенных последовательно, относится снижение коэффициента пульсаций с 0,057 до 0,014, что ведет к исчезновению 5, 7, 9-ой гармоник. Недостаток – увеличение потерь мощности на вентилях вдвое по отношению к шестипульсовой схеме, так как в цепи выпрямленного тока нагрузки имеются четыре, а не два вентиля.

На рис. 1 U_d – выпрямленное напряжение; I_d – выпрямленный ток; R_d – активное сопротивление нагрузки; L_d – индуктивное сопротивление.

12-пульсовая схема с параллельным соединением двух мостовых выпрямителей с уравнивающим реактором (УР) [17], изображенная на рис. 2, а, имеет

- положительные стороны:
 - значительно снижен коэффициент пульсаций – с 0,057 до 0,014;
 - отсутствуют 5, 7, 9-я гармоники;

- выпрямленный ток вдвое больше, чем у двенадцатипульсовой схемы последовательного типа;

- число вентилях в цепи тока нагрузки в два раза меньше, чем у двенадцатипульсовой схемы последовательного типа [9];

- отрицательные стороны:

- появление добавочных потерь мощности на уравнительном реакторе (УР);

- повышение суммарной установленной мощности преобразовательного трансформатора с появлением УР в пределах (7–12 %);

- возникновение дополнительных расходов электротехнических материалов на изготовление, установку и монтаж УР;

- неравномерности питающих напряжений трехфазных мостов в выпрямительных секциях, соединенных парал-

лельно, увеличивают гармонический состав выпрямленного тока [11].

12-пульсовая кольцевая схема с двумя питающими трехфазными системами, представленная на рис. 2, б, имеет

- положительные стороны:
 - снижен коэффициент пульсаций с 0,057 до 0,014;
 - отсутствуют 5, 7, 9-я гармоники;
 - неравномерность питающего напряжения трехфазных систем не вызывает увеличения уровня гармонического состава выпрямленного тока [12, 13];

- отрицательную сторону:
 - незначительно увеличиваются потери мощности в вентилях, так как в цепи тока нагрузки три вентиля, а у шестипульсовой схемы два.

Проведенный анализ схемотехнических решений дает общую картину об эксплуатационных свойствах выпрямительных устройств тяговых подстанций [7]. Для получения детальной

картины необходимо провести расчет основных энергетических показателей выпрямителей [9], которые определяют энергетическую эффективность ТПП систем электроснабжения постоянного тока горно-рудничных комплексов [1, 10, 11]:

- коэффициента мощности χ ;
- внешней характеристики $U_d = f(I_d)$;
- коэффициента полезного действия η ;
- энергетического коэффициента полезного действия $\eta_{\text{э}}$.

Для исследования различных типов выпрямителей с помощью математических моделей в силу общности законов коммутации применима теоретическая база, развитая в фундаментальных трудах [1, 8, 9], посвященных выпрямлению трехфазных токов, и в работах, где изучены многопульсовые мостовые и кольцевые выпрямители [7, 9, 11, 13]. Элементы расчетов прикладного значения для выпрямителей тяговых подстанций нашли развитие в [8, 10, 13].

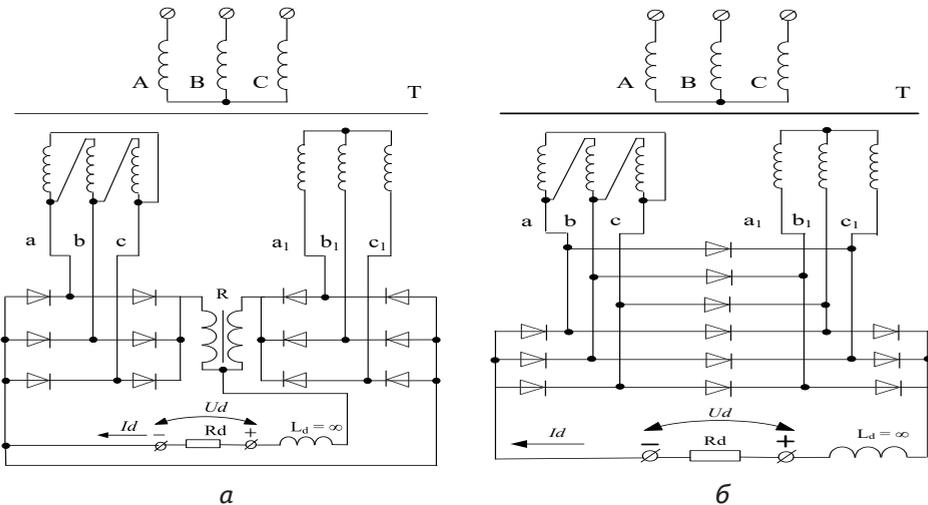


Рис. 2. Схемы выпрямительные: а – двенадцатипульсовая с параллельным соединением двух мостовых выпрямителей; б – двенадцатипульсовая кольцевая схема с двумя питающими трехфазными системами

Fig. 2. Rectifier circuits: a – twelve-pulse with parallel connection of two bridge rectifiers; b – twelve-pulse ring circuit with two three-phase supply systems

3. Анализ внешних характеристик по математической модели выпрямительных агрегатов

Внешняя (нагрузочная) характеристика (ВХ) выпрямителя выражает зависимость U_d (среднего значения напряжения нагрузки) от I_d (тока нагрузки), т. е. $U_d = f(I_d)$ при постоянном (заданном) значении α — угла регулирования. Выражение внешней характеристики выпрямителя имеет вид

$$U_d = U_{d0} \cos \alpha - \Delta U_X - \Delta U_\phi - \Delta U_T - \Delta U_B \quad (1)$$

В выражении (1) учтены следующие падения напряжения при протекании тока нагрузки I_d :

- ΔP_T — суммарные потери в трансформаторном оборудовании;
- ΔP_ϕ — потери мощности в реакторах сглаживающего фильтра;
- ΔP_B — потери в вентилях выпрямителя;
- ΔU_X — индуктивное падение напряжения, вызванное явлением коммутации.

Превалирующее значение индуктивного сопротивления предопределяет наклон внешней характеристики, которая характеризуется потерями напряжения в индуктивном сопротивлении $\Delta U_X = X_\gamma I_d$. Эти потери обусловлены процессами коммутации вентильных токов и зависят от угла коммутации. Угол коммутации связан с индуктивным сопротивлением коммутации

$$X_\gamma = \frac{u_k}{I_{dНОМ}}, \text{ известным, например,}$$

из [11].

Значение угла коммутации для любой $m\alpha$ -пульсовой (m — количество фаз; α — количество тактов выпрямителя) схемы выпрямления согласно [1]:

$$\gamma_{m\alpha} = \arccos \left(1 - 2 u_k \cdot k_3 \cdot \sin \frac{\pi}{m\alpha} \right) \quad (2)$$

где u_k — расчетное напряжение короткого замыкания, приведенное к параметрам вентильной обмотки; k_3 — коэффициент загрузки, равный отношению тока нагрузки I_d к номинальному выпрямленному току $I_{dНОМ}$.

Общее уравнение внешней характеристики для многопульсовых выпрямителей в функции от коэффициента загрузки [9, 11]:

$$U_d = U_{d0} \left(1 - 2 u_k \cdot k_3 \cdot \sin \frac{\pi}{m\alpha} \right), \quad (3)$$

где $k_3 = I_d / I_{dНОМ}$ — коэффициент загрузки.

Проведен расчет внешних характеристик (ВХ) исследуемых моделей выпрямителей, для обеспечения равенства условий исследования были заданы одинаковые значения для k_3 и $u_k = 0,1$, диаграммы которых показаны на рис. 3.

На рис. 3 введены следующие обозначения: 1 — ВХ шестипульсового мостового выпрямителя; 2 — ВХ двенадцатипульсовой схемы выпрямления с параллельным соединением двух

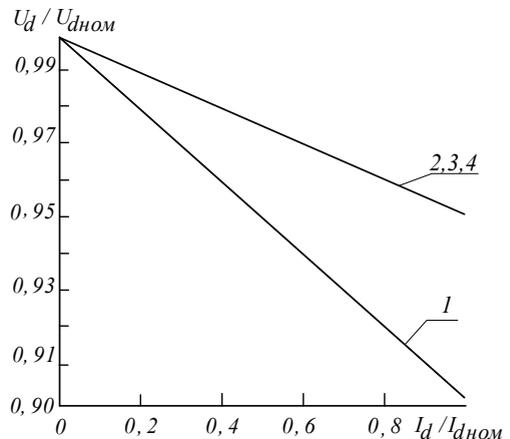


Рис. 3. Нормированные внешние характеристики шести- и двенадцатипульсовых выпрямителей

Fig. 3. Normalized external characteristics of 6 and 12 pulse rectifiers

мостовых выпрямителей с УР; 3 — ВХ двенадцатипульсовой схемы с последовательным соединением двух мостовых выпрямителей; 4 — ВХ двенадцатипульсовой схемы (кольцевой выпрямитель с двумя питающими трехфазными системами). Полученные кривые ВХ двенадцатипульсовых мостовых и кольцевого выпрямителей не имеют расхождений, поэтому для иллюстративности эти графики на рис. 3 представлены одной прямой.

Результаты расчета, представленные кривыми на рис. 3, показывают, что внешние характеристики двенадцатипульсовых выпрямителей более пологи (жестче) чем у шестипульсового выпрямительного оборудования. Это свидетельствует о стабильности выпрямленного напряжения, так, при увеличении тока нагрузки I_d к номинальному выпрямленному току $I_{dНОМ}$ выпрямленное напряжение U_d снижается у двенадцатипульсового выпрямителя на 5% от $U_{dНОМ}$, а у шестипульсового — на 10%. Можно сказать, что двенадцатипульсовые выпрямители обладают лучшей нагрузочной способностью.

4. Анализ коэффициентов мощности по математическим моделям выпрямительных агрегатов

Коэффициент мощности — наиболее значимая характеристика выпрямительного устройства. Под коэффициентом мощности принято понимать

отношение активной мощности к полной $\chi = P_1 / S$. Повышение пульсности выпрямителя, сопровождаемое увеличением коэффициента мощности, позволяет значительно снизить потребляемую реактивную мощность. Как отмечено в [11], при шестипульсовой схеме выпрямления коэффициент мощности равен 0,88...0,91. При этом выпрямитель потребляет реактивную мощность, примерно равную половине преобразуемой. Переход к двенадцатипульсовым схемам выпрямления обеспечил увеличение коэффициента мощности до значений 0,97...0,98, при которых потребление реактивной мощности снизилось до 17...20 % от переработанной активной [12, 13]. Актуальность решения проблемы снижения реактивной мощности в преобразовательном процессе напрямую связана с повышением пульсности преобразователя, а значит, со снижением гармонических искажений потребляемого тока и, соответственно, снижением уровня эмиссии в сеть гармоник тока потребителя [1, 8, 15].

Коэффициент мощности χ выпрямительного устройства в общем случае определяется по формуле

$$\chi = \frac{P_{(1)}}{S} = \frac{E_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_{(1)}}{E \cdot I} = v_1 \cdot \cos \varphi_{(1)} \quad (4)$$

Коэффициент искажения v_1 формы тока (коэффициент формы), характеризующий степень искажения формы потребляемого тока, определяется по формуле:

$$K_H = v_1 = \frac{v_1 \cdot \left(1 - k_3 \cdot u_k \cdot \sin \frac{\pi}{mq} \right)}{\cos \left(\frac{2 \cdot \gamma_{mq}}{3} \right) \cdot \sqrt{1 - \frac{\gamma_{mq} \cdot mq}{675} \cdot \sin^2 \frac{\pi}{mq}}}, \quad (5)$$

где угол коммутации γ_{mq} вычисляется по формуле:

$$\gamma_{mq} = \arccos \left(1 - 2 u_k \cdot k_3 \cdot \sin \frac{\pi}{mq} \right) \quad (6)$$

Коэффициент сдвига тока, определяемый в общем виде с учетом коммутации вентильных токов, но без учета тока холостого хода при большой мощности трансформатора, вычисляется по формуле:

$$\cos \phi_{(1)} = 1 - k_3 \cdot u_k \cdot \sin \frac{\pi}{mq} . \quad (7)$$

В некоторых случаях, особенно при малых нагрузках, пренебрегать током холостого хода нельзя. При учете тока холостого хода угол сдвига $\phi_{(1)}$ возрастает, и коэффициент сдвига K_C в соответствии с [9, 11] рассчитывается по формуле

$$K_C = \frac{k_3 \cos \phi_{(1)} + k_{XX} \cos \phi_0}{\sqrt{k_3^2 + k_{XX}^2 + k_3 k_{XX} \cos \phi_{(1)} \cos \phi_0 + 2 k_3 k_{XX} \sin \phi_{(1)} \sin \phi_0}} , \quad (8)$$

где k_{XX} – коэффициент холостого хода, равный отношению тока холостого хода трансформатора I_0 к $I_{1(1)НОМ}$; ϕ_0 – угол сдвига между основной гармоникой напряжения и током холостого хода.

Тогда с учетом тока холостого хода получаем:

$$\chi_{mq} = v_{1\gamma} \cdot K_C = K_{II} \cdot K_C . \quad (9)$$

По формулам (4–9), составившим основу математической модели, сделаны расчеты, необходимые при сопоставлении коэффициентов мощности для выпрямителей по предложенным схмотехническим решениям, отображенным на рис. 1 и рис. 2. Результаты расчетов занесены в табл. 2.

По расчетным данным, представленным в табл. 2, построены графические зависимости коэффициента мощности от величины коэффициента загрузки для исследуемых схмотехнических решений и отображены на рис. 4.

На рис. 4 кривая №1 построена для шестипульсового мостового выпрямителя кривая; №2 – для двенадцатипуль-

сового мостового выпрямителя параллельного типа с УР; кривая №3 – для двенадцатипульсового мостового выпрямителя последовательного типа; №4 – для двенадцатипульсового выпрямителя кольцевого типа.

Из-за незначительного расхождения значений коэффициентов K_C , K_{II} , χ_{mq} для сравниваемых двенадцатипульсовых схем выпрямления графики коэффициента мощности под номерами 2, 3, 4 на рис. 4 немного сдвинуты вниз относительно друг друга. Зависимости коэффициента мощности от коэффициента нагрузки для шестипульсового выпрямителя $u_k = 9,5\%$, для двенадцатипульсового $u_k = 6,2\%$ (см. рис. 4). Анализ зависимости коэффициента мощности от тока нагрузки для различных схем выпрямления показывает, что при двенадцатипульсовых схемах выпрямления коэффициент мощности повышается до 0,985 против 0,905–0,945 при шестипульсовых. Коэффициент мощности двенадцатипульсового выпрямителя увеличивается на 0,035 – 0,08 по сравнению с шестипульсовыми схемами. С учётом

Таблица 2

Зависимость коэффициентов сдвига, искажения и мощности от коэффициента загрузки
Ratio of shear, distortion and power to load factor

K_3		0	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0
K_C при m_q	6	0,174	0,978	0,976	0,973	0,964	0,955	0,946
	12	0,1736	0,9852	0,9853	0,9840	0,9801	0,9756	0,9709
K_H при m_q	6	0,955	0,966	0,969	0,971	0,974	0,976	0,978
	12	0,9886	0,9929	0,9938	0,9944	0,9954	0,9962	0,9969
$\frac{\cdot}{m_q}$	6	0,166	0,945	0,945	0,944	0,939	0,932	0,925
	12	0,1716	0,9782	0,9791	0,9785	0,9756	0,9719	0,9679

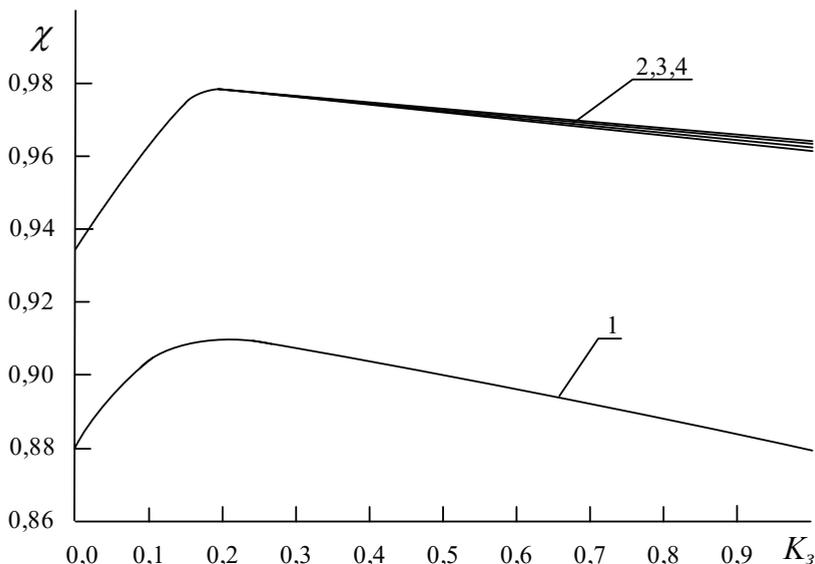


Рис. 4. График зависимости коэффициента мощности от пульсности выпрямителя и коэффициента загрузки: 1 – для шестипульсовой схемы выпрямления, 2, 3, 4 – семейство характеристик для двенадцатипульсовых выпрямителей (мостовые и кольцевая схемы)

Fig. 4. Graph of the power coefficient dependence on the rectifier pulse and the load coefficient: 1 for 6-pulse rectification scheme, 2, 3, 4 for 12-pulse rectifiers (bridge and annular)

тока холостого хода трансформатора и изменения коэффициента искажения формы кривой тока в зависимости от угла коммутации тока построены кривые коэффициента мощности на малых нагрузках (рис. 4). При всех прочих равных условиях в среднем коэффициент мощности двенадцатипульсового выпрямителя выше на 5–6 %, чем у шестипульсового.

5. Анализ коэффициентов полезного действия и энергетических коэффициентов полезного действия по математическим моделям выпрямительных агрегатов

Расчет коэффициентов полезного действия выпрямительных агрегатов

Расчеты выполняются с применением математических моделей по определению КПД тяговых подстанций

горных предприятий для мостовых шестипульсовых, двенадцатипульсовых мостовых и кольцевых схем выпрямления [7, 8]. С целью сопоставления КПД указанных выпрямителей проведены расчеты, в которых использовались исходные данные и технические характеристики выпрямительных установок УВКЭ+1, ПВЭ-3М, ПВЭ-5А, УВКП-1, оснащенных вентилями ВК-200-4 и др. Трансформаторное оборудование: преобразовательные трансформаторы ТМРУ-3500/35, ТМРУ-6200/35 и другие, также трансформаторы понижающих подстанций, например, ТМН-16000/100, ТМН-6300/110 и др. Для ТПП горно-шахтных комплексов использовались технические данные АТПУ-250, АТПУ-500, АТПУ-1250 [15]. Для обеспечения объективности при сравнении выпрямителей использовали идентичное трансформаторное оборудование. Мощность P_d реализуется практически при одинаковых выпрямленных токах. Поэтому расчеты КПД подстанций, оборудованных данными ВА, выполнены в функции тока I_d на стороне выпрямленного напряжения [11, 13].

Тяговая подстанция включает в себя два трансформатора: первый — понижающий (для связующей питающей сети с параметрами ВА); второй — тяговый, являющийся трансформаторным преобразователем числа фаз ВА [11]. С учетом такого состава элементов преобразователя в целом необходимо определить расчетные соотношения для выполнения условий общей формулы, определяющей КПД:

$$\eta = \frac{P_{ВЫХ}}{P_{ВХ}} \quad (10)$$

Пренебрегая потерями мощности в устройствах собственных нужд, в соответствии с [1, 4], КПД тяговой

подстанции рассчитывается по следующей формуле:

$$\eta = P_d \left[P_d + \Delta P_{xx} + \Delta P_{кз} + \Delta P_{\phi} + \Delta P_B \right]^{-1}, \quad (11)$$

где ΔP_{xx} — суммарные потери холостого хода тягового и понизительного трансформаторов; $\Delta P_{кз}$ — потери короткого замыкания с учетом двух трансформаторов; ΔP_{ϕ} — потери в реакторах сглаживающего фильтра; ΔP_B — потери в вентильных схемах.

Потери короткого замыкания [11] представляют собой выражение:

$$\Delta P_{кз} = D^2 \cdot k_H^2 \left(\Delta P_{кзТ} + \frac{S_{НОМТ}^2}{S_{НОМП}^2} \cdot \Delta P_{кзП} \right). \quad (12)$$

В этом выражении коэффициент схемы выпрямления для шестипульсовой схемы $D = 1,351$, для двенадцатипульсовой $D = 2,4465$ [11]; $\Delta P_{кзТ}$ — потери короткого замыкания в тяговых трансформаторах; $\Delta P_{кзП}$ — потери короткого замыкания в понизительных трансформаторах; $S_{НОМТ}$ ($S_{НОМП}$) — номинальные мощности тягового (понижительного) трансформаторов; коэффициент k_H определяется по формуле

$$k_H = \frac{b \cdot K_3}{\sqrt{6} \cdot b - u_K \cdot K_3}, \quad (13)$$

в ней $b = 1,57$ для двенадцатипульсового выпрямителя, а для шестипульсового $b = 0,78$; u_K — напряжение короткого замыкания, определяется из выражения:

$$u_K = u_{КТ} + u_{КП} \cdot \frac{S_{НОМТ}}{S_{НОМП}}, \quad (14)$$

где $u_{КТ}$ — напряжения короткого замыкания тяговых трансформаторов [9, 11]; $u_{КП}$ — напряжения короткого замыкания понизительных трансформаторов [9, 11].

Потери в реакторах сглаживающего фильтра определяются по формуле, приведенной в [9, 11]:

$$\Delta P_{\phi} = R \cdot K_3^2 \cdot \left[\frac{P_{d \text{ ном}}}{U_{d0} \left(1 - \frac{u_K \cdot k_3}{\sqrt{6} \cdot b} \right)} \right]^2, \quad (15)$$

где R — общее сопротивление блоков реактора, для двенадцатипульсовой схемы оно составляет 0,006 Ом, для шестипульсовой схемы — 0,014 Ом; P_{d0} — средняя мощность определяется выражением $P_{d0} = U_{d0} I_{d0 \text{ ном}}$.

К сопротивлению реакторов фильтра для двенадцатипульсовой схемы с параллельным соединением мостов добавляется сопротивление R индуктивного реактора с аналогичной величиной сопротивления [11].

При расчете потерь мощности рассматриваемых выпрямителей необходимо принять во внимание, что мощность трансформаторов одинакова, мощность нагрузки одинакова, и осуществляется в одинаковой степени при тех же токах. Поэтому в ходе анализа сопоставляются исключительно потери мощности в силовых полупроводниковых приборах (СПП) сравниваемых вентильных схем.

На вентилях шести- и двенадцатипульсовых мостовых выпрямителей потери мощности определяются по формуле:

$$\Delta P_B = \frac{p}{3} \cdot s \cdot U_{T0} \cdot I_d + \frac{p \cdot s}{3 \cdot a} \cdot I_d^2 \cdot r_T, \quad (16)$$

потери мощности на вентилях кольцевого выпрямителя — по формуле

$$\Delta P_B = \left(\frac{p}{6} + 1 \right) \cdot s \cdot U_{T0} \cdot I_d + \left(\frac{p}{6} + 1 \right) \cdot \frac{s}{a} \cdot I_d^2 \cdot r_T. \quad (17)$$

Таким образом, выражения (10–17) определяют математическую модель для расчета коэффициента полезного

действия выпрямителей, которые изображены на рис. 1 и рис. 2.

В результате вычислений получена взаимосвязь КПД и K_3 , которая отображена на рис. 5.

Кривая №1 соответствует шестипульсовому мостовому выпрямителю; кривая №2 — двенадцатипульсовому мостовому выпрямителю параллельного типа с УР; кривая №3 — двенадцатипульсовому мостовому выпрямителю последовательного типа; кривая №4 — двенадцатипульсовому выпрямителю кольцевого типа.

Сопоставление графических зависимостей в виде кривых на рис. 5 указывает на больший КПД у двенадцатипульсовых выпрямителей в сравнении с шестипульсовым выпрямительным оборудованием при равных значениях характеристик силового оборудования ТП. Наилучшим показателем обладает двенадцатипульсовый кольцевой выпрямитель, он превышает показатели двенадцатипульсового мостового выпрямителя последовательного типа в среднем на 0,6%, двенадцатипульсового мостового выпрямителя параллельного типа — в среднем на 1%, шестипульсового выпрямителя — примерно на 1,2%. Эти показатели свидетельствуют об уменьшении обобщенных потерь мощности в двенадцатипульсовых выпрямителях. Увеличение КПД вызвано уменьшением числа вентилях в цепи тока нагрузки, а также возрастанием пульсности выпрямителей [7, 11, 13]. За исключением схемного решения с индуктивным реактором, где сокращение числа вентилях в цепи протекания тока не привело к заметному повышению КПД из-за потерь на индуктивном реакторе.

Расчет энергетических КПД выпрямительных агрегатов

Для получения энергетического КПД (χ), дающего комплексную оценку

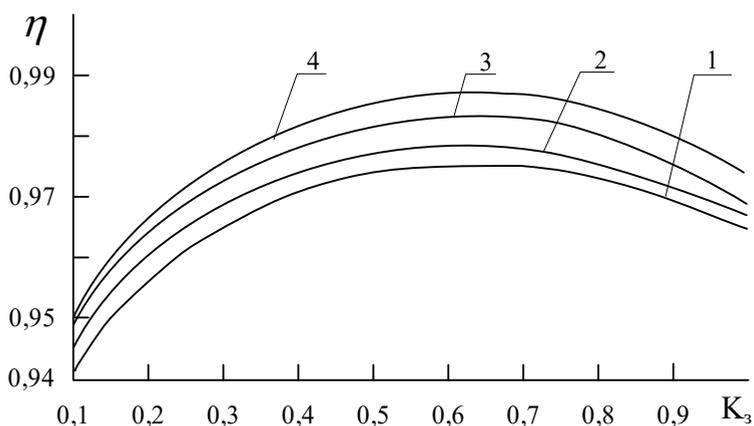


Рис.5. График зависимости КПД от пульсности выпрямителя и коэффициента загрузки
 Fig.5. Graph of efficiency dependence of rectifier and loading coefficient

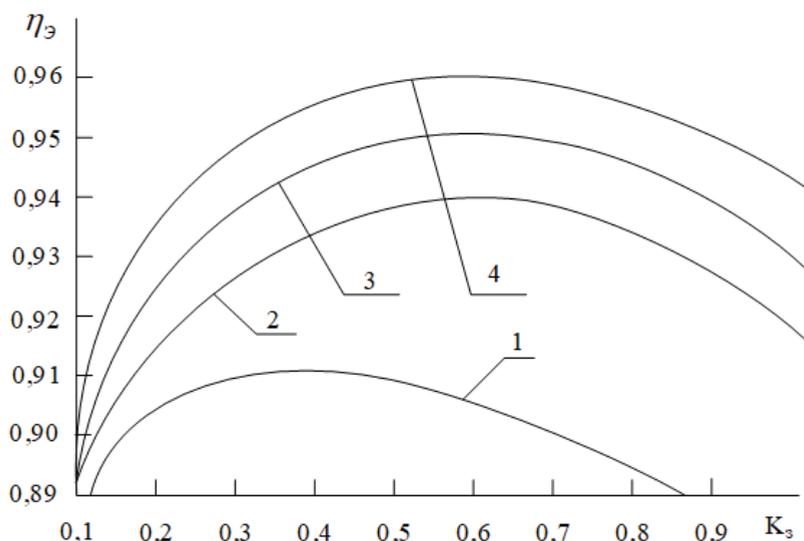


Рис. 6. График зависимости энергетического КПД от пульсности выпрямителя и коэффициента загрузки
 Fig. 6. Graph of Energy Efficiency Dependence on Rectifier Pulsation and Load Factor

КПД выпрямительного агрегата с учетом активных и индуктивных потерь, вызванных процессами коммутации вентильных токов, которые обусловлены углом коммутации.

Индуктивные потери выпрямительных устройств не только наглядно характеризует коэффициент мощности, но и дают количественную оценку, отражающую эти потери в отношении

активной мощности к полной мощности $\chi = P_1 / S$. Характеристикой, которая бы учитывала активные и индуктивные потери мощности, является энергетический КПД, связывающий КПД и коэффициент мощности. Эта зависимость устанавливается следующим выражением [7]:

$$\eta_{\text{э}} = \eta \cdot \chi, \quad (18)$$

где χ — коэффициент мощности; η — коэффициент полезного действия; η_{∂} — энергетический КПД.

Результаты расчетов представлены на рис. 6 в виде графической зависимости энергетического КПД шести- и двенадцатипульсовых преобразователей от коэффициента загрузки: кривая №1 соответствует шестипульсовому мостовому выпрямителю; кривая №2 — двенадцатипульсовому мостовому выпрямителю параллельного типа с УР; кривая №3 — двенадцатипульсовому мостовому выпрямителю последовательного типа; кривая №4 — двенадцатипульсовому кольцевому выпрямителю. Сопоставление зависимостей энергетического КПД от коэффициента загрузки на рис. 6. в виде кривых указывает на значительное превышение η_{∂} у двенадцатипульсовых выпрямителей по сравнению с шестипульсовым выпрямительным оборудованием. Так у шестипульсового выпрямителя наибольшая эффективность проявляется при коэффициенте загрузки в пределах от 0,2 — 0,6, а при максимальных значениях нагрузки (0,85–1,0) η_{∂} является очень низким, и это подтверждается практикой эксплуатации таких выпрямителей в системе тягового электроснабжения на горно-шахтных предприятиях.

Для двенадцатипульсовых выпрямителей η_{∂} в большом диапазоне коэффициента загрузки имеет значения в пределах 0,2–1,0, это хороший показатель. Наилучшим показателем η_{∂} обладает двенадцатипульсовый кольцевой выпрямитель, он превышает показатели двенадцатипульсового мостового выпрямителя последовательного типа в среднем на 1,2%, а двенадцатипульсовый мостовой выпрямитель параллельного типа — в среднем на 2,3%. По отношению к шестипульсовому выпрямителю двенадцатипуль-

совые выпрямители имеют наибольшие значения η_{∂} , зафиксированы превышения у мостового параллельного типа в среднем на 2,9%, у мостового последовательного типа в среднем на 3,8%, а у кольцевого в среднем на 5,2%. Проведенный анализ кривых энергетических КПД выпрямителей на рис. 6 свидетельствует о значительном преимуществе двенадцатипульсовых схем выпрямления над шестипульсовой классической схемой Ларионова, при этом лучшими характеристиками обладает кольцевая схема выпрямления [21].

6. Обсуждение результатов

Проведенный анализ схемотехнических решений и исследования расчетов энергетической эффективности ТПП постоянного тока подтверждают справедливость общности законов коммутации, посвященных выпрямлению трехфазных токов. Элементы расчетов прикладного значения выпрямительных устройств ТП постоянного тока метрополитена, железнодорожного (ЖД) транспорта и ГЭТ нашли развитие в выпрямительном оборудовании ТПП горно-шахтных комплексов [22, 23].

В результате проведенных экспериментальных расчетов на математических моделях и сопоставления результатов двенадцатипульсовых выпрямителей, получивших широкое распространение на ТП систем тягового электроснабжения ЖД транспорта, ГЭТ, и шестипульсовых, применяемых в ТПП горно-шахтных комплексов, были получены следующие результаты:

1. Внешняя характеристика двенадцатипульсовых выпрямителей «жестче», что позволяет увеличить выпрямленное напряжение U_d по сравнению с шестипульсовыми на 5%;

2. Коэффициент мощности указанных выпрямителей повышается в пре-

делах от 3 до 6%, при этом значения лежат в пределах от 0,92 до 0,97;

3. Проведенные расчеты КПД двенадцатипульсовых выпрямителей показали, что несмотря на увеличение потерь в вентильной цепи, вызванное возрастанием числа вентилях в цепи выпрямленного тока по сравнению с шестипульсовым вариантом, η за счет увеличения пульсности возрастает в среднем на 0,6...1,2 %.

Для определения полной количественной оценки КПД был проведен расчет энергетического КПД ($\eta_{\text{э}}$), который дает комплексную оценку КПД выпрямительного агрегата с учетом активных и индуктивных потерь, вызванных процессами коммутации вентильных токов.

Из полученных расчетов следует, что двенадцатипульсовые выпрямители отличаются более высоким $\eta_{\text{э}}$, который выше в среднем на 1–5% в сравнении с шестипульсовым выпрямительным оборудованием.

Экспериментальные расчеты показали:

– достоинство шестипульсового выпрямительного устройства — это простота схемного решения (три вентильные обмотки и 6 вентилях), энергоэффективность при загрузке — K_3 от 0,2 до 0,6 (малая и средняя нагрузка), недостатком является то, что дальнейшее увеличение K_3 от 0,6 до 1,0 (максимальная зона нагрузки) ведет к возрастанию потерь в выпрямителе и, соответственно, к снижению КПД и выпрямленного напряжения, также значительно возрастает амплитуда гармоник;

– достоинство двенадцатипульсовых выпрямительных устройств в их энергоэффективности при загрузке K_3 от 0,2 до 0,6, а при K_3 от 0,6 до 1,0 КПД выпрямленного напряжения незначительно снижаются, а гармоники, соз-

даваемые шестипульсовым выпрямителем, отсутствуют, недостатком является то, что усложняется схмотехническое решение (требуются шесть вентильных обмоток и 12 вентилях).

Сравнительный анализ полученных результатов в ходе проведенных на математических моделях экспериментальных расчетов энергетических показателей выпрямителей подтвердил, что двенадцатипульсовые выпрямители отличаются значительно большей энергетической эффективностью, чем шестипульсовые.

Предложенные схмотехнические решения позволяют уменьшить потери электроэнергии и снизить уровень гармоник в питающей сети и в выпрямленном токе.

Теоретический анализ существующих и перспективных выпрямителей показал тенденцию к повышению энергоэффективности ТПП горно-рудничного комплекса путем увеличения пульсности выпрямительного оборудования.

Предлагается проведение модернизации на шестипульсовом выпрямительном оборудовании ТПП горно-рудничного комплекса путем расщепления вторичной обмотки преобразовательного трансформатора на две части, что позволит создать две трехфазные системы напряжения, при этом не требуется капитальное вложение денежных средств на приобретение нового трансформатора с расщепленными обмотками.

7. Выводы

1. На основе анализа теоретических расчетов энергетических характеристик предложенных схмотехнических решений с использованием технических данных выпрямительного оборудования ТПП горно-шахтных предприятий показано, что перевод

с шестипульсовых на двенадцатипульсовые схемы выпрямления уменьшает искажение тока в сети внешнего электроснабжения и снижает пульсации напряжения на выходе выпрямителя, сокращает потери электрической энергии и электромагнитное влияние тяговой сети на элементы системы связи и управления.

2. Показано, что уменьшение искажения тока в сети внешнего электроснабжения, вызванное уменьшением высших гармоник, создаваемых выпрямителем, снижает искажения качества электроэнергии питающих сетей.

3. Определено, что понижение пульсаций (колебаний) выпрямленного напряжения в контактной сети тяговых преобразовательных подстанций горно-рудничного комплекса упрощает схемы сглаживающих фильтров, это снижает затраты материальных и денежных средств на их изготовление и монтаж.

4. Установлено, что двенадцатипульсовые схемные решения позволяют повысить КПД, коэффициент мощности, а также жесткость внешней характеристики тяговых преобразовательных

подстанций тока горно-рудничного комплекса, и поэтому способствуют снижению потери электроэнергии.

5. Предлагается для внедрения на ТПП горно-шахтных предприятий в качестве выпрямителя более экономичный перспективный двенадцатипульсовый кольцевой выпрямитель, обладающий лучшим энергетическим КПД, который превышает энергетический КПД шестипульсового выпрямителя в среднем на 5%.

Таким образом, теоретически была подтверждена возможность при оснащении ТПП горно-шахтных комплексов двенадцатипульсовыми выпрямителями снизить потери электроэнергии и повысить качество электрической энергии контактной сети, а также электрической энергии в системе электроснабжения, что обеспечит между ними высокий уровень электромагнитной совместимости.

Применение двенадцатипульсовых выпрямительных устройств ТПП на шахтных (рудничных) предприятиях особенно эффективно для питания наземных и шахтных контактных электровозов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Евдокимов С. А., Щуров Н. И.* Структурный синтез многофазных вентильных преобразователей // Серия «Монографии НГТУ». — Новосибирск: Изд-во НГТУ — 2010. — 423 с.

2. *Комякова Т. В.* Многопульсовые выпрямители тяговых подстанций электрического транспорта: Автореферат дис. канд. техн. наук. — Омск: Омский ин-т инж. ж.-д. трансп. — 1999. — 24 с.

3. *Барковский Б. С., Магай Г. С., Маценко В. П.* Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций. — М.: Транспорт, — 1990. — 127 с.

4. *Степанов А. А.* Повышение энергоэффективности тяговых подстанций постоянного тока на основе многофазных трансформаторно-выпрямительных агрегатов: Автореферат дис. канд. техн. наук. — Новосибирск: Новосибирский гос. техн. ун-т. — 2020. — 24 с.

5. *Евдокимов С. А., Щуров Н. И., Сопов В. И., Волкова О. Л., Степанов А. А.* Перспективы применения кольцевых схем выпрямления на тяговых подстанциях электрического транспорта // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. — М.: Изд-во ВИНТИ РАН, № 8, — 2010. — С. 3 — 7.

6. *Щуров Н. И., Евдокимов С. А., Волкова О. Л., Степанов А. А.* Кольцевые схемы выпрямления для 12п-фазного преобразователя // Научные проблемы транспорта

Сибири и Дальнего Востока: Научный журнал. — Новосибирск: Изд-во НГАСУ. — 2010. — № 1. — С. 329 — 333.

7. Тимофеев И. П., Большунов А. В., Столярова М. С., Авдеев А. М. Особенности работы тягового устройства на изогнутых участках рельсового пути // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — No. 1. — P. 171–178. — DOI: 10.25018/0236-1493-2019-01-0-171-178.

8. Кирия Р., Ширин Л. Снижение энергопотребления конвейерной транспортной системы горнодобывающих предприятий // Международная конференция Эссе горной науки и практики. E3S Web of Conferences. 2019. 2019. Vol. 109. 00036. DOI: 10.1051/e3sconf/201910900036.

9. Хазин М. Л., Штыков С. О. Карьерный электрифицированный транспорт: Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. — 2018. Т.16. №1 С. 011–018.

10. Uno K., Imaie K., Maekawa K., Smith G., Suyama A., Hatori J. Development of mining machinery and future outlook for electrification. Hitachi Review. 2013, vol. 62, no. 2, pp. 99–106.

11. Тарасов П. И., Тарасов А. П. Технологические особенности и перспективы применения троллейзопроводов на горных предприятиях // Горная промышленность. 2008. №1. С. 54–62.

12. Varaschin J., de Souza E. Economics of Diesel Fleet Replacing Electric Mining Equipment // 15th Northamerican Mine Ventilation Symposium. 2015.

13. Nurić S., Nurić A., Brčaninović M. Haulage solutions with trolley assist diesel-electric ac trucks on the pit mine RMUBanovici // Journal of Mining and Metallurgy: Mining. 2009. Vol. 45. No. 1. P. 78–87.

14. Степук О. Г., Зуёнок А. С. Дизель-троллейвозный транспорт БЕЛАЗ: перспективы использования в горном производстве. Горный журнал. 2013, № 1, с. 52–55.

15. Mazumdar J. All electric operation of ultraclass mining haultrucks. Industry Applications Society Annual Meeting, 2013 IEEE. 2013, pp. 1–5.

16. Журавлев А. Г. Вопросы оптимизации параметров открытых карьерных транспортных систем // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 3–1. — С. 583–601. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-583-601.

17. Волотковская Н. С., Семенов А. С., Федоров О. В. Энергоэффективность и энергосбережение в системах электроснабжения горнодобывающих предприятий // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого. — 2019. — № 3(78). — С. 52–62.

18. Martyushev N. V., Malozyomov B. V., Khalikov I. H., Kukartsev V. A., Kukartsev V. V., Tynchenko V. S., Tynchenko Y. A., Qi M. Review of Methods for Improving the Energy Efficiency of Electrified Ground Transport by Optimizing Battery Consumption. Energies. 2023, 16, 729. <https://doi.org/10.3390/en16020729>.

19. Шевырëв Ю. В., Шевырева Н. Ю. Улучшение формы напряжения в системах электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса с активным выпрямителем // Горный журнал. — 2019. — №1. — С. 66–69. DOI: 10.17580/gzh.2019.01.14.

20. Абрамович Б. Н. Система бесперебойного электроснабжения предприятий горной промышленности // Записки Горного института. — 2018. — Т. 229. — С. 31–40. DOI: 10.25515/PM1.2018.1.31.

21. Shchurov N. I., Dedov S. I., Malozyomov B. V., Shtang A. A., Martyushev N. V., Klyuev R. V., Andriashin S. N. Degradation of Lithium-Ion Batteries in an Electric Transport Complex. Energies 2021, 14, 8072. DOI: 10.3390/en14238072.

22. Sorokova S. N., Efremkov E. A., Qi M. Mathematical Modeling of the State of the Battery of Cargo Electric Vehicles. Mathematics 2023, 11, 536. DOI: 10.3390/math11030536.

23. Martyushev N. V., Sorokova S. N., Efremkov E. A., Qi M. Mathematical Modeling of Mechanical Forces and Power Balance in Electromechanical Energy Converter. Mathematics 2023, 11, 2394. DOI: 10.3390/math11102394. 

REFERENCES

1. Evdokimov S. A., Schurov N. I. Structural synthesis of multiphase valve converters. Series "Monographs of NSTU". Novosibirsk: Publishing House of NSTU, 2010. 423 p. [In Russ].
2. Komyakova T. V. Multi-pulse rectifiers of traction substations of electric transport: Autoabstract Dis. Kand. Techn. Sciences. Omsk: Omsk in Jr.j.-d. transp. 1999. 24 p. [In Russ].
3. Barkovsky B. S., Magay G. S., Matsenko V. P. Twelve-puls semiconductor rectifiers of traction substations. Ed. M. G. Shalimova. M.: Transport, 1990. 127 p. [In Russ].
4. Stepanov A. A. Improving the energy efficiency of pp. traction substations based on multi-phase transformer-reckoning units: Autoabstract dis. cand. tech. Sciences. Novosibirsk: Novosibirsk State. tech. University, 2020. 24 p. [In Russ].
5. Evdokimov S. A., Schurov N. I., Sopov V. I., Volkova O. L., Stepanov A. A. Prospects for the use of ring circuits of straightening at traction substations of electric transport. Transport: Science, Technology, Management. Scientific information collection. M.: Publishing House of Vinity RAS, 2010, no. 8. pp. 3–7. [In Russ].
6. Schurov N. I., Evdokimov S. A., Volkova O. L., Stepanov A. A. Ring output circuits for a 12n-phase converter. Scientific problems of transport of Siberia and the Far East: Scientific Journal. Novosibirsk: Publishing House of NGAVT, 2010. no. 1.– pp. 329–333. [In Russ].
7. Timofeev I. P., Bolshunov A. V., Stolyarova M. S., Avdeev A. M. Peculiarities of operation of a traction device on curved sections of a rail track. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019. no. 1. pp. 171–178.- DOI: 10.25018. 0236-1493-2019-01-0-171-178. [In Russ].
8. Kiriia R., Shyrin L. Reducing the energy consumption of the conveyor transport system of mining enterprises. International Conference Essays of Mining Science and Practic. 2019. E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 109. 00036. DOI: 10.1051/e3sconf/201910900036. [In Russ].
9. Khazin M. L., Shtykov S. O. Career electrified transport: Bulletin of MGTU named after G. I. Nosova. 2018. T.16. no. 1. [In Russ].
10. Uno K., Imaie K., Maekawa K., Smith G., Suyama A., Hatori J. Development of mining machinery and future outlook for electrification. *Hitachi Review*. 2013, vol. 62, no. 2, pp. 99–106.
11. Tarasov P. I., Tarasov A. P. Technological features and prospects for the use of trolley vehicles at mining enterprises. *Mining Industry*. 2008. no. 1. pp. 54–62. [In Russ].
12. Varaschin J., de Souza E. Economics of Diesel Fleet Replacing Electric Mining Equipment. 15th Northamerican Mine Ventilation Symposium. 2015.
13. Nurić S., Nurić A., Brčćaninović M. Haulage Solutions Whathtrolley Assist Diesel-Electric Ac Trucks on the Pit Mine Rmubanovici. *Journal of Mining and Metallurgy: Mining*. 2009. Vol. 45. no. 1. pp. 78–87.
14. Stepuk O. G., Zuyenok A. S. BELAZ diesel-trolley transport: The prospects of use in mining. *Gorny zhurnal*. 2013, no. 1, pp. 52–55. [In Russ].
15. Mazumdar J. All Electric Operation of Ultraacclass Mining Houltrucks. Industry Applications Society Annual Meeting, 2013 IEEE. 2013, pp. 1–5.
16. Zhuravlev A. G. Issues of optimizing the parameters of open pit transport systems. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020. no. 3–1. pp. 583–601. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-583-601. [In Russ].
17. Volotkovskaya N. S., Semyonov A. S., Fedorov O. V. Energy efficiency and energy saving in power supply systems of mining enterprises. *Herald of Gomel State Technical University named after him. P. O. Sukhoi*. 2019. 3(78). pp. 52–62. [In Russ].
18. Martyushev N. V., Malozyomov B. V., Khalikov I. H., Kukartsev V. A., Kukartsev V. V., Tynchenko V. S., Tynchenko Y. A., Qi, M. Review of Methods for Improving the

Energy Efficiency of Electrified Group Transport by Optimizing Battle Consumption. *Energies*. 2023, 16, 729. <https://doi.org/10.3390/en16020729>.

19. Sheviriyov Y. V., Shevyreva N. Y. Improving the form of voltage in the power supply systems of the mineral-raw materials complex with active rectifier. *Gorny zhurnal*. 2019. no. 1. pp. 66–69. DOI: 10.17580/gzh.2019.01.14. [In Russ].

20. Abramovich B. N. System of uninterrupted power supply of mining enterprises. *Journal of Mining Institute*. 2018. T. 229. pp. 31–40. DOI: 10.25515/PM1.2018.1.31. [In Russ].

21. Shchurov N. I., Dedov S. I., Malozyomov B. V., Shtang A. A., Martyushev N. V., Klyuev R. V., Andriashin S. N. Degradation of Lithium-Ion Batteries in an Electric Transport Complex. *Energies* 2021, 14, 8072. DOI: 10.3390/en14238072.

22. Sorokova S. N., Efremenkov E. A., Qi M. Mathematical Modeling of the State of the Battery of Cargo Electric Vehicles. *Mathematics* 2023, 11, 536. DOI: 10.3390/math11030536.

23. Martyushev N. V., Sorokova S. N., Efremenkov E. A., Qi M. Mathematical Modeling of Mechanical Forces and Power Balance in Electromechanical Energy Converter. *Mathematics* 2023, 11, 2394. DOI: 10.3390/math11102394.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Степанов Александр Андреевич*¹ — канд. техн. наук, доцент, e-mail: stepanov-ngtu@mail.ru, РИНЦ AuthorId: 620674, ORCID: 0000-0002-0862-1421;

*Сингизин Игорь Иванович*¹ — ассистент, e-mail: singizin@corp.nstu.ru, ORCID: 0000-0003-1135-4309;

*Латышев Роман Николаевич*¹ — ассистент, младший научный сотрудник научно-исследовательской части, e-mail: latyshev@corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0002-3920-8728;

¹ Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия.

Автор-корреспондент: *Степанов Александр Андреевич*, e-mail: stepanov-ngtu@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Stepanov A. A.*¹, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, E-mail: stepanov-ngtu@mail.ru, Rins Authorid: 620674, ORCID: 0000-0002-0862-1421;

*Singizin I. I.*¹, assistant, e-mail: singizin@corp.nstu.ru, ORCID: 0000-0003-1135-4309;

*Latyshev R. N.*¹, assistant, junior researcher at the research part, e-mail: latyshev@corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0002-3920-8728;

¹ Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, Russia.

Corresponding author: *Stepanov A. A.*, e-mail: stepanov-ngtu@mail.ru.

Получена редакцией 18.04.2023; получена после рецензии 04.07.2023; принята к печати 10.10.2023.

Received by the editors 18.04.2023; received after the review 04.07.2023; accepted for printing 10.10.2023.

