

ДВЕНАДЦАТИПУЛЬСОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

Внедрение двенадцатипульсовых выпрямителей взамен шестипульсовых на тяговых подстанциях городского электрического транспорта приводит к повышению технико-экономических показателей, экономии электроэнергии, снижению тока утечки, что ведет к электробезопасности пассажиров, водителя троллейбуса и обслуживающего персонала депо. Двенадцатипульсовые выпрямители могут иметь последовательное или параллельное соединение шестипульсовых мостов. При параллельной схеме необходимо наличие уравнительного реактора. Реализация последовательной схемы двенадцатипульсового выпрямителя осуществляется с применением специально разработанных для нее сухих преобразовательных трансформаторов и выпрямителей на основе таблеточных лавинных вентилях ввиду их преимущества перед нелавинными.

Ключевые слова: городской электрический транспорт, тяговая подстанция, двенадцатипульсовый выпрямитель, таблеточные лавинные вентилях, ток утечки, технико-экономические показатели.

В системах электроснабжения городского электрического транспорта применяются в основном шестипульсовые выпрямители [1–3]. Надежность и эффективность работы тяговых подстанций городского электрического транспорта, повышение электробезопасности пассажиров, водителя троллейбуса и обслуживающего персонала депо напрямую связаны с заменой шестипульсовых выпрямителей двенадцатипульсовыми, которые имеют более высокие коэффициенты мощности и полезного действия, улучшают качество питающего и выпрямленного напряжения, снижают электромагнитное влияние на смежные приемники электроэнергии. Пропускная способность участков городского электрического транспорта при этом повышается за счет меньшего коэффициента наклона внешней характеристики и стабилизации напряжения. Внедрение двенадцатипульсовых выпрямителей взамен шестипульсовых при коэффициенте нагрузки тяговой подстанции k_n от 0,25 до 0,75 приведет к снижению удельного расхода электрической энергии на 2,5 % [3–9].

На 28 тяговых подстанциях Муниципального предприятия (МП) г. Омска «Электрический транспорт» эксплуатируется 65 выпрямительных агрегатов, 64 из которых имеют сложные нулевые шестипульсовые схемы выпрямления параллельного типа. Выпрямительные агрегаты включают в себя выпрямительные блоки БВКЛЕ-1000 (42 шт.) и БВКЛЕ-2000 (23 шт.), а также преобразовательные трансформаторы ТМРУМ-1200/10 (42 шт.) и ТМПУ-2000/10 (23 шт.). Выпрямительный блок БВКЛЕ-1000 содержит 36 лавинных вентилях штыревого типа ВЛ200-9 (6×3×2 шт.). Преимуществом использова-

ния лавинных вентилях в составе выпрямительных агрегатов перед нелавинными заключается в большей устойчивости к перенапряжениям.

Вследствие применения лавинных вентилях у выпрямительных агрегатов тяговых подстанций городского электрического транспорта не использовались и до сих пор не используются достаточно эффективные средства защиты от перенапряжений со стороны вентиляхных обмоток трансформаторов, такие как ограничители перенапряжения (ОПН) или вентиляхные разрядники. На некоторых выпрямительных агрегатах для защиты от перенапряжений установлены демпфирующие RC-цепи, включенные между выводами вторичных обмоток. Подключение RC-цепей осуществляется через предохранители.

Предприятия-изготовители выпрямительных блоков БВКЛЕ с середины 80-х годов стали оснащать их вентиляхами таблеточной конструкции нелавинного типа, что повысило динамическую устойчивость выпрямительных блоков, но значительно снизило их устойчивость к перенапряжениям.

В качестве опытного образца для оценки эффективности работы один двенадцатипульсовый выпрямительный агрегат параллельного типа введен в эксплуатацию на тяговой подстанции городского электрического транспорта г. Омска, которая является тупиковой, централизованного электроснабжения с изолированной от земли отрицательной шиной, и питает только троллейбусную контактную сеть. Схема главных электрических соединений выпрямительного агрегата приведена на рис. 1. В схеме выпрямительного агрегата ВАКЛЕ-1000-600Н использованы реконструированные выпрями-

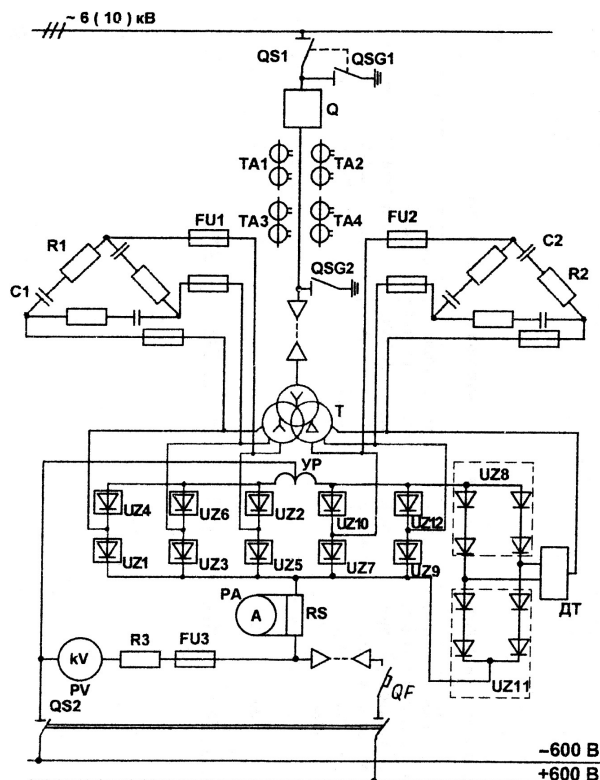


Рис. 1. Схема главных электрических соединений двенадцатипульсового выпрямителя параллельного типа с использованием вентильных конструкций ВКЛЕ-1000-600Н

тельные блоки ВКЛЕ-1000 и преобразовательный трансформатор ТМРУМ-1200/10. Выпрямительные блоки ВКЛЕ-1000 реконструированы сотрудниками МП «Электрический транспорт» г. Омска и ОмГУПСа. Преобразовательный трансформатор ТМРУМ-1200/10 реконструирован в электромеханических мастерских ЭМАСТ Западно-Сибирской железной дороги (ЗСЖД).

Реконструкция выпрямительных блоков ВКЛЕ-1000 предусматривала увеличение числа вентильных плеч с шести до двенадцати, перераспределение числа вентилях в вентильных плечах и изменение ошиновки выпрямителя. До модернизации в каждом из шести вентильных плеч выпрямительных блоков было установлено три вентиля ВА200-9, включенных последовательно. Общее число вентилях в выпрямительных блоках было равно 36 (6×3×2 шт.). В двенадцатипульсовом выпрямителе параллельного типа должно быть вдвое меньше последовательно включенных вентилях в каждом из 12 вентильных плеч. Было решено принять число вентилях, соединенных последовательно, равным двум, что привело к увеличению общего числа вентилях до 48 (12×2×2 шт.). В схеме были сохранены демпфирующие RC-цепи. Они были также подключены между выводами вторичных обмоток трансформатора.

Стоимость реконструкции одного преобразовательного трансформатора ТМРУМ-1200/10 на базе ЭМАСТ не превысила 30 % от стоимости нового оборудования [10].

Для оценки эффективности применения двенадцатипульсового выпрямителя проведено сравнение характеристик шести- и двенадцатипульсового выпрямительных агрегатов, установленных на одной тяговой подстанции.

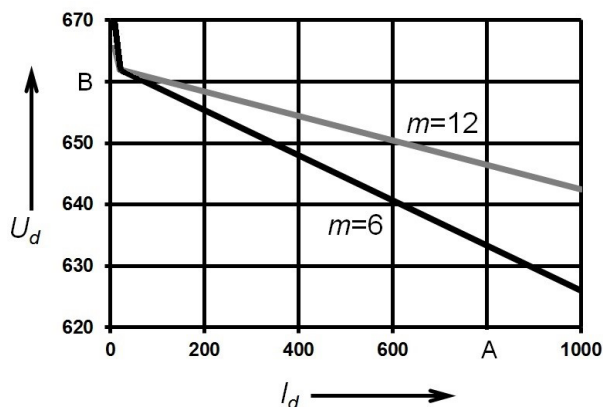


Рис. 2. Внешние характеристики шести- и двенадцатипульсовых выпрямителей параллельного типа

Уровень напряжения на шинах тяговой подстанции при изменении тока нагрузки I_d определяется внешними характеристиками выпрямительного агрегата. У двенадцатипульсового выпрямительного агрегата внешняя характеристика более пологая. Коэффициент наклона ее равен 0,26, в то время как у шестипульсового — 0,5. Внешние характеристики шести- и двенадцатипульсовых выпрямительных агрегатов параллельного типа одной тяговой подстанции приведены на рис. 2.

Ухудшение изоляции высоковольтного оборудования является причиной попадания на корпус троллейбуса опасного потенциала. Оценка состояния изоляции проводится по двум параметрам: сопротивлению изоляции $R_{ут}$ и току утечки $I_{ут}$. Сопротивление изоляции в большей степени характеризует работоспособность изоляции электрических машин, аппаратов и проводов, а ток утечки является интегральной характеристикой электробезопасности транспортного средства. Запрещается эксплуатировать троллейбус при величине тока утечки, превышающей максимально допустимую норму — 3,0 мА [11].

Ток утечки троллейбуса зависит не только от состояния изоляции полюсов цепей питания относительно корпуса, но и от значения напряжения в контактной сети и потенциала отрицательного провода контактной сети в точке нахождения троллейбуса [12–14].

Контроль тока утечки троллейбуса ЗиУ проводился в сухую погоду при включенных и отключенных двигателях при прямом измерении тока между корпусом машины и землей. При этом в контактную сеть поочередно подавалось питание от шести- и двенадцатипульсового выпрямительных агрегатов, что возможно реализовать на тупиковой тяговой подстанции.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что значение шестой гармоники с частотой 300Гц в кривой выпрямленного напряжения шестипульсового выпрямительного агрегата достигает 42В. В кривой выпрямленного напряжения двенадцатипульсового выпрямительного агрегата отсутствуют гармоники, кратные шести. Это объясняет результаты экспериментальных исследований, которые показали, что значения тока утечки $I_{ут}$ при работе шестипульсового выпрямительного агрегата примерно в три раза выше, чем при работе двенадцатипульсового.

Зависимость тока утечки $I_{ут}$ от тока нагрузки шести- и двенадцатипульсовых выпрямительных

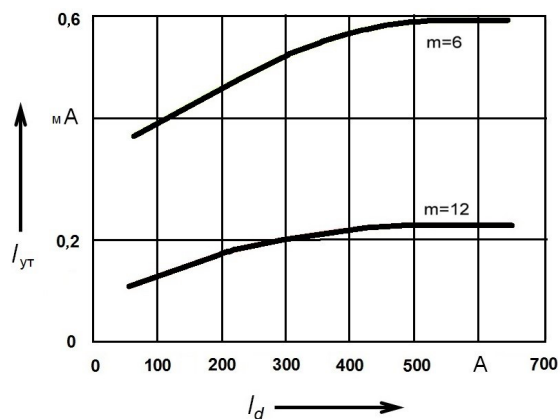


Рис. 3. Зависимости тока утечки от тока нагрузки выпрямителя

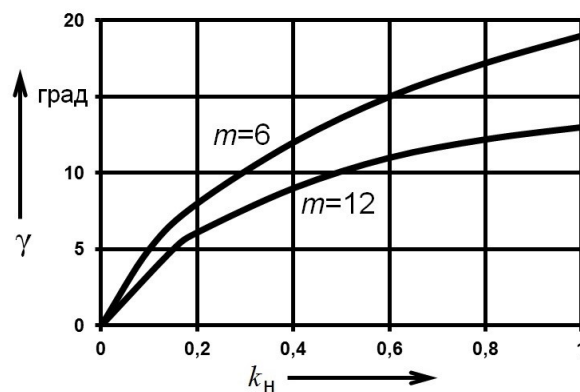


Рис. 5. Зависимость угла коммутации от коэффициента нагрузки

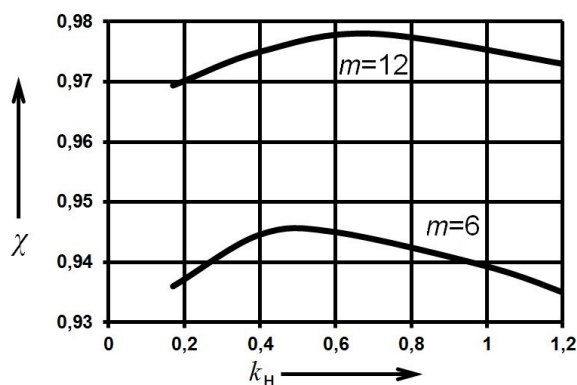


Рис. 4. Зависимость коэффициента мощности от коэффициента нагрузки

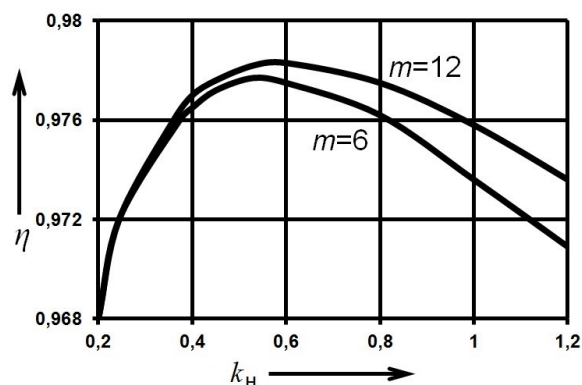


Рис. 6. Зависимость коэффициента полезного действия от коэффициента нагрузки

агрегатов тяговой подстанции приведена на рис. 3. Уменьшение тока утечки с ростом пульсаций кривой выпрямленного напряжения ведет к повышению электробезопасности пассажиров, водителя троллейбуса и обслуживающего персонала депо.

Экспериментальная зависимость коэффициентов мощности χ шести- и двенадцатипульсового выпрямительных агрегатов от коэффициента нагрузки k_H приведена на рисунке 4. Коэффициент мощности у шестипульсового выпрямительного агрегата при рабочих токах составляет 0,935–0,945, у двенадцатипульсового — 0,97–0,98, то есть среднее значение коэффициента мощности возрастает на 0,03 за счет лучшей формы кривой сетевого тока и снижения значений угла коммутации. Экспериментальная зависимость углов коммутации от коэффициента нагрузки шести- и двенадцатипульсовых выпрямительных агрегатов тяговой подстанции приведена на рис. 5. Уменьшение потребления реактивной энергии за счет повышения коэффициента мощности приводит к сокращению потерь электроэнергии в элементах энергосистемы [15, 16].

При проведении экспериментальных исследований были определены значения коэффициентов полезного действия (КПД) η выпрямительных агрегатов как отношение отдаваемой мощности к активной, потребляемой из питающей сети. При таком условии были учтены изменения потерь мощности в тяговом трансформаторе и вентиллях. Сравнение значений КПД выпрямительных агрегатов про-

дилось в зависимости от перерабатываемой мощности, так как одна и та же мощность реализуется при различных токах из-за отличия внешних характеристик. Анализ зависимостей, приведенных на рис. 6, свидетельствует о преимуществе двенадцатипульсовых выпрямителей, у которых КПД (при одинаковом коэффициенте нагрузки k_H) больше, чем у шестипульсовых.

Для систем электроснабжения городского электрического транспорта в настоящее время трансформаторы и выпрямители поставляются АО УЭТМ («Уралэлектротражмаш», г. Екатеринбург), ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО» (г. Санкт-Петербург) совместно с компанией «СВЭЛ-РосЭнергоТранс». Имеются сведения об аналогичных разработках компании «Плутон». В МП «Электрический транспорт» г. Омска возможно внедрение этого оборудования. Но при этом следует иметь в виду следующее.

АО УЭТМ выпускает преобразовательные трансформаторы ТСЗП и ТСЗПУ и выпрямители В-ТПЕД только для шестипульсовых нулевых и мостовых схем выпрямления. ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО» совместно с компанией «СВЭЛ-РосЭнергоТранс» выпускает преобразовательные трансформаторы ТСЗП и ТРСЗП и выпрямители В-МППД для шести- и двенадцатипульсовых мостовых схем выпрямления. Компания «Плутон» выпускает сухие преобразовательные трансформаторы, выполненные по технологии RESIBLOC, и выпрямители В-ТПЕД для шестипульсовых нулевых и шести- и двенадцатипульсовых мостовых схем выпрямления, а также

модульные тяговые подстанции с этим оборудованием.

В составе выпускаемых выпрямителей В-ТПЕД и В-МППД используются таблеточные вентили (с охладителями на тепловых трубках), обладающие значительными преимуществами перед штыревыми. Однако в этих конструкциях используются вентили нелавинного типа, которые весьма чувствительны к перенапряжениям, что в ряде случаев приводит к их повреждению [17, 18].

Работниками Муниципального предприятия (МП) г. Омска «Электрический транспорт» отмечены неоднократные случаи повреждения таблеточных вентилях нелавинного типа от перенапряжений в составе выпрямителей, особенно при грозах. Таблеточные вентили нелавинного типа особенно нуждаются в защите от перенапряжения.

За все время эксплуатации выпрямительных агрегатов на базе штыревых лавинных вентилях и нелавинных вентилях таблеточного типа работниками МП отмечено повреждение примерно 50 % нелавинных вентилях таблеточного типа и примерно 3 % штыревых лавинных вентилях, что показывает более высокую надежность лавинных вентилях.

Надежность лавинных вентилях подтверждена многолетним сроком эксплуатации на Западно-Сибирской железной дороге. Результаты диагностики по значению повторяющегося импульсного обратного тока I_{RRM} 98077 диодов в 311 выпрямителях и выпрямительно-инверторных агрегатах (ВИП) приведены в таблице 1.

Гораздо меньшая повреждаемость лавинных и нелавинных вентилях в выпрямителях и выпрямительно-инверторных агрегатах тяговых подстанций ЗСЖД по сравнению с тяговыми подстанциями городского электрического транспорта объясняется использованием эффективных средств защиты от перенапряжений вентилях и изоляции вентилях обмоток преобразовательных трансформаторов, таких как ограничители перенапряжения (ОПН), вентилях разрядники и демпфирующие RC-цепи. Однако даже без средств защиты лавинные вентили демонстрируют меньшую повреждаемость.

Двенадцатипульсовые выпрямители могут иметь последовательное или параллельное соединение шестипульсовых мостов. При параллельной схеме необходимо наличие уравнительного реактора, который выравнивает токи в параллельных мостах [3, 19]. Мощность уравнительного реактора не превышает 2 % от мощности трансформаторного оборудования. В схеме без уравнительного реактора

увеличивается наклон внешней характеристики вследствие двойной коммутации токов вентилях по сравнению со схемой с уравнительным реактором. К сожалению, оборудование для двенадцатипульсовых выпрямительных агрегатов, выпускаемое ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО», компанией «СВЭЛ-РосЭнергоТранс», компанией «Плутон», предназначено для работы в двенадцатипульсовых схемах параллельного типа без уравнительного реактора.

В настоящее время в Муниципальном предприятии «Электрический транспорт» г. Омска ведутся предпроектные работы по строительству трех новых линий троллейбуса на Левобережье с модернизацией двух тяговых подстанций и установкой двух модульных тяговых подстанций, которые будут питать троллейбусную контактную сеть.

При проведении проектных работ с целью повышения эффективности и надежности работы выпрямительных агрегатов тяговых подстанций, а также повышения электробезопасности пассажиров, водителя троллейбуса и обслуживающего персонала депо, можно рекомендовать следующее. Выпрямительные агрегаты должны иметь двенадцатипульсовую схему выпрямления последовательного или параллельного типа.

Реализация последовательной схемы двенадцатипульсового выпрямителя должна осуществляться с применением новых, специально разработанных для нее сухих преобразовательных трансформаторов типа ТРСЗП с типовой мощностью 1000 и 2000 кВ·А и выпрямителей на основе таблеточных лавинных вентилях ввиду их преимуществ перед нелавинными.

Двенадцатипульсовая схема выпрямления параллельного типа должна быть оснащена уравнительным реактором. Уравнительный реактор либо дополнительно устанавливается в оборудование, выпускаемое ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО», компанией «СВЭЛ-РосЭнергоТранс» и компанией «Плутон», либо используется встроенный реактор при реконструкции преобразовательных трансформаторов ТМРУМ-1200 и ТМПУ-2000, предназначенных для сложных нулевых шестипульсовых схем выпрямления параллельного типа. При реконструкции в выпрямительных блоках БВКЛЕ-1000 и БВКЛЕ-2000 должно быть двенадцать вентилях плеч с изменением количества штатных вентилях в плече. В составе новых выпрямителей (блоков) необходимо иметь таблеточные вентили лавинного типа с охладителями на базе тепловых труб. В выпрямительном агрегате необходимо иметь защиту вентилях и изоляции вентилях обмоток преобразовательного

Таблица 1

Результаты диагностирования вентилях лавинного и нелавинного типа на ЗСЖД

Тип вентиля	Всего, шт.	На контроле, шт.	Отбраковано	
			шт.	%
ДЛ153-2000	1969	1	3	0,2
ДЛ161-200	1080	6	12	1,1
ВЛ200	63240	348	1171	1,8
ВК200	516	3	18	3,5
ДЛ133-500	28656	208	1030	3,6
Д453-1600	576	31	36	6,2
Д453-2000	2040	41	168	8,2

трансформатора от перенапряжения, современное коммутационное и защитное оборудование.

В настоящее время отечественными и зарубежными предприятиями-изготовителями разработан и внедрен широкий номенклатурный ряд мало- и необслуживаемого оборудования для устройств электроснабжения. К нему относятся вакуумные выключатели, выключатели автоматические быстроедействующие для тяговых подстанций электрических железных дорог и городского электрического транспорта, ограничители перенапряжения и другое оборудование, которое можно применять в системах электроснабжения городского электрического транспорта. База данных технических характеристик электрооборудования на различные классы напряжения составлена в соответствии с техническими указаниями за 2000–2021 гг. и ПАО «Россети» и ОАО «РЖД» [20].

Таким образом, повышения технико-экономических показателей системы электроснабжения городского электротранспорта, экономии электроэнергии, снижения тока утечки, а следовательно, повышения электробезопасности пассажиров, водителя троллейбуса и обслуживающего персонала депо можно достичь путем замены шестипульсовых выпрямителей тяговых подстанциях двенадцатипульсовыми с различными схемами соединения мостов. В составе двенадцатипульсовых выпрямителей должны применяться специально разработанные для них сухие преобразовательные трансформаторы, выпрямительные блоки на основе таблеточных лавинных вентилях, новое коммутационное и защитное оборудование.

Библиографический список

1. Загайнов Н. А., Финкельштейн Б. С., Кривов Л. Л. Тяговые подстанции трамвая и троллейбуса. Москва: Транспорт, 1988. 327 с.
2. Сопов В. И., Щуров Н. И. Системы электроснабжения электрического транспорта на постоянном токе. Москва: Юрайт, 2019. 400 с.
3. Салита Е. Ю., Ковалева Т. В., Комякова Т. В. Обоснование внедрения двенадцатипульсовых выпрямителей последовательного типа в системе электроснабжения метрополитена // Известия Транссиба. 2020. № 1 (41). С. 11–20.
4. Еланский А. Ю., Титоренко К. В., Лабунский Л. С. Моделирование многопульсовых выпрямительных агрегатов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2019. № 9. С. 8–11.
5. Shaikh K. S., Mate A. M., Haibate G. J. [et al.]. Design & Simulation of Twelve Pulse Thyristorized Controllers in Series and Parallel mode of Operation // 2019 International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE). 2019. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICNTE44896.2019.8946066.
6. Chun L. [et al.]. Dynamic mathematical model of twelve-pulse diode rectifier with pole-to-ground DC fault // Transactions of China Electrotechnical Society. 2020. Vol. 35, № 7. P. 1529–1537.
7. Toh C. L., Tan C. W. DC traction power substation using eighteen-pulse rectifier transformer system // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. 2021. Vol. 12, № 4. P. 2284. DOI:10.11591/ijpeds.v12.i4.pp2284-2294.
8. Li C., Fan M., Lijun F. [et al.]. Mathematical Model of Pole-to-ground DC Fault in Power Supply System of Twenty-four-pulse Diode Rectifier // 2019 IEEE 3rd International Electrical and Energy Conference (CIEEC). 2019. P. 947–952. DOI:10.1109/CIEEC47146.2019.CIEEC-2019362.
9. Толоконников С. К., Аверина Н. Ю. Пути повышения энергоэффективности городского электрического транспорта //

Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов, ученых / Южно-Уральский гос. ун-т. Челябинск, 2021. Т. 9, № 1. С. 93–95.

10. Салита Е. Ю., Комякова Т. В., Ковалева Т. В. Улучшение показателей энергетической эффективности многопульсовых выпрямителей тяговых подстанций // Известия Транссиба. 2017. № 3 (31). С. 114–123.
11. Об утверждении правил по охране труда на городском электрическом транспорте: приказ М-ва труда и соц. защиты Российской Федерации от 9 дек. 2020 г. № 875н. // Российская газета. 2020. 16 декабря.
12. Томянович Д. К. Защита устройств электроснабжения троллейбусов. Москва: Транспорт, 1980. 150 с.
13. Веклич В. Ф. Диагностирование технического состояния троллейбусов. Москва: Транспорт, 1990. 295 с.
14. Самигулин Н. И. Исследование электробезопасности троллейбуса // Тинчуринские чтения-2020 «Энергетика и цифровая трансформация»: материалы междунар. молодеж. науч. конф. В 3 т. / под общ. ред. Э. Ю. Абдуллазянова. Казань: Изд-во КГЭУ, 2020. Т. 1. С. 363–366. ISBN 978-5-89873-567-8.
15. Рудкий В. М., Тычков А. С., Старикова А. Г., Трофименко С. В. Проблема качества электроэнергии в системе электроснабжения городского электрического транспорта // Вестник транспорта Поволжья. 2018. № 1 (67). С. 17–23.
16. Song Z., Liu C. Study on active Harmonic Suppression on DC side of twelve pulse thyristor rectifier System // 2021 IEEE 5th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). 2021. Vol. 5. P. 2435–2443. DOI: 10.1109/IAEAC50856.2021.9391045.
17. Салита Е. Ю., Ковалева Т. В., Никонов А. В. Результаты диагностики силовых вентилях преобразователей на тяговых подстанциях // Транспорт Урала. 2019. № 1 (60). С. 97–100. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-1-97-100.
18. Пиксаев В. М., Алямкина Д. В., Пьянзин Д. В. Система диагностики мощных диодных выпрямителей // Вопросы электротехнологии. 2022. № 1 (34). С. 85–90.
19. Iwaszkiewicz J., Muc A., Mysiak P. A 12-pulse rectifier using coupled reactors for supplying three-inverters // Renewable Energy and Power Quality Journal. 2019. Vol. 17. P. 589–592. DOI: 10.24084/repqj17.382.
20. Салита Е. Ю., Ковалева Т. В., Кондратьев Ю. В. Оборудование для устройств электроснабжения. Омск: Изд-во ОмГУПС, 2022. 97 с. ISBN 978-5-949-41296-1.

САЛИТА Евгений Юрьевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск.

SPIN-код: 8278-1354

AuthorID (РИНЦ): 428149

Адрес для переписки: salitaey@gmail.com

КОВАЛЕВА Татьяна Владимировна, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Теоретическая электротехника» ОмГУПС, г. Омск. SPIN-код: 7545-0724

AuthorID (РИНЦ): 650721

Адрес для переписки: tatevgeniy@list.ru

Для цитирования

Салита Е. Ю., Ковалева Т. В. Двенадцатипульсовые выпрямители в системе электроснабжения городского электрического транспорта // Омский научный вестник. 2023. № 1 (185). С. 71–75. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-71-75.

Статья поступила в редакцию 21.06.2022 г.

© Е. Ю. Салита, Т. В. Ковалева