

УДК 629.423.1

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

Иркутский государственный университет путей сообщения, Россия, 664074, Иркутск, ул. Чернышевского, 15

Для цитирования: Разработка способа разнесенного управления транзисторными тяговыми преобразователями электровоза на первой зоне регулирования выпрямленного напряжения / Григоренко П. В., Мельниченко О. В., Портной А. Ю., Самойлова А. С. // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 1. С. 252–264. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-252-264

Аннотация

Цель: разработать способ повышения качества электроэнергии на токоприемнике электровоза переменного тока при его работе на первой зоне регулирования выпрямленного напряжения с транзисторными тяговыми преобразователями. **Методы:** проанализированы электромагнитные процессы на токоприемнике и в силовой цепи электровоза переменного тока с тиристорными и транзисторными тяговыми преобразователями, произведено их сравнение по критерию искажения качества электроэнергии на токоприемнике. Проанализированы электромагнитные процессы на токоприемнике и в силовой цепи электровоза переменного тока с транзисторными тяговыми преобразователями, работающими по предложенному способу — разнесенного управления. **Результаты:** выявлены причины колебаний напряжения и тока на токоприемнике электровоза переменного тока с транзисторными тяговыми преобразователями на первой зоне регулирования выпрямленного напряжения. Разработан способ разнесенного управления транзисторными тяговыми преобразователями, позволяющий снизить суммарный коэффициент гармонических составляющих тока и напряжения на токоприемнике электровоза переменного тока. **Практическая значимость:** разработанный способ разнесенного управления может применяться на электровозах переменного тока после их переоборудования на транзисторные тяговые преобразователи, а также при проектировании новых электровозов.

Ключевые слова: электровоз переменного тока, выпрямительно-инверторный преобразователь, коллекторный электропривод, IGBT-транзисторы, качество электрической энергии, энергоэффективность.

Введение

Перейти на опережающее развитие железных дорог Восточного полигона — поручение Президента Российской Федерации по итогам совещания развития отдельных направлений транспортного комплекса [1]. Бессветофорное интервальное регулирование движения поездов признается ведущей технологией, которая позволит исполнить по-

ручение Президента Российской Федерации и повысить пропускную способность Транссиба и БАМа [2]. Технологии «Подвижные блок-участки» и «Виртуальная сцепка», разработанные АО НИИАС, ведущим институтом холдинга «РЖД», уже позволили увеличить пропускную способность тяговых участков за счет сокращения межпоездного

интервала [3–5]. Однако для дальнейшего, более эффективного использования разработанных технологий необходимо повышать энергетические показатели электровазов переменного тока с тиристорными выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИП), которые потребляют значительное количество реактивной энергии из сети (коэффициент мощности электроваза переменного тока не превышает 0,84) [6–8]. Становление новых технологий интервального регулирования движения поездов не может показать свою полную эффективность по причине низкой энергоэффективности электровазов с тиристорными ВИП, поэтому необходимо внедрять новые технологии и на электроподвижном составе. Для электровазов переменного тока авторами предложен ВИП с управляемыми полупроводниковыми приборами — IGBT-транзисторами. Использование транзисторного ВИП для коллекторного электропривода электроваза позволит значительно увеличить коэффициент его мощности на высших зонах регулирования на 15–40%, а на первой зоне регулирования выпрямленного напряжения — до 90% [9–13]. В результате электровазы переменного тока с транзисторными ВИП при их внедрении позволят значительно улучшить движение поездов по технологиям интервального регулирования и повысить пропускную способность железных дорог Восточного полигона за счет снижения реактивной мощности в тяговой сети, что даст возможность использовать больше активной мощности на тягу поездов другими локомотивами, находящимися на одной фидерной зоне. Это, в свою очередь, позволит еще больше снизить межпоездной интервал времени.

Однако еще остается вопрос соблюдения требований государственного стандарта,

регулирующего нормы качества электроэнергии (КЭ) в системах электроснабжения общего назначения, к которым относится железная дорога [14]. С увеличением количества электровазов на одной фидерной зоне увеличивается искажение питающего напряжения в тяговой сети и снижается его среднеквадратическое значение, что негативно влияет на работу электрического и электронного оборудования электроваза, снижая их ресурс. Поэтому необходимо стремиться, чтобы каждый электроваз вносил наименьшие искажения в тяговую сеть.

Известно, что тиристорный ВИП (рис. 1) с типовым алгоритмом работы (табл. 1) на первой зоне регулирования имеет низкий коэффициент мощности (в среднем 0,49 на 0,5 зоны регулирования). Машинисты магистральных грузовых электровазов утверждают, что работа на первой зоне в режиме тяги составляет в среднем 20% от всего времени работы электроваза, что составляет значительное время. Такое положение дел препятствует дальнейшему сокращению времени между поездами при их вождении по технологии «Виртуальная сцепка». Хотя и коэффициент гармонических составляющих напряжения на токоприемнике при работе на первой зоне регулирования составляет всего 3–4% [15], что является допустимым по ГОСТ 32144-2013. Это объясняется незначительным изменением индуктивного сопротивления электроваза относительно тяговой сети в моменты коммутации из-за того, что в образовании первой зоны задействована только одна секция тяговой обмотки тягового трансформатора электроваза 1–2 (рис. 1) [16–17]. Основное искажение питающего напряжения происходит в момент фазовой коммутации, которое тем больше, чем ближе момент коммутации

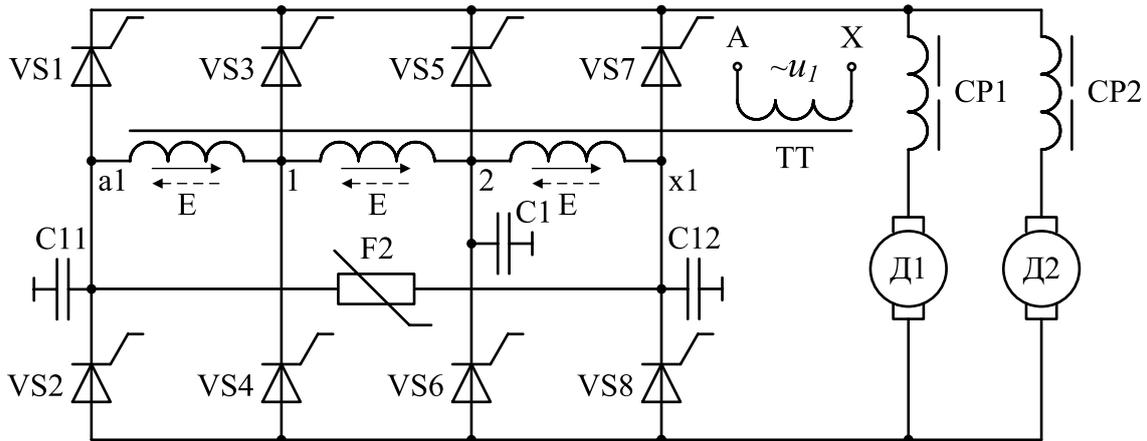


Рис. 1. Упрощенная принципиальная схема силовой цепи электровоза переменного тока с штатным тиристорным ВИП:

ТТ — тяговый трансформатор; *A-X* — выводы первичной обмотки ТТ;
 $\sim u_1$ — напряжение *A-X*; *a1-1-2* — выводы вторичной обмотки ТТ на 315 В;
2-x1 — вывод вторичной обмотки ТТ на 630 В; *VS1-VS8* — тиристорные плечи;
CP1, CP2 — сглаживающие реакторы; *D1, D2* — тяговые двигатели;
E — ЭДС вторичных обмоток ТТ

ТАБЛИЦА 1. Типовой алгоритм управления тиристорами плеч штатного ВИП электровоза переменного тока

Номер зоны	Полупериод	Алгоритм подачи импульсов на тиристоры плеч ВИП							
		Плечи ВИП							
		VS1	VS2	VS3	VS4	VS5	VS6	VS7	VS8
I	→				α_p	$\alpha_0 \alpha_p$			
	←			α_0				α_p	

к амплитудному значению выпрямленного напряжения (рис. 2, а). Можно отметить, что на вторичной обмотке тягового трансформатора электровоза с тиристорным ВИП установлены конденсаторы C11, C12 и C1 и ограничитель перенапряжений F2 (рис. 1), однако выполняющие роль только защиты от атмосферных перенапряжений и не предназначенные для гашения колебаний, возникающих из-за коммутации тириستоров.

А вот транзисторный ВИП, представленный на рис. 3, однозначно может снизить

межпоездной интервал времени при вождении поездов по технологии «Виртуальная сцепка». Алгоритм управления транзисторами плеч ВИП, представленный в табл. 2, обеспечивает относительно высокий коэффициент мощности на первой зоне регулирования выпрямленного напряжения. Диаграмма управления $U_{упр}$, представленная на рис. 4, б, позволяет симметризовать амплитудные значения потребляемого тока с амплитудными значениями переменного напряжения.

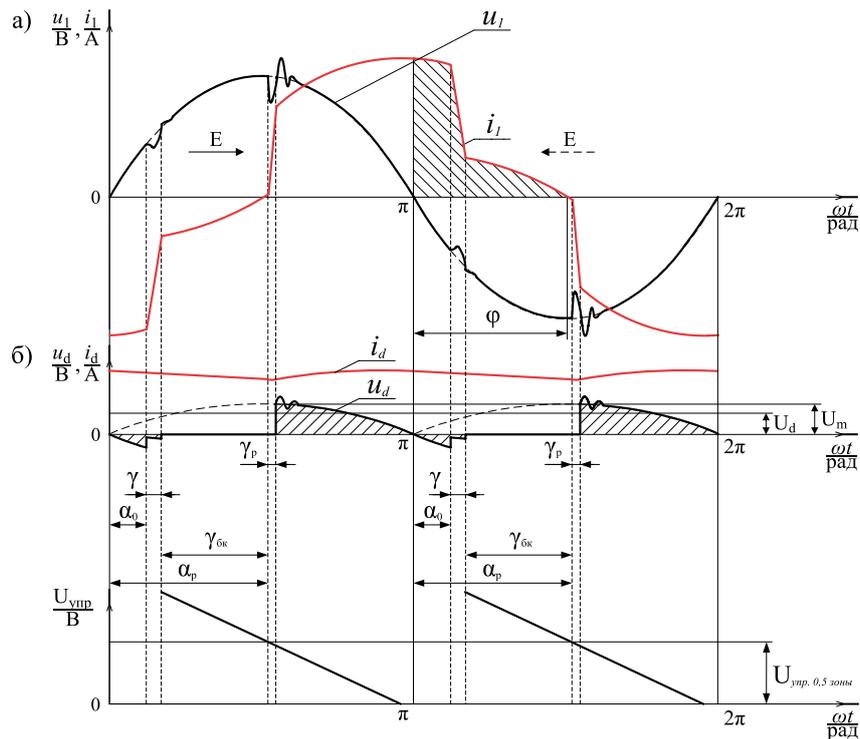


Рис. 2. Электромагнитные процессы на токоприемнике (а) и в силовой цепи (б) электровоза переменного тока с тиристорным ВИП на 0,5 зоны регулирования выпрямленного напряжения ($K_m = 0,49$): u_1, i_1 — напряжение и ток на токоприемнике; u_d, i_d — выпрямленные напряжение и ток; E — направление ЭДС; φ — сдвиг фазы; U_d — средневыврямленное напряжение; U_m — амплитудное выпрямленное напряжение; $U_{упр}$ — диаграмма управления; γ — сетевая коммутация; γ_p — фазная коммутация; $\gamma_{бк}$ — буферный контур; α_0 — нерегулируемый по фазе импульс управления; α_p — регулируемый по фазе импульс управления

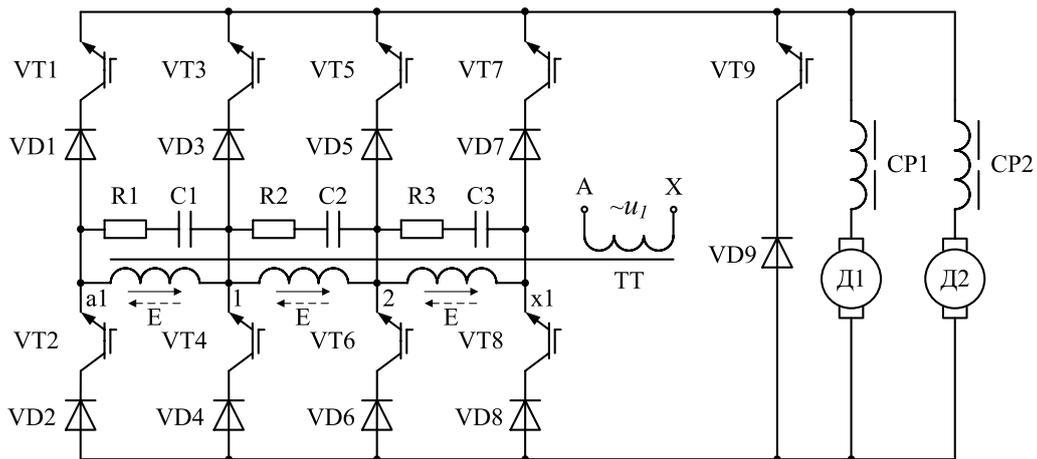


Рис. 3. Упрощенная принципиальная схема силовой цепи электровоза переменного тока с ВИП на базе IGBT-транзисторов:
 $VT1-VT9$ — транзисторные плечи; $VD1-VD9$ — диодные плечи;
 $R1-R3$ — снабберные резисторы; $C1-C3$ — снабберные конденсаторы

ТАБЛИЦА 2. Алгоритм управления транзисторами плеч ВИП и девятым разрядным плечом электровоза переменного тока

Номер зоны	Полупериод	Алгоритм подачи управляющего напряжения на транзисторы плеч ВИП								
		Плечи ВИП								
		VT1	VT2	VT3	VT4	VT5	VT6	VT7	VT8	VT9
I	→				α_{reg}	α_{reg}				α_D
	←			α_{reg}			α_{reg}			α_D

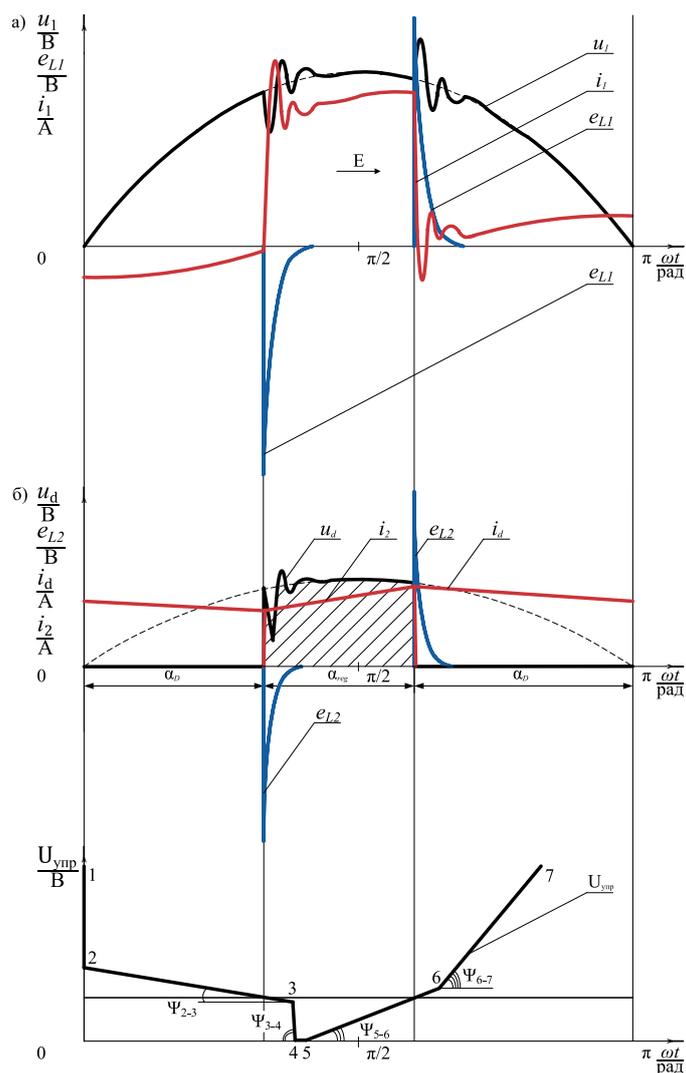


Рис. 4. Электромагнитные процессы на токоприемнике (а) и в силовой цепи (б) электровоза переменного тока с транзисторным ВИП на 0,5 зоны регулирования выпрямленного напряжения ($K_m = 0,84$):

α_{reg} — временная зона регулирования открытия транзисторов плеч ВИП;
 α_D — временная зона работы транзисторов плеча VT9; Ψ — углы наклона диаграммы управления транзисторами; 1–7 — интервалы $U_{упр}$

Однако при таком алгоритме коммутация транзисторов плеч ВИП при включении и выключении также может происходить вблизи середины полупериода питающего напряжения тяговой сети, как показано на рис. 4, б. В результате этого практически мгновенно изменяются токи i_1 и i_2 , возникают выбросы ЭДС самоиндукции обмоток ТТ e_{L1} и e_{L2} (рис. 4 а, б), что вызывает колебания напряжения и тока на токоприемнике (рис. 4, а), увеличивается коэффициент гармонических составляющих напряжения по сравнению с тиристорным ВИП и может превышать предельно допустимое по ГОСТ 32144-2013 значение 5%.

Колебания напряжения при работе транзисторного ВИП обусловлены коммутацией тока транзисторов. В процессе включения и выключения транзисторов плеч ВИП происходит затухающий процесс заряда и разряда снабберных конденсаторов С1–С3 значительной емкости [18], искажающий форму питающего напряжения тяговой сети. Несмотря на это, использовать транзисторы в плечах ВИП без снабберных цепей нецелесообразно, так как колебания в таком случае могут вывести их из строя [19]. Помимо этого, при существующем алгоритме работы транзисторного ВИП искажается форма тока на токоприемнике электровоза (рис. 4, а).

С момента появления первых электровозов переменного тока с плавным регулированием напряжения и статическими преобразователями, генерирующих помехи в тяговой сети, предлагалось множество технических решений по повышению КЭ на их токоприемниках. Одним из них является способ разнофазного управления (РФУ), заключающийся в изменении алгоритма работы тиристорных плеч ВИП [20–23]. При таком способе управления момент включения тиристорных

плеч одного ВИП, образующих зону регулирования, сдвигается относительно момента включения тиристорных плеч другого ВИП внутри одной секции на угол $\alpha_{РФУ}$, при этом сдвиги углов управления чередуются по полупериодам. Таким образом, за счет наложения колебаний напряжения в противофазе (показано в круге на рис. 5) обеспечивается гашение определенной гармоники и снижается амплитуда ЭДС самоиндукции на токоприемнике благодаря увеличению времени спада и возрастания тока i_1 . Угол $\alpha_{РФУ}$ рассчитывается для определенных параметров тяговой сети и конкретного местоположения электровоза на фидерной зоне по формуле (1) [24, 25]:

$$\alpha_{РФУ} = \frac{180 \cdot f_c}{\frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{C_{кc} (L_{тп} + L_{тг} + L_{вт} + L_{кc} \cdot l + L')}}}, \quad (1)$$

где $\alpha_{РФУ}$ — угол сдвига по фазе моментов включения тиристорных плеч ВИП;

f_c — частота питающего напряжения;

$C_{кc}$ — распределенная емкость контактной сети;

$L_{тг}$ — индуктивность тягового трансформатора;

$L_{тп}$ — индуктивность тяговой подстанции;

$L_{вт}$ — индуктивность цепи выпрямленного тока;

$L_{кc}$ — индуктивность контактной сети;

L' — индуктивность, вызванная поверхностным эффектом;

l — расстояние от электровоза до ближайшей тяговой подстанции.

Наиболее эффективным является вариант РФУ, при котором моменты включения тиристорных плеч ВИП сдвигаются друг относительно друга на величину $\alpha_{РФУ}/2$ (рис. 5) [15, 26, 27]. Это позволяет сохранить

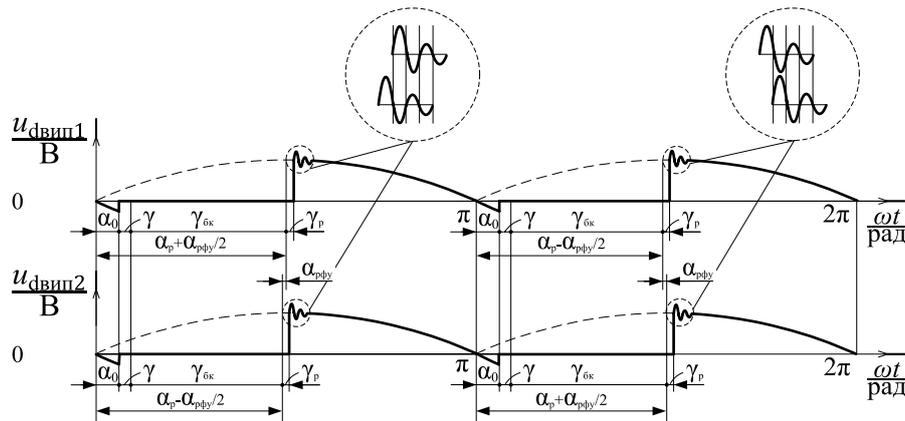


Рис. 5. Временная диаграмма работы тиристорного ВИП электровоза по алгоритму РФУ со сдвигами $\alpha_{рфУ}/2$ на первой зоне регулирования

средневыпрямленное напряжение на уровне типового алгоритма управления тиристорами плеч ВИП.

Опираясь на существующие способы РФУ [15, 20–27], для повышения КЭ на токоприемнике электровоза переменного тока с транзисторными ВИП на первой зоне регулирования предлагается способ разнесенного управления преобразователями (РУП) (рис. 6). Суть способа заключается 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 $\alpha_{рфУ}$ с чередованием их по полупериодам. РУП для транзисторного ВИП выводит его на новый качественный уровень, так как позволяет эффективно устранять колебания различной амплитуды и частоты.

Выводы:

– эксплуатация электровозов с тиристорными ВИП (с коэффициентом мощности в среднем 0,49 на 0,5 зоны регулирования

выпрямленного напряжения) является на сегодня сдерживающим фактором полноценного использования новой технологии «Виртуальная сцепка» на Восточном полигоне;

– эксплуатация электровозов с транзисторными ВИП (с коэффициентом мощности в среднем 0,84 на 0,5 зоны регулирования выпрямленного напряжения) может существенно сократить время межпоездного интервала при использовании новой технологии «Виртуальная сцепка» на Восточном полигоне;

– предлагаемый способ РУП для электровоза с транзисторными ВИП на первой зоне регулирования позволит снизить гармонические составляющие тока и напряжения на токоприемнике электровоза ниже уровня гармоник, создаваемых работой тиристорного ВИП за счет разнесения моментов включения и выключения транзисторов плеч ВИП.

В дальнейшей работе авторы планируют провести исследования способа РУП на математической модели электрической системы «тяговая подстанция — контактная сеть — электровоз переменного тока с транзисторными ВИП».

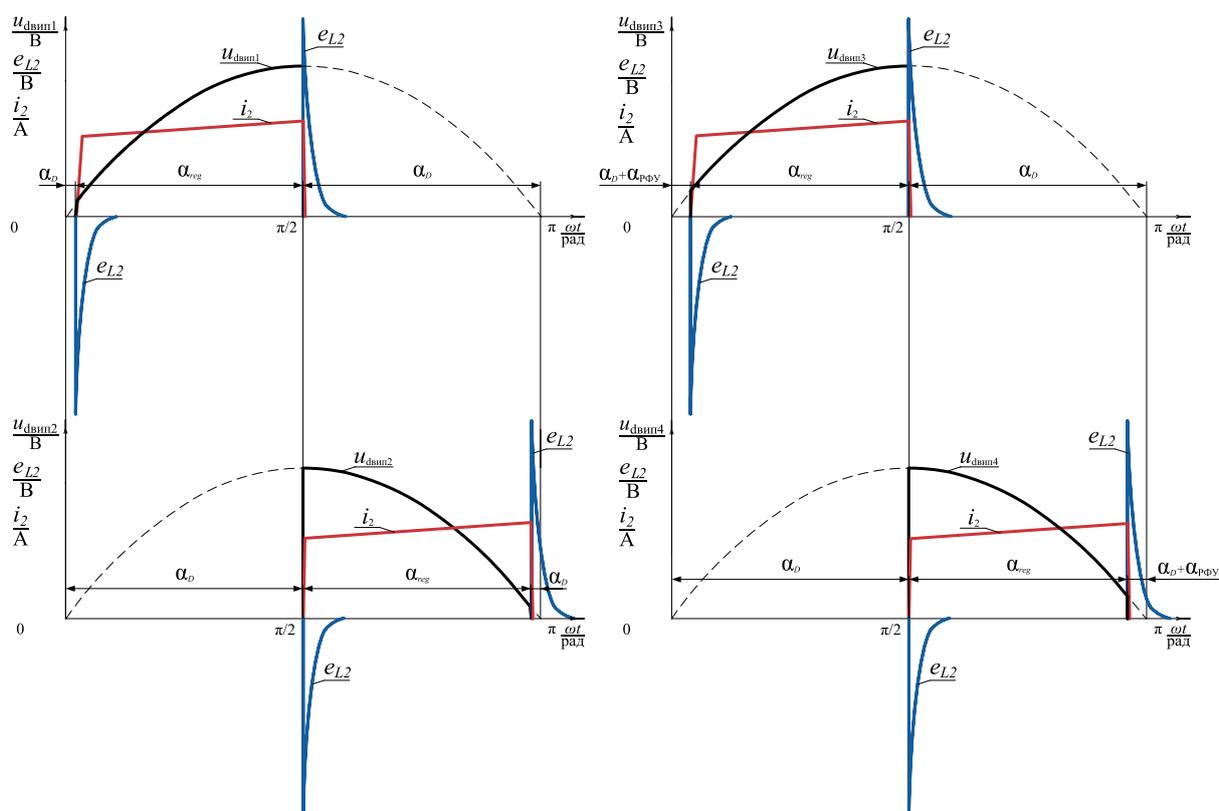


Рис. 6. Временная диаграмма работы транзисторных ВИП электровоза переменного тока по способу разнесенного управления на 0,5 зоны регулирования выпрямленного напряжения

Статья подготовлена в рамках государственного задания по государственной работе «Проведение прикладных научных исследований» на тему «Разработка цифрового двойника колесно-моторного блока электровоза «Ермак» серии 2(3)ЭС5К» № 1023033100293-1-2.1.5 от 03.07.2023 года. Этап 1: «Цифровой двойник колесно-моторного блока электровоза серии «Ермак» для увеличения пропускной способности Восточного полигона при реализации тяжеловесного движения».

Библиографический список

1. Совещание по развитию отдельных направлений транспортного комплекса [Электронный ресурс]. URL: <http://kremlin.ru/events/president/news/68468> (дата обращения: 16.02.2024).

2. Виртуальная сцепка поездов позволит увеличить пропускную способность Восточного полигона [Электронный ресурс]. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=200681> (дата обращения: 16.02.2024).

3. Виртуальная сцепка ускоряет движение [Электронный ресурс]. URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1594451> (дата обращения: 16.02.2024).

4. Виртуальная сцепка повысила пропускную способность [Электронный ресурс]. URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1575196> (дата обращения: 16.02.2024).

5. Виртуальную сцепку показали в реальном времени [Электронный ресурс]. URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1571259&archive=2021.07.08> (дата обращения: 16.02.2024).

6. Кулинич Ю. М., Дроглов Д. Ю. Исследование электромагнитных процессов в системе «контактная сеть — электровоз» при уменьшении минимального угла открытия тиристорov в выпрямительно-инверторном преобразователе // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта 2020. Т. 79, № 2. С. 93–102.
7. Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава: труды Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Красноярск, 24–25 марта 2020 года; под ред. И. К. Лакина. Красноярск: Акционерное общество «Дорожный центр внедрения Красноярской железной дороги», 2020. 360 с.
8. Мельниченко О. В., Цыбульский В. С., Чикиркин О. В. Повышение качества электрической энергии в контактной сети с целью снижения отказов электронного и силового электрооборудования электровоза // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2008. № 3 (19). С. 58–64.
9. Яговкин Д. А. Совершенствование выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза переменного тока и принципа его управления в режиме тяги: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2016. 162 с.
10. Яговкин Д. А., Мельниченко О. В., Портной А. Ю. Разработка нового энергосберегающего алгоритма управления ВИП электровоза на IGBT-модулях // Вестник института тяги и подвижного состава. 2013. № 9. С. 17–24.
11. 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 и др. // Наука и техника транспорта. 2014. № 3. С. 46–51.
12. Структура математической модели выпрямительно-инверторного преобразователя на IGBT-транзисторах для электровоза переменного тока в режиме тяги / Яговкин Д. А., Портной А. Ю., Мельниченко О. В. 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.
13. Яговкин Д. А., Мельниченко О. В. Экспериментальный стенд для исследования процессов работы тиристорного и транзисторного выпрямительно-инверторных преобразователей электровоза переменного тока в режиме тяги на высших зонах регулирования // Вестник ИрГТУ / Иркутский нац. иссл. тех. ун-т. Иркутск, 2014. № 5. С. 119–126.
14. ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». М.: Стандартинформ, 2014. 19 с.
15. Мельниченко О. В., Власьевский С. В. Повышение энергетической эффективности электровоза переменного тока в режиме тяги с помощью разнофазного управления выпрямителями на первой зоне регулирования // Электроника и электрооборудование транспорта. 2014. № 3. С. 26–30.
16. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: уч. для бакалавров, 12-е изд., исправ. и доп. М.: Юрайт, 2016. 701 с.
17. Власьевский С. В. Повышение эффективности выпрямительно-инверторных преобразователей электровозов переменного тока с рекуперативным торможением: дис. ... докт. техн. наук. Хабаровск, 2001. 396 с.
18. Шаров В. И. Радиотехника; предисл. ред. и некролог «Памяти В. И. Шарова»: проф. Н. Н. Циклинский. М.; Л.: Кубуч, 1934. 544 с.
19. Линьков А. О. Исследование цепей защиты от коммутационных перенапряжений выпрямительной установки возбуждения электровоза на IGBT-транзисторах // Вестник ИрГТУ. 2014. № 5 (88).

20. Тихменев Б. Н., Кучумов В. А. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями. М.: Транспорт, 1988. 311 с.
21. Кучумов В. А., Находкин В. В., Широченко Н. Н. Техничко-экономические показатели тиристорных электровозов переменного тока с разнофазным управлением // Вестник ВНИИЖТ. 1987. № 3. С. 15–18.
22. Испытания электровоза ВЛ85 с разнофазным управлением выпрямительно-инверторными преобразователями / Ю. М. Кулинич, В. В. Находкин, Н. Н. Широченко и др. // Вестник ВНИИЖТ. 1986. № 4. С. 23–26.
23. Тихменев Б. Н., Фроленков И. Н. Мешающее влияние на связь при разнофазном регулировании напряжения тяговых двигателей // Вестник ВНИИЖТ. 1972. № 1. С. 1–5.
24. Мельниченко О. В., Газизов Ю. В. Испытание адаптивной системы разнофазного управления электровоза ВЛ80Р // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке: труды Всероссийской молодежной научно-практической конференции с международным участием. ДВГУПС. 2011. Т. 1. С. 18–23.
25. Газизов Ю. В. Повышение качества электрической энергии в тяговой сети при работе электровоза переменного тока с адаптивной системой разнофазного управления в режиме тяги: дис. ... канд. техн. наук. Хабаровск, 2011. 222 с.
26. Мельниченко О. В., Власьевский С. В. Энергосберегающий алгоритм разнофазного управления четырехзонного выпрямительного преобразователя электровоза // Электроника и электрооборудование транспорта. 2014. № 4. С. 13–19.
27. Мельниченко О. В. Повышение энергетической эффективности тяговых электроприводов электровозов переменного тока: дис. ... докт. техн. наук. Хабаровск, 2015. 392 с.

Дата поступления: 19.01.2024

Решение о публикации: 21.02.2024

Контактная информация:

ГРИГОРЕНКО Павел Владимирович — аспирант;
grigorenko.pv@mail.ru

МЕЛЬНИЧЕНКО Олег Валерьевич — докт. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроподвижной состав»; olegmelnval@mail.ru

ПОРТНОЙ Александр Юрьевич — докт. физ.-мат. наук, доцент, профессор кафедры «Физика, механика и приборостроение»; portnoy_alexander@mail.ru

САМОЙЛОВА Анастасия Сергеевна — аспирант;
a.s.samoilova@mail.ru

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. Samoiloa

Irkutsk State Transport University, 15, Chernyshevskogo str., Irkutsk, 664074, Russia

For citation: Development of a method for spaced control of transistor traction converters of an electric locomotive in the first rectified voltage regulation zone / Grigorenko P. V., Mel'nichenko O. V., Portnoy A. Yu., Samoiloa A. S. // Proceedings of Petersburg Transport University, 2024. Vol. 21, iss. 1. P. 252–264. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-01-252-264

Abstract

Objective: to develop a way to improve the quality of electricity on the current collector of an alternating current electric locomotive when it is operating in the first control zone with transistor traction converters. **Methods:** the electromagnetic processes on the current collector and in the power circuit of an alternating current electric locomotive with thyristor and transistor traction converters are analyzed, their comparison is made according to the criterion of distortion of the quality of electricity on the current collector. The electromagnetic processes on the current collector and in the power circuit of an alternating current electric locomotive with transistor traction converters operating according to the proposed method — spaced control are analyzed. **Results:** the causes of voltage and current fluctuations on the current collector of an alternating current electric locomotive with a transistor traction converters in the first rectified voltage regulation zone have been identified. A method of spaced control of transistor traction converters has been developed, which allows reducing the total coefficient of harmonic components of current and voltage on the current collector of an alternating current electric locomotive. **Practical importance:** the developed method of spaced control can be used on AC electric locomotives after their conversion to transistor traction converters, as well as in the design of new electric locomotives.

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

References

1. Soveshhanie po razvitiyu otdel'nykh napravlenij transportnogo kompleksa [Jelektronnyj resurs]. URL: <http://kremlin.ru/events/president/news/68468> (data obrashhenija: 16.02.2024). (In Russian)
2. Virtual'naja scepka poezdov pozvolit uvelichit' propusknuju sposobnost' Vostochnogo poligona [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=200681> (data obrashhenija: 16.02.2024). (In Russian)
3. Virtual'naja scepka uskorjaet dvizhenie [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1594451> (data obrashhenija: 16.02.2024). (In Russian)
4. Virtual'naja scepka povysila propusknuju sposobnost' [Jelektronnyj resurs]. URL: [https://gudok.ru/news-](https://gudok.ru/news-paper/?ID=1575196)
5. Virtual'nuju scepku pokazali v real'nom vremeni [Jelektronnyj resurs]. URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1571259&archive=2021.07.08> (data obrashhenija: 16.02.2024). (In Russian)
6. Kulinich Ju. M., Drogolov D. Ju. Issledovanie jelektromagnitnykh processov v sisteme «kontaktnaja set' — jelektrovoz» pri umen'shenii minimal'nogo ugla otkrytija tiristorov v vyprjatel'no-invertornom preobrazovatele // Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta 2020. T. 79, № 2. S. 93–102. (In Russian)
7. Jekspluatacija i obsluzhivanie jelektronnogo i mikroprocessornogo oborudovanija tjagovogo podvizh-

nogo sastava: trudy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, Krasnojarsk, 24–25 marta 2020 goda; pod red. I. K. Lakina. Krasnojarsk: Akcionernoe obshhestvo «Dorozhnyj centr vnedrenija Krasnojarskoj zheleznoj dorogi», 2020. 360 s. (In Russian)

8. Mel'nichenko O. V., Cybul'skij V. S., Chikirkin O. V. Povysenie kachestva jelektricheskoy jenerгии v kontaktnoj seti s cel'ju snizhenija otkazov jelektronogo i silovogo jelektooborudovanija jelektovoza // Sovremennye tehnologii. Sistemyj analiz. Modelirovanie. 2008. № 3 (19). S. 58–64. (In Russian)

9. Jagovkin D. A. Sovershenstvovanie vyprjatel'no-invertornogo preobrazovatelja jelektovoza peremennogo toka i principa ego upravlenija v rezhime tjagi: dis. ... kand. tehn. nauk. SPb., 2016. 162 s. (In Russian)

10. Jagovkin D. A., Mel'nichenko O. V., Portnoj A. Ju. Razrabotka novogo jenergosberegajushhego algoritma upravlenija VIP jelektovoza na IGBT-moduljah // Vestnik instituta tjagi i podvizhnogo sastava. 2013. № 9. S. 17–24. (In Russian)

11. Novyj vyprjatel'no-invertornyj preobrazovatel' dlja tjagovogo podvizhnogo sastava peremennogo toka s povyshennymi jenergeticheskimi harakteristikami v rezhime tjagi / D. A. Jagovkin, O. V. Mel'nichenko, A. Ju. Portnoj i dr. // Nauka i tehnika transporta. 2014. № 3. S. 46–51. (In Russian)

12. Struktura matematicheskoy modeli vyprjatel'no-invertornogo preobrazovatelja na IGBT-tranzistorah dlja jelektovoza peremennogo toka v rezhime tjagi / Jagovkin D. A., Portnoj A. Ju., Mel'nichenko O. V. i dr. // Jelektroprivod na transporte i v promyshlennosti: trudy II Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii, Habarovsk, 20–21 sentjabrja 2018 goda. Habarovsk: Dal'nevostochnyj gosudarstvennyj universitet putej soobshhenija, 2018. S. 121–129. (In Russian)

13. Jagovkin D. A. Mel'nichenko O. V. Jeksperimental'nyj stend dlja issledovanija processov raboty tiristornogo i tranzistornogo vyprjatel'no-invertornyh

preobrazovatelej jelektovoza peremennogo toka v rezhime tjagi na vysshih zonah regulirovanija // Vestnik IrGTU / Irkutskij nac. issl. teh. un-t. Irkutsk, 2014. № 5. S. 119–126. (In Russian)

14. GOST 32144-2013 «Jelektricheskaja jenergija. Sovmestimost' tehnicheskikh sredstv jelektricheskaja. Normy kachestva jelektricheskoy jenerгии v sistemah jelektricheskogo snabzhenija obshhego naznachenija». M.: Standartinform, 2014. 19 s. (In Russian)

15. Mel'nichenko O. V., Vlas'evskij S. V. Povysenie jenergeticheskoy jeffektivnosti jelektovoza peremennogo toka v rezhime tjagi s pomoshh'ju raznofaznogo upravlenija vyprjateljami na pervoj zone regulirovanija // Jelektronika i jelektooborudovanie transporta. 2014. № 3. S. 26–30. (In Russian)

16. Bessonov L. A. Teoreticheskie osnovy jelektricheskoi tehniki. Jelektricheskie cepi: uch. dlja bakalavrov, 12-e izd., isprav. i dop. M.: Jurajt, 2016. 701 s. (In Russian)

17. Vlas'evskij S. V. Povysenie jeffektivnosti vyprjatel'no-invertornyh preobrazovatelej jelektovozov peremennogo toka s rekuperativnym tormozheniem: dis. ... dokt. tehn. nauk. Habarovsk, 2001. 396 s. (In Russian)

18. Sharov V. I. Radiotekhnika; predisl. red. i nekrolog «Pamjati V. I. Sharova»: prof. N. N. Ciklinskij. M.; L.: Kubuch, 1934. 544 s.

19. Lin'kov A. O. Issledovanie cepej zashhity ot kommutacionnyh perenaprjazhenij vyprjatel'noj ustanovki vozbuzhdenija jelektovoza na IGBT-tranzistorah // Vestnik IrGTU. 2014. № 5 (88). (In Russian)

20. Tihmenev B. N., Kuchumov V. A. Jelektrovozy peremennogo toka s tiristornymi preobrazovateljami. M.: Transport, 1988. 311 s. (In Russian)

21. Kuchumov V. A., Nahodkin V. V., Shirochenko N. N. Tehniko-jekonomicheskie pokazateli tiristornyh jelektovozov peremennogo toka s raznofaznym upravleniem // Vestnik VNIIZhT. 1987. № 3. S. 15–18. (In Russian)

22. Ispytanija jelektovoza VL85 s raznofaznym upravleniem vyprjatel'no-invertornymi preobrazo-

vateljami / Ju. M. Kulinich, V. V. Nahodkin, N. N. Shirochenko i dr. // Vestnik VNIIZhT. 1986. № 4. S. 23–26. (In Russian)

23. Tihmenev B. N., Frolenkov I. N. Meshajushhee vliyanie na svjaz' pri raznofaznom regulirovanii naprjazhenija tjagovyh dvigatelej // Vestnik VNIIZhT. 1972. № 1. S. 1–5. (In Russian)

24. Mel'nichenko O. V., Gazizov Ju. V. Ispytanie adaptivnoj sistemy raznofaznogo upravlenija jelektrovoza VL80R // Nauchno-tehnicheskoe i jekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke: trudy Vserossijskoj molodezhnoj nauchno-prakticheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. DVGUPS. 2011. T. 1. S. 18–23. (In Russian)

25. Gazizov Ju. V. Povyshenie kachestva jelektricheskoy jenergii v tjagovoj seti pri rabote jelektrovoza peremennogo toka s adaptivnoj sistemoj raznofaznogo upravlenija v rezhime tjagi: dis. ... kand. tehn. nauk. Habarovsk, 2011. 222 s. (In Russian)

26. Mel'nichenko O. V., Vlas'evskij S. V. Jenergosberegajushhij algoritm raznofaznogo upravlenija chetyrehzonnogo vyprjamitel'nogo preobrazovatelja

jelektrovoza // Jelektronika i jelektrooborudovanie transporta. 2014. № 4. S. 13–19. (In Russian)

27. Mel'nichenko O. V. Povyshenie jenergeticheskoy jeffektivnosti tjagovyh jelektroprivodov jelektrovozov peremennogo toka: dis. ... dokt. tehn. nauk. Habarovsk, 2015. 392 s. (In Russian)

Received: 19.01.2024

Accepted: 21.02.2024

Author's information:

Pavel V. GRIGORENKO — Postgraduate Student;
grigorenko.pv@mail.ru

Oleg V. MEL'NICHENKO — Dr. Sci. in Engineering,
Full Professor, Head of the Department of Electric
Rolling Stock; olegmelnval@mail.ru

Aleksandr Yu. PORTNOY — Dr. Sci. in Physical
and Mathematical, Associate Professor, Professor
of the Department Physics, Mechanics and Instrument
Engineering; portnoy_alexander@mail.ru

Anastasia S. SAMOILOVA — Postgraduate Student;
a.s.samoilova@mail.ru