



Информация об авторах

Authors

Маловецкая Екатерина Викторовна – к. т. н., доцент кафедры управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: MalovetskayEV@mail.ru

Ekaterina Viktorovna Malovetskaya – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof. at the Subdepartment of Management of Operational Work, Irkutsk State Transport University, e-mail: MalovetskayEV@mail.ru

Для цитирования

For citation

Маловецкая Е. В. Использование имитационного моделирования при принятии решений по оперативной корректировке плана формирования диспетчерским аппаратом станций и региональных дирекций // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 62, № 2. – С. 155–166. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).155–166

Malovetskaya E. V. Ispol'zovanie imitatsionnogo modelirovaniya pri prinyatii reshenii po operativnoi korrektyrovke plana formirovaniya dispatcherskim apparatom stantsii i regional'nykh direktsii [The use of imitation modeling for decision-making on immediate correction of the plan of stations and regional directorates formed by the dispatcher office]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2019. Vol. 62, No. 2. Pp. 155–166. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).155–166

УДК 629.423

DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).166–177

С. А. Богинский¹, О. В. Мельниченко², А. О. Линьков²

¹ Дирекция тяги (филиал ОАО «РЖД»), г. Москва, Российская Федерация

² Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

Дата поступления: 09 марта 2019 г.

ПОВЫШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ЗА СЧЕТ НОВОЙ ОРГАНИЗАЦИИ СЕТЕВОЙ КОММУТАЦИИ ПЛЕЧ ВЫПРЯМИТЕЛЬНО-ИНВЕРТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Аннотация. Приведен анализ накопленного опыта в использовании разрядного диодного плеча с целью повышения энергетических характеристик тягового режима отечественных электровазозов переменного тока. Предложен новый подход в применении разрядного плеча, являющийся дальнейшим развитием технического решения и подразумевающий реорганизацию алгоритма управления тиристорными плечами преобразователей электровазоза. Положительный эффект в таком случае достигается не только благодаря уменьшению продолжительности коммутации тиристорных плеч выпрямительно-инверторного преобразователя, но и за счет использования электромагнитной энергии, накапливаемой в цепи выпрямленного тока, для закрытия отработавших плеч через контур разрядного плеча. Проведено сравнительное математическое моделирование электромагнитных процессов работы типового и предлагаемого преобразователей в режиме тяги, результаты которого представлены в форме рисунков и сводной таблицы. Предлагаемый выпрямительно-инверторный преобразователь был исследован при различных углах открытия тиристорных плеч, которые принимались равными 9, 15, 20 и 26 электрических градусам. При анализе результатов моделирования видно, что наибольший эффект достигается при угле открытия, составляющем 26 электрических градусов, когда разрядное плечо полностью закрывает ранее проводившие ток тиристорные плечи. Результаты проведенного исследования представлены в форме перечня выводов. Коммутация тиристорных плеч выпрямительно-инверторного преобразователя с разрядным диодным плечом при угле открытия в 26 электрических градусов протекает в три раза быстрее по сравнению с типовой благодаря обеспечению избыточных потенциальных условий и устойчивой работы тиристорных плеч. Подобная организация коммутации изменяет назначение угла открытия, который становится управляющим импульсом для перевода тиристорных плеч выпрямительно-инверторного преобразователя из запертого состояния в открытое, при этом исключается возникновение короткого замыкания в секциях вторичной обмотки тягового трансформатора. Полученные при моделировании данные позволяют говорить о достижении положительного эффекта в виде повышения коэффициента мощности электровазоза в среднем на 3,8 % и снижения потерь мощности в плечах преобразователей на 4,5 %.

Ключевые слова: выпрямительно-инверторный преобразователь, преобразовательная техника, алгоритм управления, коммутация, электромагнитные процессы, энергетические показатели электровазоза, коэффициент мощности.



S. A. Boginskii¹, O. V. Melnichenko², A. O. Linkov²

¹ Directorate of traction, JSCo RZD, Moscow, Russian Federation

² Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation

Received: March 09, 2019

INCREASING AC LOCOMOTIVE POWER FACTOR BY REORGANIZING LINE COMMUTATION OF THE RIC ARMS

Abstract. The paper presents an analysis of the existing experience in discharge diode arm application in domestic alternating current electric locomotives to increase traction mode energy performance. A new engineering solution in discharge arm application is proposed that represents further development of the principle and implies reorganization of converter thyristor arms control algorithm. Positive effect of the new solution lies not only in the rectifier-inverter converter (RIC) thyristor arms commutation acceleration, but also includes direct application of electromagnetic energy stored in post-rectification circuit that is used to turn off thyristor arms after their work period through the discharge diode arm. A comparative mathematical modeling of traction mode electromagnetic processes of typical and proposed converters is conducted and displayed by figures and a summary table. The proposed RIC was researched with different turn on angle values set to 9, 15, 20 and 26 electrical degrees. Analysis of the results revealed the highest positive effect at 26 electrical degrees as the discharge arm completely turns off the thyristor arms. Obtained research results are organized into a list of conclusions. RIC thyristor arms commutation is three times faster with a discharge arm and a turn on angle value of 26 electrical degrees as opposed to a type converter, which can be explained by ensuring excessive potential conditions for thyristors and their stable work. The new commutation organization changes the function of turn on angle, which becomes a control impulse responsible for switching RIC thyristor arms from turn off to turn on state while also excluding a possibility of a short-circuit inside power transformer secondary winding sections. The modeling data obtained makes it possible to conclude that a positive effect is achieved in a form of 3.8 % higher electric locomotive power coefficient and 4,5 % lower power loss in the RIC thyristor arms.

Keywords: reversible power converter, converter equipment, control algorithm, commutation, electromagnetic processes, electric locomotive energy performance, power coefficient.

Введение

При создании новых и совершенствовании существующих электровозов переменного тока особое место занимают исследования и разработки с тиристорными выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИП) и системами их управления. На сегодняшний день остаётся актуальной задача повышения энергетических показателей современных отечественных электровозов. Низкий коэффициент мощности K_m электровозов переменного тока со статическими преобразователями ($K_m = 0,84$ в номинальном режиме) вызван существенным сдвигом фаз φ между синусоидами тока и напряжения в первичной обмотке тягового трансформатора. Такая величина угла сдвига φ , в свою очередь, обусловлена значительными величинами нерегулируемого угла α_0 отпирания тиристорных плеч ВИП, а также продолжительностью сетевой коммутации γ тока тиристорных плеч.

Величина угла α_0 в типовых ВИП на эксплуатируемых сегодня электровозах задается не ниже 9 эл. град., что продиктовано необходимостью обеспечения потенциальных условий на анодах тиристорных в самых неблагоприятных условиях эксплуатации, например, при искажении напряжения в контактной сети от нагрузки других электровозов, находящихся на данной фидерной зоне. Продолжительность же сетевой коммутации γ связана с поочередной коммутацией плеч ВИП, что

приводит к увеличению эквивалентного индуктивного сопротивления цепи переменного тока.

Тиристорный ВИП работает на электровозах уже без малого 50 лет, и за это время ведущими учеными и практиками транспортной отрасли было предложено множество технических решений и алгоритмов управления ВИП, повышающих коэффициент мощности электровоза [1–16 и др.]. Однако было бы ошибочно считать эту работу завершённой.

Опыт использования разрядного диодного плеча с целью повышения коэффициента мощности

Один из основных путей повышения K_m состоит в минимизации величины угла открытия α_0 тиристорных плеч ВИП. Величина угла α_0 сказывается на коэффициенте мощности электровоза. Так, при α_0 , равном 9 эл. град. вместо 5, имеет место снижение K_m на 1–2 %, а это соответствует росту реактивной мощности на 2–4 %, что увеличивает общее потребление электрической энергии на тягу поездов [17]. К тому же рост угла α_0 сказывается на уменьшении выпрямленного напряжения на тяговых электродвигателях, что, в свою очередь, снижает скорость электровоза. Сегодня практически все научные труды по развитию и совершенствованию ВИП и алгоритмов их управления направлены на возможность снижения минимального угла α_0 открытия тиристорных плеч ВИП электровоза.

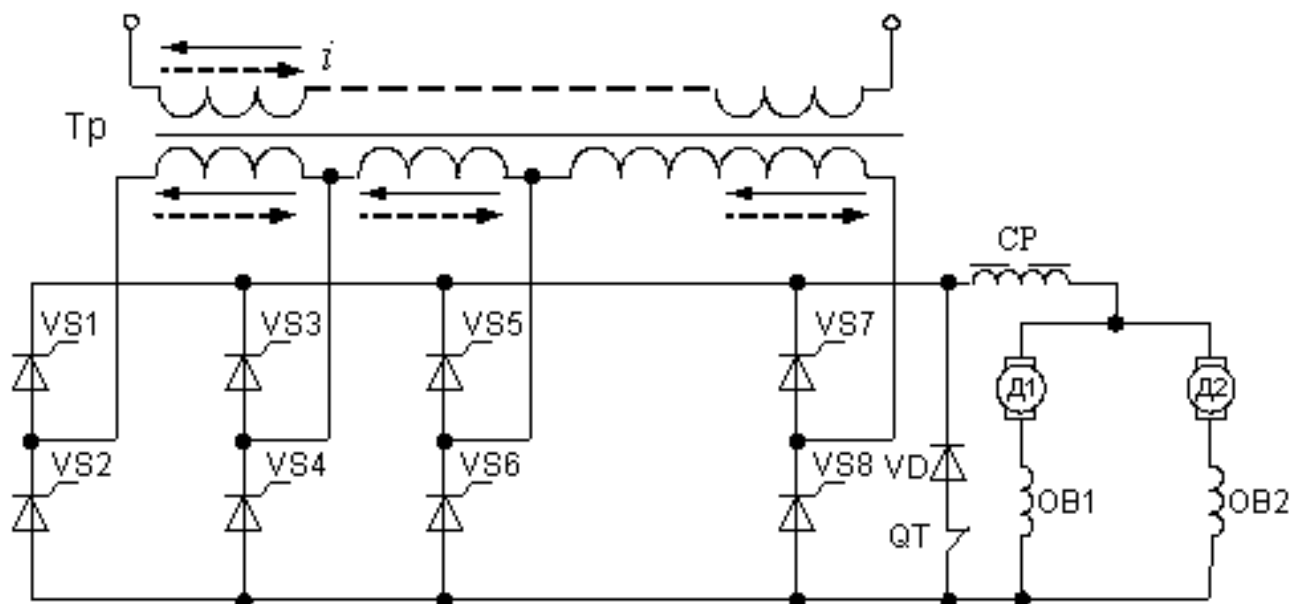


Рис. 1. Четырехзонный выпрямительно-инверторный преобразователь с применением разрядного диодного плеча, включенного параллельно цепи выпрямленного тока

Однако в одной из работ [17] с целью повышения коэффициента мощности авторами предлагается перспективное техническое решение, при котором в цепь выпрямленного тока силовой схемы электровоза дополнительно включается разрядное полупроводниковое (диодное) плечо VD, присоединенное анодом к минусовой шине преобразователя, а катодом – к плюсовой (рис. 1). Включение VD позволяет организовать в алгоритме управления тиристорными плечами ВИП дополнительный буферный контур, через который во время коммутации тока тиристоров разряжается электромагнитная энергия, накопленная в цепи выпрямленного тока на протяжении активного периода работы преобразователя.

Внедрение в схему ВИП разрядного полупроводникового плеча открывает возможность рационализации алгоритма управления тиристорными плечами на первой зоне регулирования с сокращением продолжительности протекания тока через них в каждом полупериоде напряжения сети. Упрощение алгоритма управления заключается в том, что в каждом полупериоде импульсы управления с регулируемым углом отпирания α_p теперь подаются одновременно на два тиристорных плеча с положительной полярностью напряжения. В результате тиристоры больше не выполняют функции разряда электромагнитной энергии, поскольку их алгоритмом управления не предусмотрена организация соответствующего буферного контура; вместо этого накопленная электромагнитная энергия разряжается в каждом полупериоде через

буферный контур разрядного полупроводникового плеча.

При работе на второй и последующих зонах регулирования напряжения разрядное полупроводниковое плечо VD также позволяет добиться положительного эффекта, изменяя характер коммутационных процессов тиристорных плеч. При работе на этих зонах разрядное плечо в начале каждого полупериода напряжения создает буферный контур, через который накопленная в цепи выпрямленного тока электроэнергия разряжается на тяговые электродвигатели.

Использование в цепи разрядного плеча позволяет начинать процессы коммутации тиристорных плеч не с 9 эл. град. и далее, что соответствует углу α_0 , а с самого начала полупериода сетевого напряжения (моменты времени 0, π и т. д.). Благодаря этому уменьшается угол сдвига фаз φ между током и напряжением в первичной обмотке тягового трансформатора, повышается величина выпрямленного напряжения и, как следствие, растет коэффициент мощности электровоза не менее чем на 3 % за счет снижения потребления реактивной энергии [10].

Новый подход в организации сетевой коммутации и сравнительное моделирование электромагнитных процессов

С целью дальнейшего увеличения коэффициента мощности авторами предлагается производить закрытие предыдущих работающих плеч ВИП за счет электромагнитной энергии, накопленной в цепи выпрямленного тока, с использова-



нием буферного контура разрядного плеча. Это, в свою очередь, можно реализовать путем увеличения угла α_0 открытия тиристорных плеч ВИП. Однако остается вопрос, как это повлияет на коэффициент мощности электровоза.

Для изучения энергетических характеристик типового и предлагаемого ВИП (с разрядным плечом и увеличенными углами α_0) была разработана математическая модель электровоза переменного тока в среде имитационного моделирования «Simulink» программного пакета «MATLAB».

Объектом моделирования был выбран электровоз серии 2ЭС5К «Ермак», работающий на участке железной дороги в режиме тяги. Электровоз в модели рассмотрен как комплексная система, включающая нескольких взаимодействующих подсистем: система управления преобразователями, основные агрегаты силовой электрической схемы электровоза и др. Силовая электрическая схема состоит из тягового трансформатора, выпрямительно-инверторных преобразователей, сглаживающих реакторов и тяговых электродвигателей. Для объективного сравнения типового и предлагаемого ВИП исходные параметры математической модели электровоза в обоих случаях приняты одинаковыми.

Модель контактной сети реализована как участок с двусторонней схемой питания от двух тяговых подстанций и выполнена в виде схемы замещения, состоящей из каскадно соединённых Т-образных четырехполюсников. Помимо снабжения модели электровоза питающим напряжением, модель контактной сети призвана также имитировать погонные параметры реальной сети (активное сопротивление и индуктивность сети, распре-

ленная емкость относительно земли, сопротивление, обусловленное током утечки с проводов и изоляторов линий) [18].

По результатам моделирования электромагнитных процессов, отражающих работу электровоза на четвертой зоне регулирования напряжения, получены осциллограммы кривых напряжения контактной сети u_1 и тока в первичной обмотке тягового трансформатора i_1 для типового и предлагаемого ВИП (рис. 2 и 5), а также диаграммы выпрямленного напряжения тягового электродвигателя u_d и тока ВИП i_{eun} (рис. 3 и 6). Представлены также токи тиристорных плеч ВИП в коммутационный и некоммутируемый интервалы времени (рис. 4 и 7). При моделировании получены значения коэффициента мощности K_m электровоза для четвертой зоны регулирования (табл. 1).

Электромагнитные процессы в типовом ВИП при протекании образуют значительные потери энергии. При этом величина угла α_0 значительно влияет на снижение коэффициента мощности преобразователя и, следовательно, электровоза, так как в этот интервал времени электромагнитная энергия цепи постоянного тока направлена в сеть. Затем после подачи угла α_0 при сложившихся минимальных потенциальных условиях начинается коммутация тока, длительность которой составляет 28 эл. град. (рис. 4). Такая затяжная коммутация вызывает значительные потери мощности в короткозамкнутых плечах преобразователя, что оказывает дополнительный негативный эффект на коэффициент мощности электровоза.

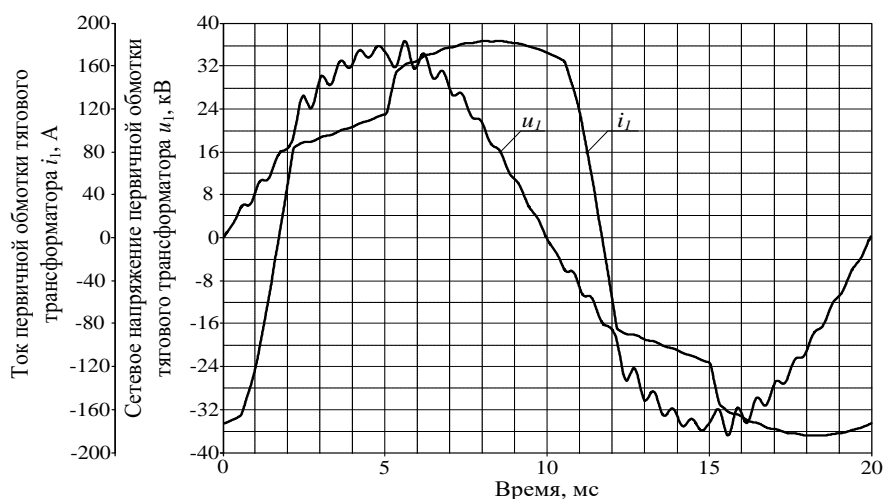


Рис. 2. Форма кривых напряжения и тока в контактной сети с типовым выпрямительно-инверторным преобразователем и алгоритмом управления на четвертой зоне регулирования

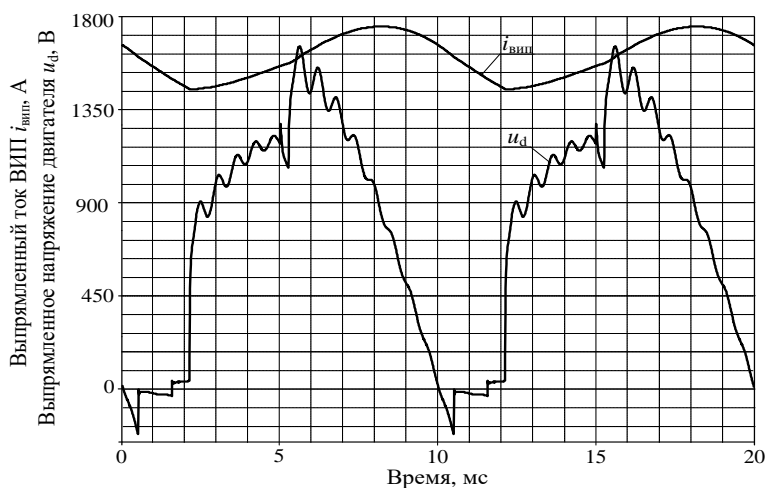


Рис. 3. Диаграммы выпрямленного напряжения и тока при работе типового выпрямительно-инверторного преобразователя на четвертой зоне регулирования

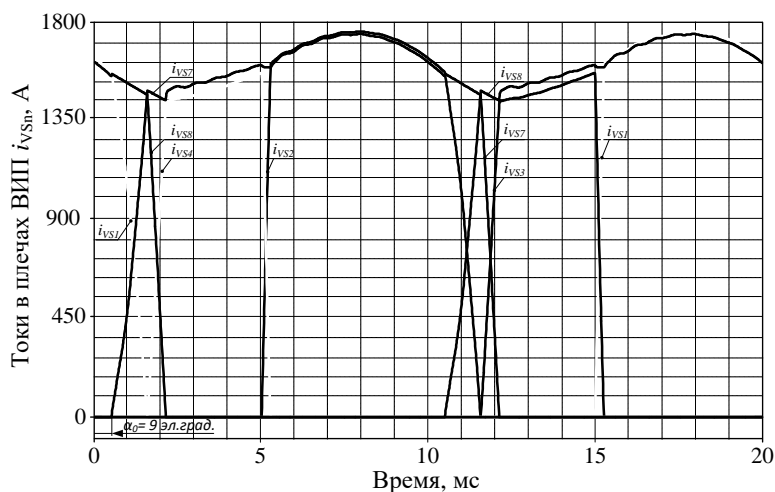


Рис. 4. Диаграммы токов плеч типового выпрямительно-инверторного преобразователя на четвертой зоне регулирования

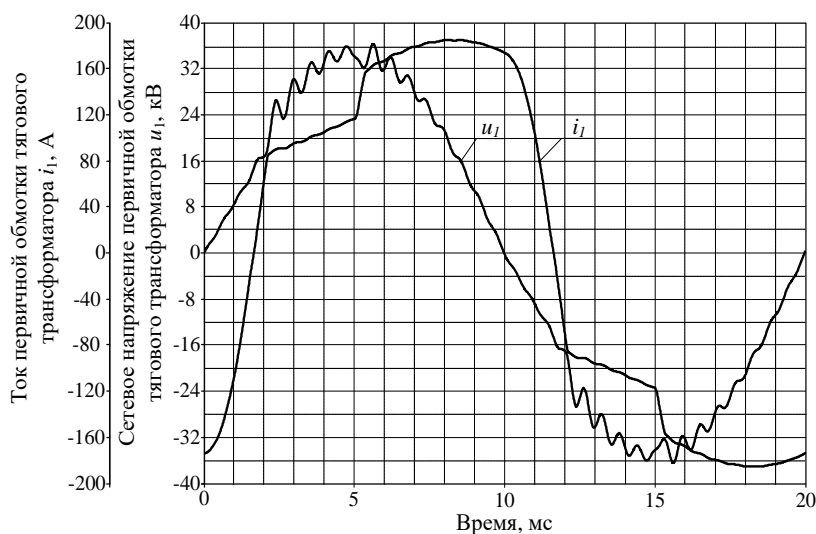


Рис. 5. Форма кривых напряжения и тока в контактной сети с предлагаемым выпрямительно-инверторным преобразователем и алгоритмом управления на четвертой зоне регулирования

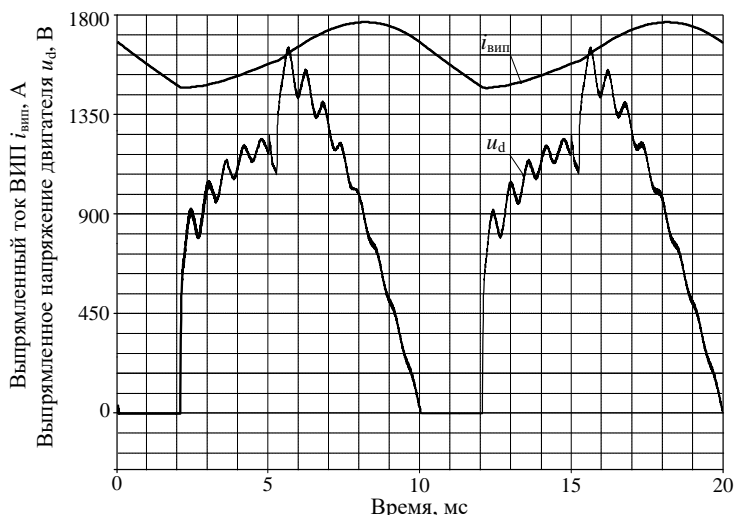


Рис. 6. Диаграммы выпрямленного напряжения и тока при работе предлагаемого выпрямительно-инверторного преобразователя на четвертой зоне регулирования с углом $\alpha_0 = 5$ электрических градусов

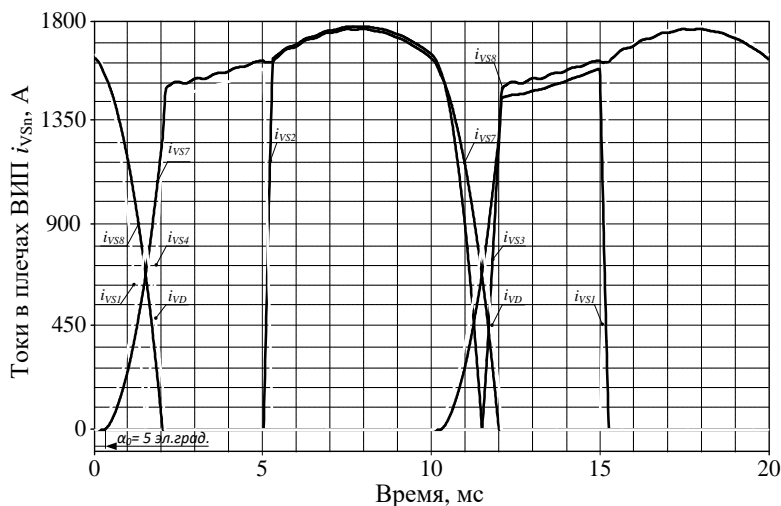


Рис. 7. Диаграммы токов плеч предлагаемого выпрямительно-инверторного преобразователя на четвертой зоне регулирования при $\alpha_0 = 5$ электрических градусов

Таблица 1

Разница коэффициентов мощности при типовом и предлагаемом алгоритмах управления выпрямительно-инверторного преобразователя на примере четвертой зоны регулирования

Алгоритм управления выпрямительно-инверторного преобразователя	Длительность угла α_0 , эл. град.	K_m , отн. ед.	Относительный K_m , %
Типовой	9	0,76	100
Предлагаемый (с диодным плечом VD)	5	0,781	102,8

При включении разрядного диодного плеча параллельно цепи выпрямленного тока облегчается процесс протекания коммутации в плечах ВИП за счет образования буферного контура и перевода через него накопленной электромагнитной энергии на тяговые электродвигатели. При этом природа протекания электромагнитных процессов меняется, и влияние величины α_0 на коэффициент мощности электровоза тоже изменится. Здесь

необходимо провести ряд исследований по эффективности работы ВИП с разрядным диодным плечом при различных величинах угла α_0 .

На математической модели электровоза был исследован предлагаемый ВИП с разрядным диодным плечом при различных углах α_0 открытия тиристорных плеч, которые принимались при каждом моделировании равными 9, 15, 20 и 26 эл. град. (рис. 8–11) соответственно.

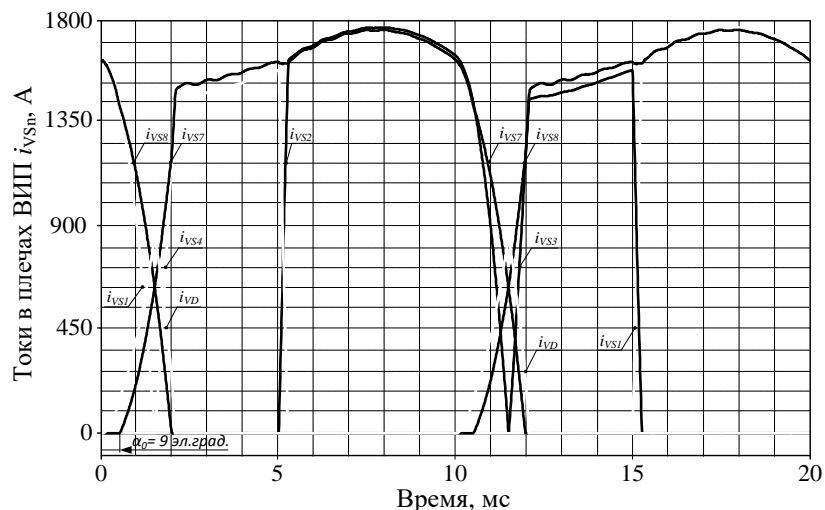


Рис. 8. Диаграммы токов плеч предлагаемого выпрямительно-инверторного преобразователя на четвертой зоне регулирования при $\alpha_0 = 9$ электрических градусов

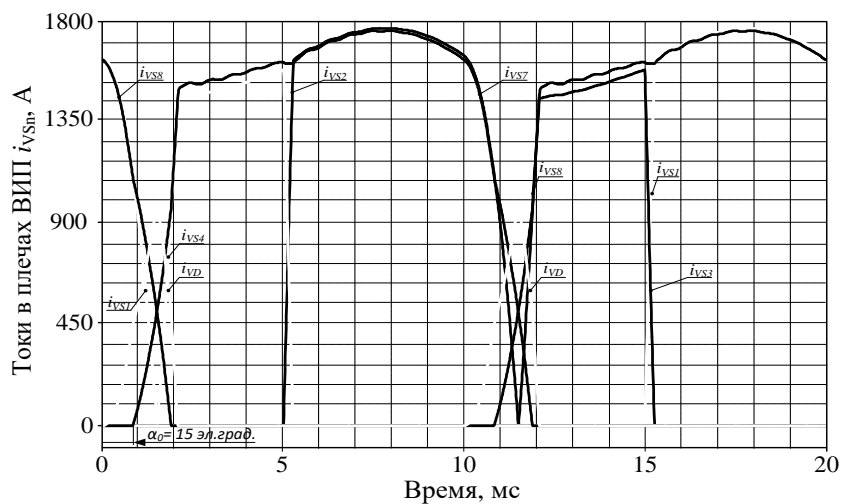


Рис. 9. Диаграммы токов плеч предлагаемого выпрямительно-инверторного преобразователя на четвертой зоне регулирования при $\alpha_0 = 15$ электрических градусов

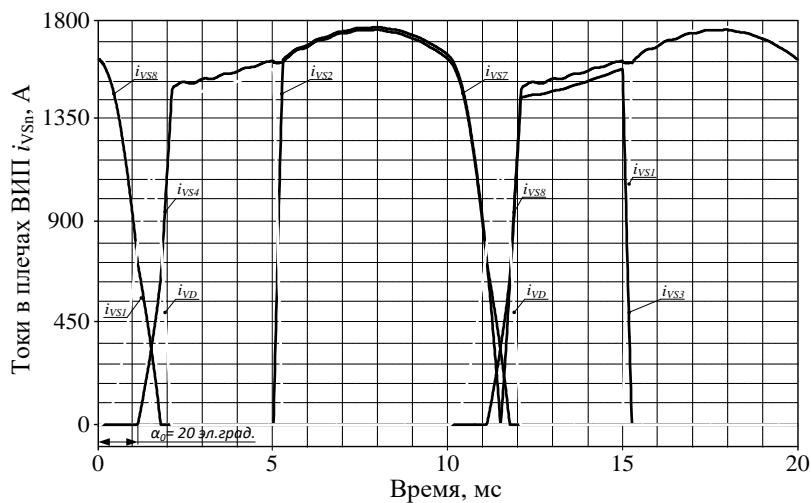


Рис. 10. Диаграммы токов плеч предлагаемого выпрямительно-инверторного преобразователя на четвертой зоне регулирования при $\alpha_0 = 20$ электрических градусов

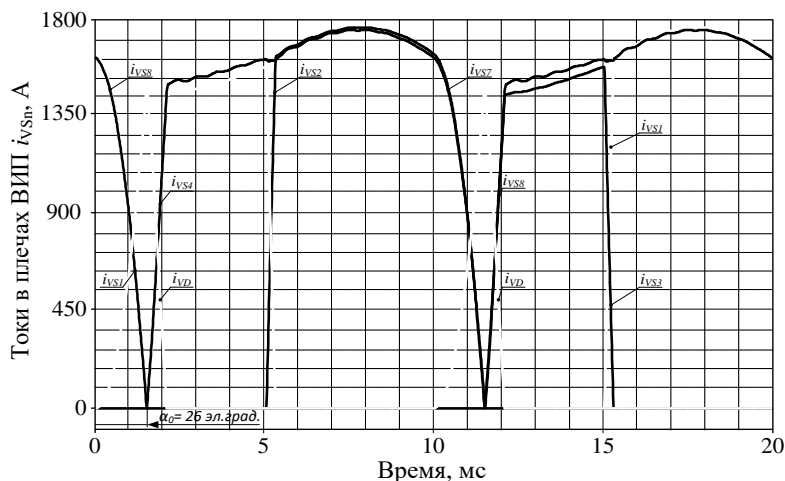


Рис. 11. Диаграммы токов плеч предлагаемого выпрямительно-инверторного преобразователя на четвертой зоне регулирования при $\alpha_0 = 26$ электрических градусов

При анализе видно (см. рис. 11), что при угле открытия тиристорных плеч ВВП $\alpha_0 = 26$ эл. град. разрядное диодное плечо VD принимает токовую нагрузку и тем самым полностью закрывает ранее проводившие ток тиристорные плечи, благодаря чему исключается угроза возникновения короткого замыкания в секциях вторичной обмотки тягового трансформатора. Следовательно, изменяется функциональное назначение угла α_0 : он больше не является минимальным углом открытия, который обеспечивал потенциальные условия на анодах плеч ВВП, а используется как управляющий импульс для перевода тиристорных плеч из запертого состояния в открытое для протекания тока нагрузки. При подаче управляющего импульса $\alpha_0 = 26$ эл. град. на тиристоры плеч ВВП теряется потребность в трансформаторах напряжения (датчики потенциальных условий), установленных на вторичной обмотке тягового трансформатора

по одному на каждый ВВП. Это объясняется тем, что потенциальные условия на анодах тиристорных плеч ВВП всегда будут избыточными и обеспечивающими надежную и ускоренную коммутацию. Из диаграммы токов видно, что коммутация плеч ВВП с разрядным диодным плечом протекает быстрее и занимает 9 эл. град. (см. рис. 11). Плечи VS7 и VS4 ВВП, которые вступают в работу, коммутируют не с предыдущими работающими плечами VS1 и VS8, а с диодным плечом VD, который с самого начала полупериода выполняет полезную работу, разряжая накопленную электромагнитную энергию цепи постоянного тока на тяговые электродвигатели.

По результатам моделирования получены коэффициенты мощности электровоза, а также потери мощности в плечах ВВП и на диодном плече VD при коммутации (табл. 2). Как видно, с увеличением угла α_0 открытия тиристорных плеч

Т а б л и ц а 2

Результаты исследования работы выпрямительно-инверторного преобразователя при различных минимальных углах открытия плеч α_0 для четвертой зоны регулирования

Угол α_0 , эл. град.	Потери мощности плеч ВВП и VD, Вт							Общие потери мощности плеч ВВП и VD, Вт	К _м , отн. ед.
	Номер плеча ВВП						Диодное плечо VD		
	VS1	VS2	VS3	VS4	VS7	VS8			
Работа типового ВВП									
9	1224	1224	544,9	545	2045	2045	0	7627	0,76
Работа предлагаемого ВВП (с диодным плечом VD)									
5	1220	1220	566,8	566,9	1899	1899	50,35	7422	0,78
9	1220	1221	566,5	566,6	1884	1883	55,91	7397	0,781
15	1220	1221	565,3	565,5	1850	1849	69,16	7340	0,783
20	1220	1220	563,9	564	1824	1823	80,97	7296	0,786
26	1218	1218	559,4	559,7	1804	1803	91,59	7254	0,791



ВИП при работе с разрядным плечом происходит уменьшение нагрузки на плечах VS7 и VS8, снижение суммарной мощности потерь в плечах ВИП и на диодном плече VD и, как следствие, увеличение коэффициента мощности электровоза в среднем на 3,8 %.

По приведенным данным (см. табл. 2) построены зависимости потерь мощности плеч ВИП (рис. 12) и коэффициента мощности (рис. 13) от минимального угла открытия α_0 . Видно, что при минимальном угле открытия $\alpha_0 = 26$ эл. град. электровоз имеет наибольший коэффициент мощности.

Заключение

На сегодняшний день остается актуальной задача повышения коэффициента мощности со-

временных отечественных электровозов переменного тока, который не превышает 0,84 в номинальном режиме.

Увеличение угла α_0 сказывается на снижении коэффициента мощности электровоза. Так, при $\alpha_0 = 9$ эл. град. замена, например, на 5 эл. град. K_m снижается на 1–2 %, что соответствует росту реактивной мощности на 2–4 %.

Полувековое развитие тиристорных преобразователей и алгоритмов их управления было направлено только на снижение минимального угла открытия плеч ВИП электровоза, однако ни одно из предложенных решений так и не было применено серийно.

В 2002 г. было предложено в цепь выпрям-

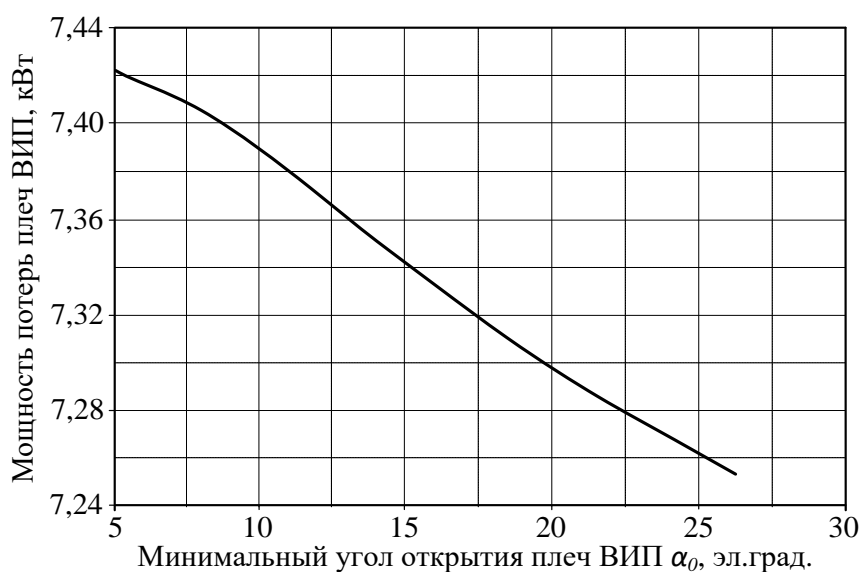


Рис. 12. Зависимость потерь мощности плеч выпрямительно-инверторного преобразователя от величины минимального угла открытия α_0

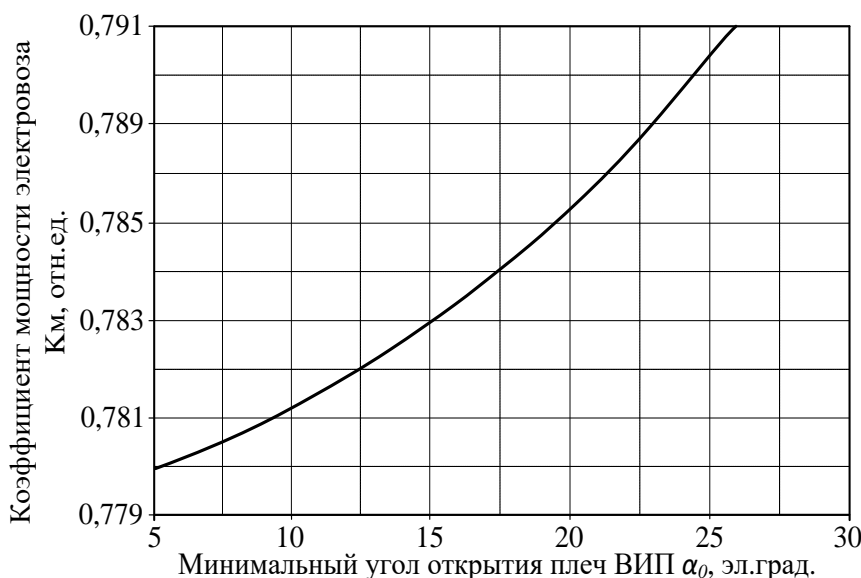


Рис. 13. Зависимость коэффициента мощности K_m от величины минимального угла открытия α_0



ленного тока силовой схемы электровоза включить разрядное полупроводниковое (диодное) плечо, присоединенное между минусовой и плюсовой шинами преобразователя, при этом повышение коэффициента мощности составило не менее 3 %.

С целью дальнейшего увеличения коэффициента мощности авторами предлагается новый подход в организации сетевой коммутации тиристорных плеч ВИП с использованием накопленной ранее электромагнитной энергии для закрытия отработавших тиристорных плеч через буферный контур разрядного полупроводникового плеча.

Новый предлагаемый подход в организации сетевой коммутации плеч ВИП электровоза реализуется только за счет увеличения минимального угла открытия тиристорных плеч до 26 эл. град.

При угле открытия тиристорных плеч ВИП $\alpha_0 = 26$ эл. град. разрядное диодное плечо с самого начала полупериода разряжает электромагнитную энергию цепи постоянного тока и закрывает ранее проводившие ток тиристорные плечи ВИП, одновременно выполняя полезную работу.

Коммутация плеч ВИП с разрядным диодным плечом при $\alpha_0 = 26$ эл. град. протекает в три раза быстрее по сравнению с типовой, так как всегда складываются избыточные потенциальные условия и обеспечивается устойчивая работа тиристорных плеч.

При такой организации коммутации меняется назначение угла α_0 , который теперь является управляющим импульсом для перевода тиристорных плеч ВИП из запертого состояния в открытое, при этом исключается возникновение короткого замыкания в секциях вторичной обмотки тягового трансформатора.

Новый предлагаемый подход в организации сетевой коммутации плеч ВИП с разрядным диодным плечом повышает коэффициент мощности электровоза в среднем на 3,8 %, а также снижает потери мощности в плечах на 4,5 %. Упрощается силовая схема электровоза, исчезает потребность в трансформаторах напряжения (датчики потенциальных условий).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тихменев Б. Н. Электровозы переменного тока со статическими преобразователями М. : Гострансжелдориздат, 1958. 268 с.
2. Фроленков И.Н. Свободные колебания тока в тяговой сети электрифицированных железных дорог и испытательных полигонов // Труды ВНИИЖТ. М. : Транспорт, 1980. Вып. 636. С. 93–100.
3. Лозановский А.Л. Энергетические характеристики отечественных электровозов переменного тока // Электровозостроение : сб. науч. тр. Всесоюз. науч.-исслед., проектно.-конструкт. и технол. ин-та электровозостроения. Новочеркасск : Изд-во ВЭЛНИИ, 1984. Т. 25. С. 58–68.
4. Тихменев Б.Н., Басов Ю.А., Находкин В.В. Потенциальные условия работы тиристорных плеч в выпрямительно-инверторном преобразователе электровоза ВЛ80Р. // Электрическое торможение электроподвижного состава : сб. науч. тр. ВНИИЖТ. М. : Транспорт, 1984. С. 9–21.
5. Власьевский С.В. Новая организация коммутации тока вентилей выпрямительно-инверторного преобразователя для повышения энергетических показателей электровозов однофазно-постоянного тока // Энергосбережение, качество электроэнергии, электромагнитная совместимость на железнодорожном транспорте : сб. тр. Второго междунар. симпозиума. М. : МИИТ, 2000. С. 91–93.
6. Мельниченко О.В. Анализ способов и выбор пути повышения коэффициента мощности электровозов переменного тока // Тр. Третьей Междунар. науч. конф. творческой молодежи. Т. 1. ДВГУПС, 2003. С. 58–60.
7. Мельниченко О. В. Слежение за потенциальными условиями тиристорных плеч ВИП как способ повышения энергетических показателей электровозов переменного тока // Транспортные проблемы Сибирского региона : сб. науч. тр. молодых учёных. Иркутск : ИрГУПС, 2003. С. 26–30.
8. Власьевский С.В., Мельниченко О.В. Возможность повышения коэффициента мощности электровоза переменного тока с тиристорными преобразователями // Вестник МИИТ. 2003. No. 10. С. 35–40.
9. Власьевский С.В., Мельниченко О.В. Пути повышения коэффициента мощности электровозов переменного тока с тиристорными преобразователями // Труды Третьей Международной научной конференции творческой молодежи. Т. 1. Хабаровск, Изд-во ДВГУПС, 2003. С. 68–72.
10. Власьевский С.В., Мельниченко О.В. Применение разрядного диодного плеча в многозонном выпрямителе электровоза переменного тока // Вестн. Всерос. науч.-исслед. и проектно-конструкт. ин-та электровозостроения. 2004. No. 2. С. 127–134.
11. Мельниченко О.В., Власьевский С.В. Энергосберегающий алгоритм управления многозонным выпрямителем электровоза с неуправляемым вентиль-диодным плечом // Энергосберегающие технологии и окружающая среда : тезисы докл. междунар. конф. Иркутск, 2004. С. 30–31.
12. Мельниченко О.В. Алгоритм управления вентилями многозонного выпрямителя электровоза переменного тока // Актуальные проблемы энергетики. Энергоресурсосбережение : тр. Второй Всерос. науч.-практ. конф. Самара, 2004. С. 23–24.
13. Новые возможности электровозов с плавным регулированием напряжения / О.В. Мельниченко и др. // Современные технологии – железнодорожному транспорту и промышленности : тр. 44-й Всерос. науч.-практ. конф. учёных транспортных вузов. Хабаровск, 2006. Т. 1. С. 119–122.



14. Мельниченко О.В., Власьевский С.В. Технические решения в управлении выпрямителем электровоза ВЛ85 для повышения его коэффициента мощности // Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте : материалы всерос. науч. конф. с междунар. участием. Т. 1. Красноярск, 2005. С. 379–382.
15. Власьевский С.В., Скорик В.Г., Мельниченко О.В. Свободные колебания напряжения в контактной сети, вызванные процессами коммутации тиристорных преобразователей электровозов // Электроника и электрооборудование транспорта. 2007. No. 1. С. 14–19.
16. Мельниченко О.В., Цыбульский В.С. Повышение качества электрической энергии в контактной сети с целью снижения отказов электронного и силового оборудования электровоза // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2008. No. 3 (19). С. 58–66.
17. Тихменев Б.Н., Кучумов В.А. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями. М. : Транспорт, 1988. 324 с.
18. Савоськин А.Н., Кулинич Ю.М., Алексеев А.С. Математическое моделирование электромагнитных процессов в динамической системе «контактная сеть – электровоз» // Электричество. 2002. No. 2. С. 29–35

REFERENCES

1. Tikhmenev B. N. Elektrovozy peremennogo toka so staticheskimi preobrazovatelyami [Alternating current electric locomotives with static power converters]. Gostranzhedorizdat Publ., Moscow, 1958, 268 p.
2. Frolenkov I. N. Svobodnye kolebaniya toka v tyagovoi seti elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog i ispytatel'nykh poligonov [Current free oscillations in electrified railway traction grids and test sites]. *Trudy VNIIZhT [Papers of VNIIZhT]*. Transport Publ., Moscow, 1980, No. 636. Pp. 93-100.
3. Lozanovskii A. L. Energeticheskie kharakteristiki otechestvennykh elektrovozov peremennogo toka [Energy characteristics of domestic alternating current electric locomotives]. *Elektrovozostroyeniye: sbornik nauchnykh trudov Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo, proektno-konstrukorskogo i tekhnologicheskogo instituta elektrovozostroyeniya [Locomotive construction: collected papers of All-Union Scientific and Research, Planning and Design Technological Institute on Electric Locomotives Building]*. VEL'NII Publ., Novocherkassk, 1984. Vol. 25. Pp. 58-68.
4. Tikhmenev B. N., Basov Yu. A., Nakhodkin V. V. Potentsial'nye usloviya raboty tiristorov v vypryamitel'no-invertornom preobrazovatele elektrovoza VL80R [Working potential conditions of VL80R electric locomotive reversible power converter thyristors]. *Elektricheskoe tormozhenie elektropodvizhnogo sostava: sbornik nauchnykh trudov VNIIZhT, pod redaktsiei O. A. Nekrasova [Electric braking of electric rolling stock: VNIIZhT collected papers, edited by Nekrasov O. A.]*. Transport Publ., Moscow, 1984. Pp. 9-21.
5. Vlas'evskii S. V. Novaya organizatsiya kommutatsii toka ventilei vypryamitel'no-invertornogo preobrazovatelya dlya povysheniya energeticheskikh pokazatelei elektrovozov odnofazno-postoyannogo toka [New current commutation organization of reversible power converter gates for AC-wire DC-motor electric locomotives energy performance increase]. *Vtoroi mezhdunarodnyi simpozium "Energoberezhenie, kachestvo elektroenergii, elektromagnitnaya sovmestimost na zheleznodorozhnom transporte": sbornik trudov pod redaktsiei d. t. n., professora R. R. Mamoshina [Proceedings of the 2nd International Symposium "Energy saving, electric energy quality and electromagnetic compatibility on railway transport", edited by Doctor of Engineering Science, Professor Mamoshin R. R.]*. MIIT Publ., Moscow, 2000. Pp. 91-93.
6. Mel'nichenko O. V. Analiz sposobov i vybor puti povysheniya koeffitsienta moshchnosti elektrovozov peremennogo toka [Analyzing means and choosing a way for alternating current electric locomotives power factor increase]. *Trudy Tre'tei Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii tvorcheskoi molodezhi [Proceedings of the 3rd international scientific conference for creative youth]*. DVGUPS Publ., 2003. Vol. 1. Pp. 58-60.
7. Mel'nichenko O. V. Slezhenie za potentsial'nymi usloviyami tiristorov VIP kak sposob povysheniya energeticheskikh pokazatelei elektrovozov peremennogo toka [Monitoring power converter thyristors potential conditions as a way for alternating current electric locomotives energy performance increase.]. *Transportnye problemy Sibirskogo regiona. Sbornik nauchnykh trudov molodykh uchennykh [Transport issues of the Siberian region. Collected papers of young scientists]*. IrGUPS Publ., Irkutsk, 2003. Pp. 26-30.
8. Vlas'evskii S. V., Mel'nichenko O. V. Vozmozhnost' povysheniya koeffitsienta moshchnosti elektrovoza peremennogo toka s tiristornymi preobrazovatelyami [An opportunity for power factor increase in alternating current electric locomotive with thyristor-based power converters]. *Vestnik MIIT [Herald of MIIT]*. 2003, No. 10. Pp. 35-40.
9. Vlas'evskii S. V., Mel'nichenko O. V. Puti povysheniya koeffitsienta moshchnosti elektrovozov peremennogo toka s tiristornymi preobrazovatelyami [Ways for power factor increase in alternating current electric locomotives with thyristor power converters]. *Trudy Tretei Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii tvorcheskoi molodezhi [Proceedings of the 3rd international scientific conference for creative youth]*. DVGUPS Publ., 2003. Vol. 1. Pp. 68-72.
10. Vlas'evskii S. V., Mel'nichenko O. V. Primenenie razryadnogo diodnogo plecha v mnogozonnom vypryamitele elektrovoza peremennogo toka [Application of discharge diode arm in alternating current electric locomotive multizone rectifier]. *Vestnik Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo i proektno-konstrukorskogo instituta elektrovozostroyeniya [Herald of All-Russian Scientific and Research, Planning and Design Technological Institute on Electric Locomotives Building]*. JSCo VEL'NII Publ., Novocherkassk, 2004, No. 2. Pp. 127-134.
11. Mel'nichenko O. V., Vlas'evskii S. V. Energoberegayushchii algoritm upravleniya mnogozonnym vypryamitelem elektrovoza s neupravlyаемым ventil'-diodnym plechom [Energy saving control algorithm for electric locomotive multizone rectifier with an uncontrolled diode arm]. *Energoberegayushchie tekhnologii i okruzhayushchaya sreda. Tezisy dokladov mezhdunarodnoi konferentsii [Energy saving technologies and environment. Proceedings of the international conference]*. Irkutsk, March 29-31, 2004. Pp. 30-31.
12. Mel'nichenko O. V. Algoritm upravleniya ventilyami mnogozonnogo vypryamatelya elektrovoza peremennogo toka [Multizone power rectifier control algorithm for alternating current electric locomotive]. *Trudy Vtoroi Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Aktual'nye problemy energetiki. Energoresursoberezhenie" [Proceedings of the 2nd international theoretical and practical conference "Urgent issues of energetics. Energy resources saving"]*. Samara, May 18-20, 2004. Pp. 23-24.



13. Mel'nichenko O. V., Vlas'evskii S. V., Mel'nichenko T. N., Babichuk A. K. Novye vozmozhnosti elektrovozov s pлавным regulirovaniem napryazheniya [New possibilities of electric locomotives with smooth voltage regulation]. *Trudy 44-i Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii uchenykh transportnykh vuzov "Sovremennye tekhnologii – zheleznodorozhnomu transportu i promyshlennosti"* [Proceedings of the 44th national theoretical and practical conference for scientists of transport universities "Modern technologies to railway transport and industry"]. DVGUPS, Khabarovsk, January 25-26, 2006. Vol. 1. Pp. 119-122.

14. Mel'nichenko O. V., Vlas'evskii S. V. Tekhnicheskie resheniya v upravlenii vypryamitelem elektrovoza VL85 dlya povysheniya ego koeffitsienta moshchnosti [Technical solutions in controlling VL85 electric locomotive rectifier for power factor increase]. *Resursosberegayushchie tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte. Materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Energy saving technologies in railway transport. Proceedings of the national scientific conference]. Krasnoyarsk, May 19-21, 2005. Vol. 1. Pp. 379-382.

15. Vlas'evskii S. V., Skorik V. G., Mel'nichenko O. V. Svobodnye kolebaniya napryazheniya v kontaktnoi seti, vyzvannye protsessami kommutatsii tiristornykh preobrazovatelei elektrovozov [Voltage free oscillations in railway traction grids induced by commutation processes in electric locomotive thyristor power converters]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta. Nauchno-tekhnicheskii zhurnal* [Transport electronics and electrical equipment. Scientific and technical magazine]. 2007, No. 1. Pp. 14-19.

16. Mel'nichenko O. V., Tsybul'skii V. S. Povyslenie kachestva elektricheskoi energii v kontaktnoi seti s tselyu snizheniya otkazov elektronogo i silovogo oborudovaniya elektrovoza [Railway traction grid electric energy quality increase for locomotive electric and power equipment failure reduction]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling]. IrGUPS Publ., Irkutsk, 2008, No. 3 (19). Pp. 58-66.

17. Tikhmenev B. N., Kuchumov V. A. Elektrovozy peremennogo toka s tiristornymi preobrazovatelyami [Alternating current electric locomotives with thyristor power converters]. Transport Publ., Moscow, 1988, 324 p.

18. Savos'kin A. N., Kulnich Yu. M., Alekseev A. S. Matematicheskoe modelirovanie elektromagnitnykh protsessov v dinamicheskoi sisteme "kontaktnaya set – elektrovoz" [Mathematical modelling of electromagnetic processes in an "overhead network – electric locomotive" dynamic system]. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2002, No. 2. Pp. 29-35.

Информация об авторах

Authors

Богинский Сергей Антонович – заместитель начальника Дирекции тяги по планированию и контролю ремонта локомотивов, ОАО «РЖД», г. Москва, e-mail: CT_boginskyiSA@center.rzd.ru

Sergei Antonovich Boginskii – Deputy Head of the Traction Directorate for scheduling and monitoring the repair of locomotives, JSCo RZD, Moscow, e-mail: CT_boginskyiSA@center.rzd.ru

Мельниченко Олег Валерьевич – д. т. н., профессор, заведующий кафедрой электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: olegmel'naval@mail.ru

Oleg Valer'evich Mel'nichenko – Doctor of Engineering Science, Full professor, Head of the Subdepartment of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: olegmel'naval@mail.ru

Линьков Алексей Олегович – к. т. н., доцент кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: linkovalex@mail.ru

Linkov Aleksei Olegovich – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof. at the Subdepartment of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: linkovalex@mail.ru

Для цитирования

For citation

Богинский С. А. Повышение коэффициента мощности электровозов переменного тока за счет новой организации сетевой коммутации плеч выпрямительно-инверторного преобразователя / С. А. Богинский, О. В. Мельниченко, А. О. Линьков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 62, № 2. – С. 166–177. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).166–177

Boginskii S. A., Mel'nichenko O. V., Lin'kov A. O. Povyslenie koeffitsienta moshchnosti elektrovozov peremennogo toka za schet novoi organizatsii setevoi kommutatsii plech VIP [Increasing AC locomotive power factor by reorganizing line commutation of the RIC arms]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2019. Vol. 62, No. 2. Pp. 166–177. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).166–177

УДК 656.212

DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).177–185

О. И. Залогова¹, Л. Н. Такайшвили²

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

² Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск, Российская Федерация

Дата поступления: 10 марта 2019 г.

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ МОНГОЛИИ ДЛЯ ЭКСПОРТА УГЛЯ