



Повышение коэффициента мощности электровоза в режиме рекуперативного торможения



Олег МЕЛЬНИЧЕНКО
Oleg V. MELNICHENKO

Сергей ШРАМКО
Sergey G. SHRAMKO



Алексей ЛИНЬКОВ
Alexey O. LINKOV

Мельниченко Олег Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроподвижной состав» Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС). Шрамко Сергей Геннадьевич – старший преподаватель ИрГУПС. Линьков Алексей Олегович – аспирант ИрГУПС, Иркутск, Россия.

Электрическая принципиальная силовая схема выпрямительной установки возбуждения (ВУВ) на базе тиристоров остаётся неизменной уже более 45 лет. Анализ работы электровозов в режиме рекуперативного торможения показал, что использование тиристоров в плечах ВУВ, а также принятые сегодня методы управления стали одной из причин снижения коэффициента мощности локомотивов при рекуперативном торможении (не более 0,65 в эксплуатации).

Статья предлагает изменение силовой цепи выпрямительной установки возбуждения с использованием новой элементной базы и способа управления, которые позволяют повысить энергетические показатели электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения примерно на 5%.

Ключевые слова: электровоз, переменный ток, силовая цепь, рекуперативное торможение, выпрямительная установка возбуждения, коэффициент мощности.

Холдинг «Российские железные дороги» входит в число крупнейших потребителей энергоресурсов в России – на его долю приходится около 4,5% ежегодно потребляемой в стране электроэнергии. Одним из основных условий развития экономики является рациональное, бережное отношение ко всем видам материальных и энергетических ресурсов.

По словам вице-президента ОАО «РЖД» В. А. Гапановича, за 2011 год на железных дорогах России объем возвращенной в контактную сеть электроэнергии при рекуперативном торможении составил 1278 млрд кВт·ч [1]. Этот показатель для холдинга является рекордным, а значит, работа в этом направлении ведется и будет продолжаться. Одновременно вице-президент обозначил одну из целевых задач: повышение энергоэффективности компании за счет увеличения удельной рекуперации электрической энергии и реализации других технологий энергосбережения. Поиск инновационных направлений станет основой достижения долгосрочных стратегических целей в этой сфере.

Применение на электровозах электрического рекуперативного торможения

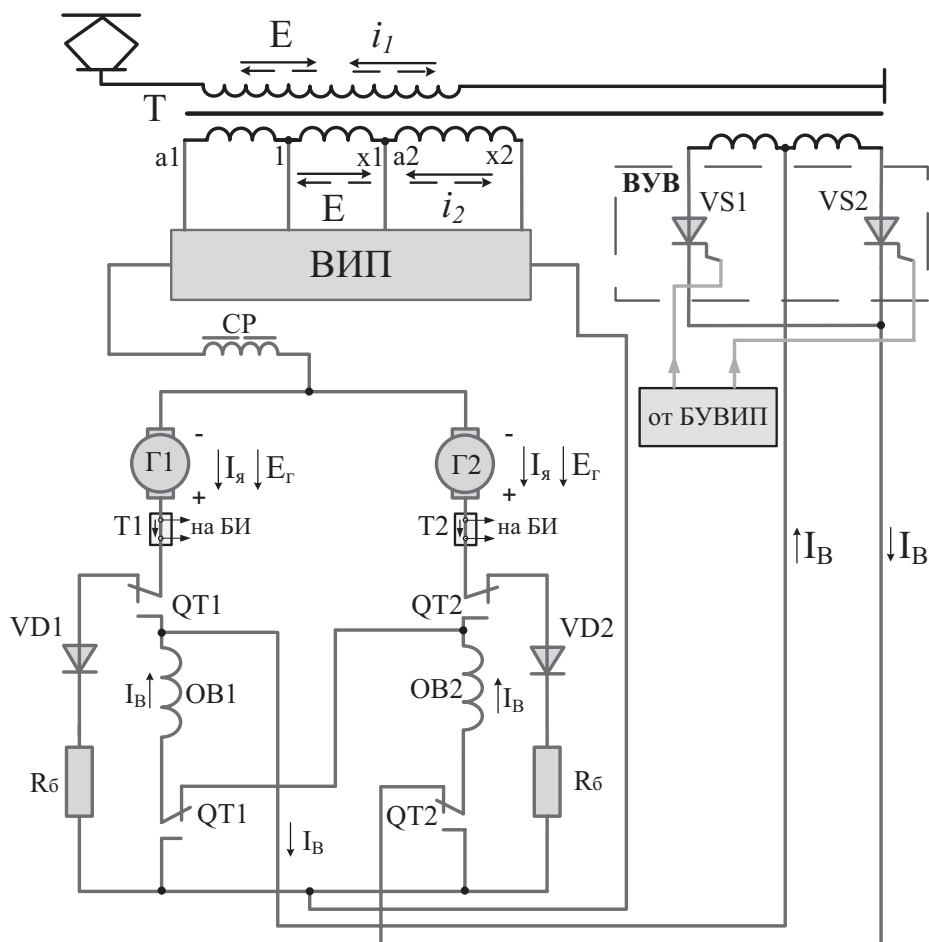


Рис. 1. Электрическая принципиальная схема силовых цепей электровоза на тележке со штатным ВУВ в режиме рекуперативного торможения.

приводит к снижению эксплуатационных расходов, значительной экономии электроэнергии, расходуемой на тягу поездов, а также способствует большей безопасности движения грузовых поездов повышенной массы и длины на горных и перевалистых участках пути. Кроме того, преимуществом рекуперативного торможения является возможность поддержания неизменной скорости движения поезда на затяжных спусках благодаря жестким тормозным характеристикам электровоза. Это повышает его техническую скорость, а значит, и пропускную способность участка железной дороги [2, 3].

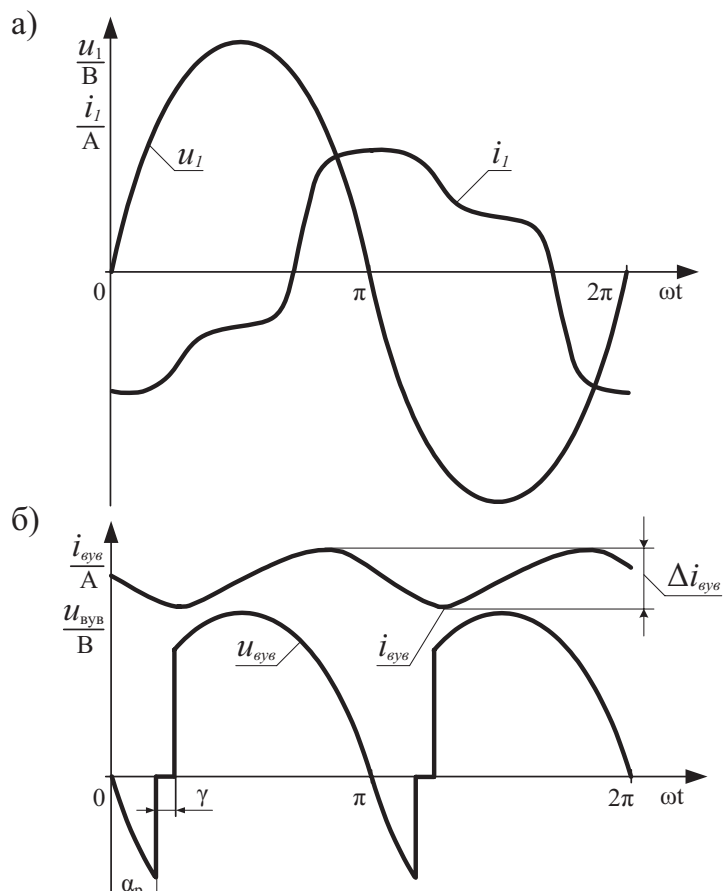
На современных отечественных электровозах переменного тока ВЛ 80р, ВЛ 80тк, ВЛ 85, ВЛ 65, ЭП1в/и и «Ермак» в качестве выпрямительной установки возбуждения (ВУВ) используется схема

на основе силовых полупроводниковых приборов – тиристоров. На рис. 1 представлена электрическая принципиальная схема силовых цепей электровоза на тележке в режиме рекуперативного торможения, состоящая из токоприёмника, тягового трансформатора Т, выпрямительно-инверторного преобразователя ВИП, сглаживающего реактора СР, генераторов Г1 и Г2, обмоток возбуждения ОВ1 и ОВ2, блока балластных сопротивлений R6, блока управления БУВИП [2, 4].

Использование тиристоров в плечах VS1, VS2 ВУВ, работающих в течение полупериода в зависимости от направления ЭДС в обмотке тягового трансформатора, а также принятые принципы управления стали одной из причин снижения энергетических показателей электровоза в режиме рекуперативного торможения.



Рис. 2. Диаграммы электромагнитных процессов напряжения и тока в первичной обмотке тягового трансформатора (а) и штатного ВУВ (б) электровоза в режиме рекуперативного торможения.



Диапазон изменения угла регулирования лежит в пределах $\alpha_p^{\min} < \alpha_p < \pi/2$, что создает колебания тока возбуждения Δi_{vyb} , называемые пульсацией выпрямленного тока (рис. 2). Из-за активно-индуктивного характера сопротивления обмоток возбуждения ТЭД и тиристоров в плечах штатного ВУВ образуется отрицательное напряжение длительностью α_p , прикладываемое к нагрузке (рис. 2) [5]. В результате снижаются энергетические показатели работы ВУВ, значительно увеличивается пульсация тока возбуждения Δi_{vyb} при увеличении угла α_p .

Пульсация постоянного тока возбуждения негативно сказывается на магнитном потоке ТЭД, ухудшаются коммутационные условия на коллекторе и повышается вероятность возникновения искрения под щетками коллекторно-щеточного узла ТЭД. Регулирование величины напряжения ВУВ осуществляется с правой части полупериода в левую по мере снижения угла α_p , что значительно влияет на смещение максимальных мгновенных значений

тока возбуждения i_{vyb} относительно максимальных мгновенных значений напряжения ВУВ u_{vyb} (рис. 2). Этот сдвиг может достигать 90 эл.град., воздействует на форму тока i_1 в первичной обмотке тягового трансформатора, увеличивая при этом потребление реактивной энергии, а следовательно, заметно снижает коэффициент мощности электровоза (не более $0,65$ в эксплуатации) [6].

Анализ тенденции развития выпрямительных установок возбуждения ТЭД электровозов переменного тока показал, что существенного принципиального изменения установка не претерпела [7]. Первый тиристорный возбудитель был применен еще на электровозах серии ВЛ 80т с реостатным торможением. На современных электровозах используется ВУВ с тем же принципом работы. Однако за счет использования более мощных тиристоров с большим классом по напряжению удалось несколько снизить количество параллельных и последовательных цепей в плече ВУВ и тем самым повысить надежность процес-

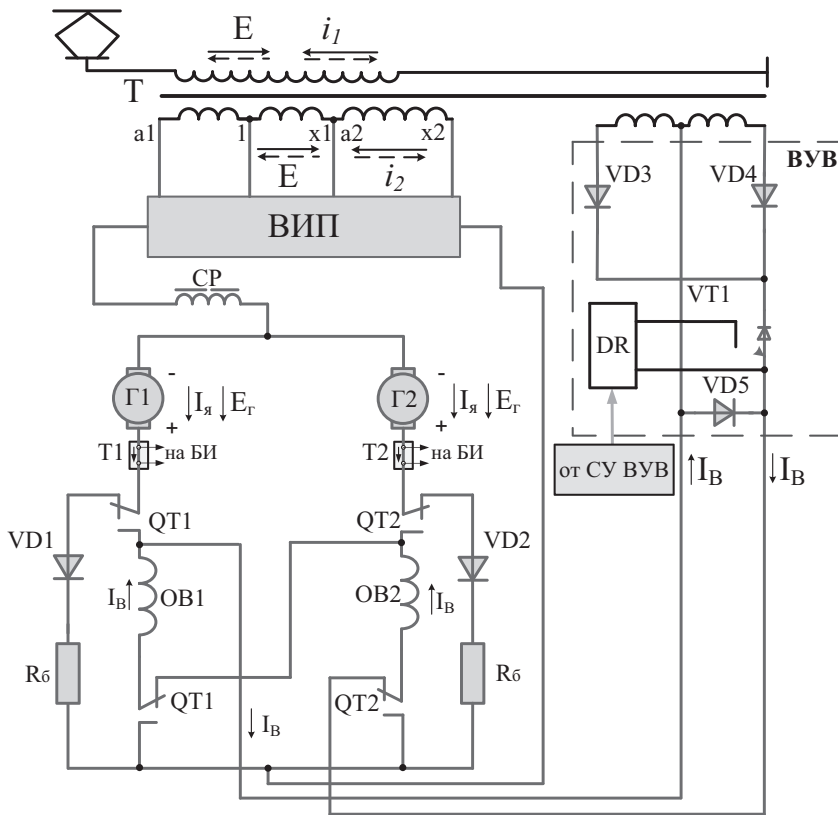


Рис. 3. Принципиальная схема силовых цепей электровоза на тележке в режиме рекуперативного торможения с ВУВ на основе управляемых IGBT-транзисторов.

са. В итоге электрическая принципиальная силовая схема ВУВ на базе тиристоров остаётся неизменной уже более 45 лет.

В связи с развитием управляемых силовых полупроводниковых приборов (СПП) появляется возможность модернизировать цепь ВУВ электровоза переменного тока. Предлагается в выпрямительной установке возбуждения заменить тиристоры на диоды VD3, VD4 для выпрямления напряжения, а в общую цепь ВУВ установить IGBT-транзистор VT1, который будет изменять фазу регулирования напряжения на обмотках возбуждения в оба полупериода (рис. 3).

Биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT) – полностью управляемый полупроводниковый прибор, в основе которого лежит трехслойная структура [8]. К достоинствам этого прибора относятся простота в управлении (сигналом управления является напряжение), высокие значения входного сопротивления и токовой нагрузки, малое сопротивление во включенном состоянии, отсутствие необходимости применять габарит-

ные запирающие конденсаторы, дроссели насыщения.

Управление IGBT-транзистором VT1 будет осуществляться системой СУ ВУВ через драйвер DR. Система управления ВУВ запитывается напряжением 50 В, синхронизируется с сетью и получает сигнал от цепей управления о режиме работы «тяга» или «рекуперация», а также в ней происходит формирование сигналов управления для VT1 (рис. 3). Драйвер DR обеспечивает гальваническую развязку сигналов управления от силовых цепей. Диод VD5 нужен для поддержания тока возбуждения $i_{эвр}$ в моменты закрытого состояния VT1 за счет запасенной электромагнитной энергии в OB1, OB2, а также защиты от выбросов напряжения при коммутационных переключениях.

Выпрямительная установка возбуждения на основе IGBT-транзисторов с новым способом управления обеспечит повышение энергетических показателей электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения. Реализуется это



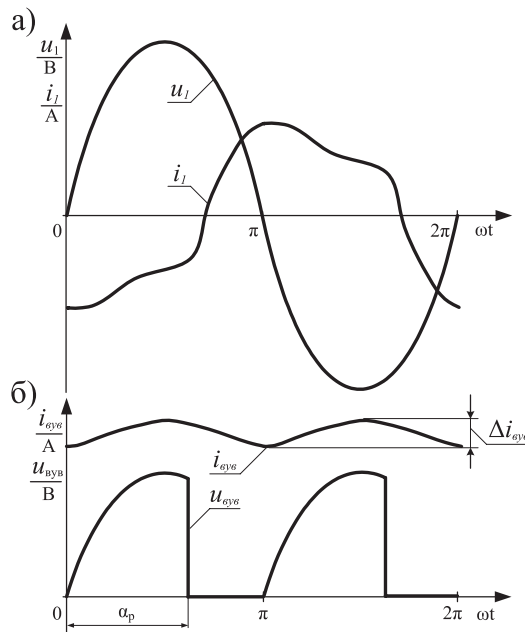


Рис. 4. Диаграммы электромагнитных процессов напряжения и тока в первичной обмотке тягового трансформатора (а) и предлагаемого ВУВ (б) электровоза в режиме рекуперативного торможения.

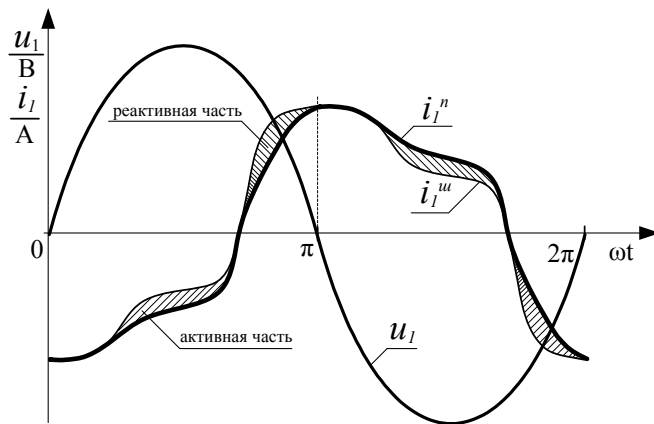


Рис. 5. Диаграммы напряжения и токов первичной обмотки тягового трансформатора при работе электровоза со штатным i_1^w и предлагаемым i_1^n ВУВ в режиме рекуперативного торможения.

на основе того, что регулирование напряжения ВУВ u_{vuv} происходит не справа налево в полупериоде, как в штатной схеме (рис. 2), а слева направо путем увеличения угла α_p (рис. 4). В результате смещение максимальных мгновенных значений тока возбуждения i_{vuv} относительно максимальных мгновенных значений напряжения u_{vuv} уменьшается, снижается потребление реактивной энергии.

Изменение структуры силовой цепи ВУВ позволит исключить возникновение обратного напряжения, прикладываемого к нагрузке, что, в свою очередь, сделает его

работу более эффективной и менее энергоёмкой. Вместе с тем это повлияет на снижение пульсации тока возбуждения Δi_{vuv} при уменьшении угла регулирования α_p относительно штатной величины и повысит надежность работы ТЭД.

Для более наглядного представления на рис. 5 показано изменение рекуперированного электровозом тока первичной обмотки тягового трансформатора i_1^n при работе со штатным ВУВ, i_1^w – с предлагаемым ВУВ. Положительным результатом является то, что в конце полупериода уменьшена реактивная часть тока, а в середине полупериода

да увеличена активная его часть (на рис. 5 обозначено заштрихованной областью). Это объясняет повышение коэффициента мощности электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения.

Внедрение предлагаемой выпрямительной установки возбуждения с новым способом управления на электровозах переменного тока даст повышение коэффициента мощности в режиме рекуперативного торможения примерно на 5%. Что в денежном эквиваленте составит около 70 тыс. руб. в год на один электровоз при сроке окупаемости не более двух лет.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гапанович В. А. Повышение энергетической эффективности // Железнодорожный транспорт. – 2012. – № 2. – С. 12–16.

2. Тихменев Б. Н., Кучумов В. А. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями – М.: Транспорт, 1988. – 311 с.

3. Трахтман Л. М. Электрическое торможение электроподвижного состава. – М.: Транспорт, 1967. – 204 с.

4. Тушканов Б. А., Пушкарев Н. Г., Позднякова Л. А. и др. Электровоз ВЛ 85: Руководство по эксплуатации. – М.: Транспорт, 1992. – 480 с.

5. Савоськин А. Н., Баранов А. В., Плакс А. В., Феоктистов В. П., Автоматизация электроподвижного состава: Учебник для вузов. – М.: Транспорт, 1990. – 311 с.

6. Власьевский С. В. Эффективность и проблемы применения рекуперативного торможения на электровозах переменного тока // Вестник ВЭЛНИИ. – Новочеркасск, 2005. – Т. 49. – С. 147–158.

7. Рутштейн А. М., Палагута Т. Н. Тенденции развития выпрямительных установок возбуждения тяговых двигателей // Вестник ВЭЛНИИ. – Новочеркасск, 2009. – Т. 58. – С. 242–249.

8. Ласка Б. Развитие тяговых преобразователей на транзисторах IGBT // Железные дороги мира. – 2003. – № 11. – С. 32–39. ●

RAISING OF POWER FACTOR OF ELECTRIC LOCOMOTIVE AT REGENERATIVE BRAKING REGIME

Melnichenko, Oleg V. – Ph.D. (Tech), associate professor at the department of electric rolling stock of Irkutsk State University of Railway Engineering (IrGUPS), Irkutsk, Russia.

Shramko, Sergey G. – senior lecturer of Irkutsk State University of Railway Engineering (IrGUPS), Irkutsk, Russia.

Linkov, Alexey O. – Ph.D. student of Irkutsk State University of Railway Engineering (IrGUPS), Irkutsk, Russia.

Electrical power scheme of rectifier unit of actuation based on thyristors has been unchangeable for more than 45 years. Analysis of electric locomotives' operation under the regenerative braking has shown that the use of thyristors in the arms of rectifier units of actuation, as well as the adopted methods of control are one of the

causes of reduction of capacity factor of locomotives, using recuperative braking (till not more than 0,65 during operation). The article suggests changing of power circuit of rectifier unit of actuation, using new circuitry and control technique, which will allow to raise power factor of AC electric locomotive at recuperative braking by 5%.

Key words: electric locomotive, railways, alternate current, power circuit, regenerative braking, recuperative braking, rectifier unit of actuation, capacity factor.

REFERENCES

1. Gapanovich V. A. Growth of Power Efficiency [Povyshenie energeticheskoy effektivnosti]. *Zheleznodorozhnyy transport*, 2012, No 2, pp. 12–16.

2. Tihmenev B. N., Kuchumov V. A. Electric AC locomotives with thyristor converters [Elektrovoznyy peremennogo toka s tiristornymi preobrazovatelyami]. Moscow, Transport publ., 1988, 311 p.

3. Trahtman L. M. Electric braking of electric rolling stock [Elektricheskoe tormozhenie elektropodvizhnogo sostava]. Moscow, Transport publ., 1967, 204 p.

4. Tushkanov B. A., Pushkarev N. G., Pozdnyakova L. A. et al. Electric locomotive VL 85. Operating instruction [Elektrovoz VL85: Rukovodstvo po ekspluatatsii]. Moscow, Transport publ., 1992, 480 p.

5. Savoskin A. N., Baranov A. V., Plaks A. V., Feoktistov V. P. Automation of electric rolling stock. Textbook

for higher schools [Avtomatizatsiya elektropodvizhnogo sostava: Uchebnik dlya vuzov]. Moscow, Transport publ., 1990, 311 p.

6. Vlasievskiy S. V. Efficiency and problems of recuperative braking of DC electric locomotives [Effektivnost' i problemy primeneniya rekupeativnogo tormozheniya na elektrovozah peremennogo toka]. *Vestnik VEINII*, NovoCherkassk, 2005, Vol.49, pp. 147–158.

7. Rutshteyn A. M., Palaguta T. N. Trends in development of rectifier units of actuation of traction engines [Tendentsii razvitiya vypryamitel'nykh ustanovok vozbuзhdeniya tyagovykh dvigateley]. *Vestnik VEINII*, NovoCherkassk, 2009, Vol. 58, pp. 242–249.

8. Laska B. Development of traction converters on the basis of IGBT transistors [Razvitie tyagovykh preobrazovatelyey na tranzistorah IGBT]. *Zheleznyye dorogi mira*, 2003. No 11, pp. 32–39.

Координаты авторов (contact information):

Мельниченко О. В. (Melnichenko O. V.) – 8- (395) –263–83–66, Шрамко С. Г. (Shramko S. G.) – novorossereg@yandex.ru, Линьков А. О. (Linkov A. O.) – LinkovAlex@mail.ru.

Статья поступила в редакцию / article received 13.02.2013

Принята к публикации / article accepted 15.03.2013

