

УДК 621.33 (072)

Повышение энергетической эффективности электровозов переменного тока с коллекторным приводом

И. П. Васильев*, В. Д. Тулупов

Отечественная стратегия повышения уровня энергосбережения в области тягового подвижного состава реализуется за счет закупки новых энергоэкономичных локомотивов и модернизации эксплуатируемого парка.

Электровозы переменного тока Российских железных дорог, оборудованные коллекторными тяговыми машинами, имеют низкий уровень энергетических показателей в режимах тяги и рекуперативного торможения, что ведет к значительному потреблению электроэнергии и росту эксплуатационных расходов, что недопустимо в сложных политических и экономических условиях.

Для повышения энергоэффективности электровозов переменного тока с коллекторными тяговыми машинами и с тиристорными преобразователями предложено множество способов и реализовано немало технических решений, однако проблема остается актуальной.

Одним из нереализованных до настоящего времени способов ее решения является разработка преобразователя на основе однофазного двухмостового выпрямителя с использованием диодных плеч, а также его нового алгоритма управления.

Ключевые слова: энергосбережение, электровоз, расход электрической энергии, потери мощности, тяговый подвижной состав, коллекторная тяговая машина.

Эффективное использование топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) — одна из важнейших задач экономики России. Федеральный закон «Об энергосбережении и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», а также Энергетическая стратегия России на период до 2030 г. определяют энергетическую эффективность экономики одним из главных стратегических ориентиров долгосрочной государственной энергетической политики.

Значительным потребителем энергоресурсов в стране является железнодорожный транспорт: более 4% вырабатываемой в России электроэнергии и более 10% дизельного топлива расходуется локомотивным хозяйством ОАО «РЖД» [1].

Основной задачей для транспорта железных дорог в ближайшей перспективе является вывод его на лидирующие позиции в области экономической эффективности, качества услуг и экологической безопасности при транспортировке грузов и перевозке пассажиров [2].

На тягу поездов в локомотивном комплексе приходится основная доля затрат топливно-энергетических ресурсов (86% от общего объема потребления электроэнергии и 90% — дизельного топлива). На электрической тяге в настоящее время осуществляется 85% общего объема перевозок [1].

Исходя из этого, основной ресурс экономии ТЭР в локомотивном хозяйстве ОАО «РЖД» находится в сфере перевозочного процесса и заключается, прежде всего, в рациональном энергоэкономном использовании тягового подвижного состава.

* xPr1me@mail.ru

Все эксплуатируемые на полигоне железных дорог России электровозы переменного тока с коллекторными тяговыми машинами (КТМ) имеют низкие энергетические показатели в режимах тяги и, особенно, рекуперативного торможения. Их использование ведет к значительному потреблению электроэнергии, затраты на которую являются основными расходами ОАО «РЖД» и напрямую влияют на величину эксплуатационных расходов и техническое содержание локомотивного парка.

В настоящее время в эксплуатации находится 6036 грузовых электровозов, из которых 57% составляют электровозы переменного тока, оборудованные КТМ, а именно: серии ВЛ60К, ВЛ80К, ВЛ80Т, ВЛ80С, ВЛ80Р, ВЛ85, ВЛ80ТК, 2ЭС5К, 3ЭС5К и 4ЭС5К.

Около 50% парка данных электровозов оборудованы тиристорными преобразователями, обеспечивающими плавное регулирование напряжения (ВЛ80Р, ВЛ85, ВЛ80ТК, 2ЭС5К, 3ЭС5К и 4ЭС5К — 1531 электровоз, 3683 секции). На каждую секцию этих локомотивов приходится четыре или шесть КТМ с питанием от сети через тяговый трансформатор (ТТ) и два или три выпрямительно-инверторных преобразователя (ВИП), которые в режиме тяги работают выпрямителями, а в режиме электрического рекуперативного торможения — инверторами.

В общем виде ВИП, как нагрузку сети, можно охарактеризовать коэффициентом мощности:

$$\lambda = P/S,$$

где P — активная мощность, потребляемая ВИП из контактной сети; $S = U_1 I_1$ — полная мощность, потребляемая из сети; U_1, I_1 — действующие значения напряжения сети и потребляемого тока.

Активная мощность характеризует полезный эффект преобразования энергии и потери в преобразователе. Полная мощность определяется действующими значениями напряжения и тока в контактной сети.

Известно, что коэффициент мощности вентильного преобразователя зависит от его схемы, типа нагрузки и режима работы. В типичном для выпрямителя режиме работы на RL -нагрузку при непрерывности выходного тока выходное напряжение определяется:

$$U_d = U_{d0} \nu \cos \varphi;$$

где $\nu = I_1 I_{\text{вс}}$ — отношение действующего значения 1-й гармоники тока I_1 к действующему значению тока $I_{\text{вс}}$, называемое коэффициентом несинусоидальности тока.

При этом:

$$\lambda = \nu \cos \varphi = U_d / U_{d0};$$

Основными недостатками тяговых электроприводов (ТЭП) электровозов с КТМ и ВИП являются: значительное потребление реактивной мощности, иска-

жение формы напряжения и тока в первичной обмотке тягового трансформатора, появление значительных гармонических составляющих тока в контактной сети, — т.е. низкое значение коэффициента мощности, который на Российских электровозах не превышает $\lambda = 0,9$.

Для достижения предельного значения коэффициента мощности $\lambda = 1$ необходимо создание вентильного преобразователя, потребляющего от внешней сети электроснабжения ток синусоидальной формы, совпадающий по фазе с напряжением. Эта задача до настоящего времени в полном объеме не решена, однако, некоторые современные разработки обеспечивают получение весьма высоких значений λ .

Разработка технических решений, способов и средств управления ВИП, направленных на повышение энергетической эффективности ТЭП электровозов переменного тока, является актуальной и экономически значимой задачей. Для устранения недостатков локомотивов переменного тока с КТМ и тиристорными преобразователями в рамках повышения их энергоэффективности предложено множество способов и реализован ряд технических решений.

На сегодняшний день стоимость одного ВИП на электровозах переменного тока составляет от 3 до 5 млн руб. В качестве полупроводниковых элементов в конструкции ВИП используются тиристоры, которые, в первую очередь, определяют высокую стоимость этих устройств (рис. 1).

Для удешевления ВИП в ряде случаев целесообразно использовать несимметричный регулятор напряжения питания тяговых машин, при котором лишь некоторые вентили являются управляемыми. За счет применения неуправляемых вентилях взамен дорогостоящих тиристоров снижается общая стоимость преобразователя, кроме того, счет применения такого регулятора напряжения упрощается схема управления, а главное повышается коэффициент мощности электровоза (рис. 2).

В предлагаемой схеме в качестве управляемых вентилях используются тиристоры (Т), а в качестве последовательно включенных неуправляемых вентилях — диоды (Д). Открывающие импульсы на тиристоры подаются одновременно от одного источника сигнала. Диоды открываются при $\varphi = 0$ (рис. 3, а), а управляемые вентили — с заданным углом (рис. 3, б).

При изменении знака сетевого напряжения нагрузка оказывается шунтированной диодами, пока ток в закрываемом управляемом вентиле не снизится до нулевого значения. В это время ток из сети не потребляется, а поддерживается за счет энергии, накопленной в индуктивности фильтра. Процессы в схеме повторяются каждый полупериод.

При введении в электрическую схему нулевого вентиле (см. рис. 2) фазовый сдвиг 1-й гармоники тока i_1 относительно напряжения сети u_{m2} становится равен $\varphi = \alpha/2$ (рис. 4), т.е. меньшие значения φ в обычном выпрямителе при том же угле управления (см. рис. 3, б).

Среднее значение выходного напряжения, которое получаем при использовании схемы с нулевыми вентилями:

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} U_{m2} \sin \omega t d\omega t = U_{d0} \frac{1 + \cos \alpha}{2}.$$

Зависимость $\cos \varphi = f(U_d / U_{d0})$ приведена на рис. 5. Уменьшение длительности протекания тока уменьшает угол сдвига φ , при этом значение коэффициента мощности возрастает [3]:

$$\lambda = v \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\pi(\pi - \alpha)}} \frac{U_d}{U_{d0}}.$$

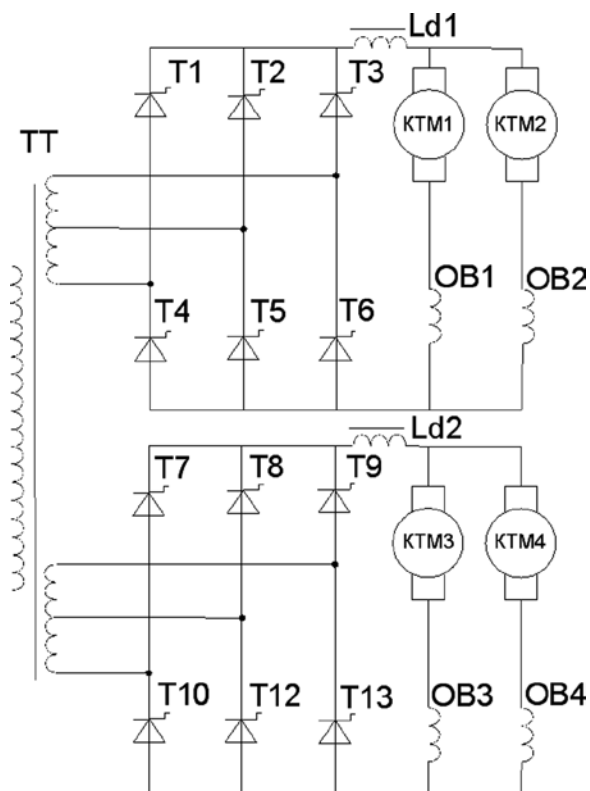


Рис. 1. Схема питания КТМ применяемая на Российских электровозах переменного тока с КТМ и ВИП

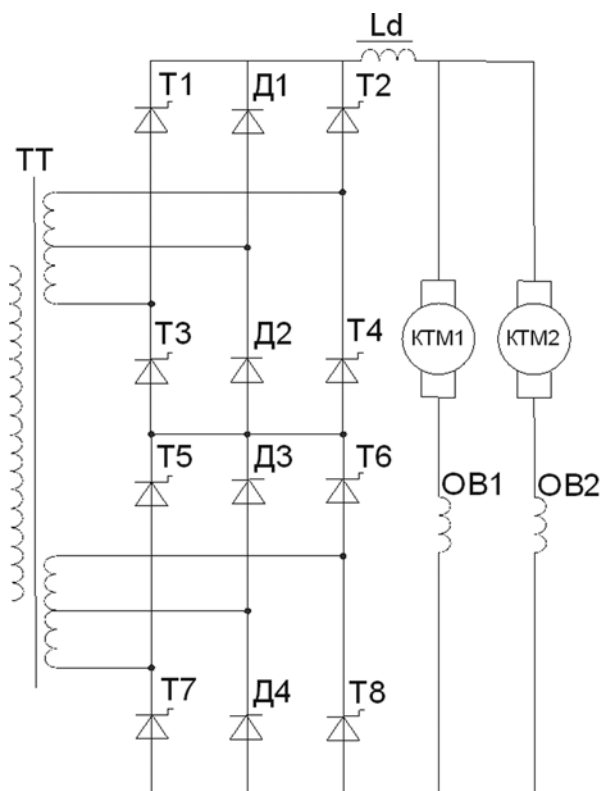


Рис. 2. Схема предлагаемого регулятора напряжения

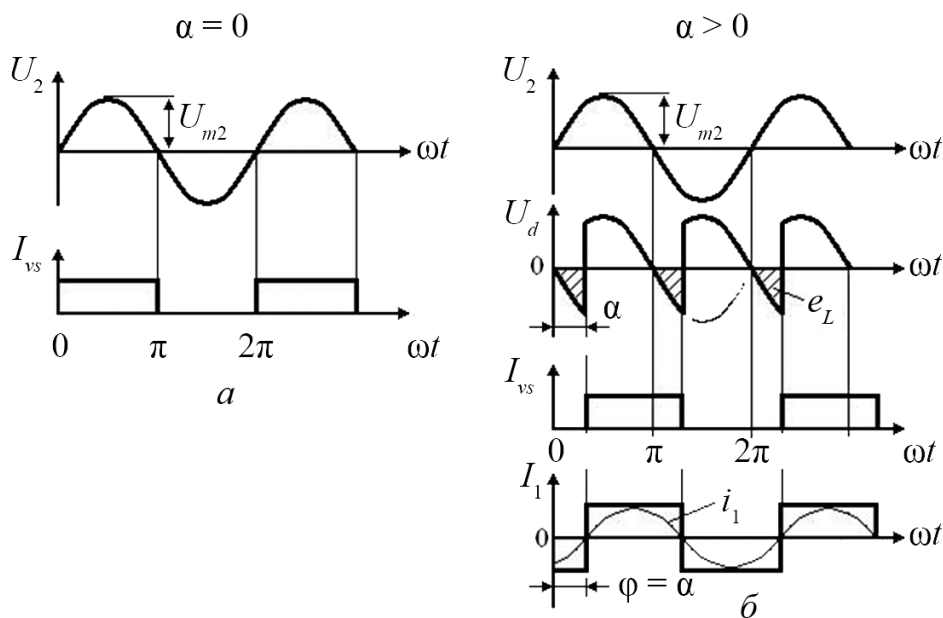


Рис. 3. Временные диаграммы напряжений и токов в управляемом выпрямителе

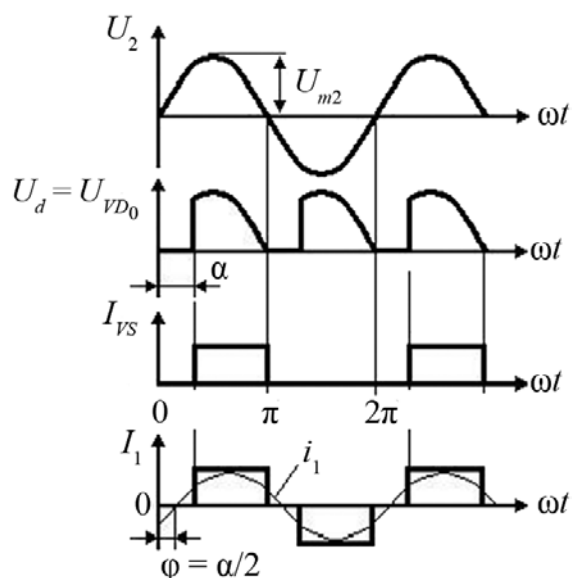


Рис. 4. Временные диаграммы напряжений и токов в управляемом выпрямителе с нулевыми вентилями

Одновременно уменьшаются пульсации тока, т.к. к цепи якоря КТМ не прикладывается отрицательное напряжение.

Следовательно, одним из актуальных и до сих пор нереализованных на локомотивах способов решения данной проблемы является разработка принципа,

структуры и схемного решения ВИП на основе однофазного двухмостового выпрямителя с использованием диодных плеч, который в течение многих десятков лет применяется в промышленной электронике, а также его нового алгоритма управления.

Предлагаемая силовая электрическая схема регулятора напряжения питания КТМ вместо используемых ВИП для электровозов переменного тока позволит улучшить энергетические показатели электровоза в режимах тяги и рекуперативного торможения, что также повлияет на снижение расхода электроэнергии, тягу, повысит качество потребляемой электроэнергии и, следовательно, способствует снижению эксплуатационных расходов ОАО «РЖД».

Литература

1. Гапанович В.А. и др. Энергосбережение на железнодорожном транспорте. М.: Интехэнерго-Издат, Теплоэнергетик, 2014.
2. Стратегия инновационного развития ОАО «Российские железные дороги» на период до 2015 года (Белая книга ОАО «РЖД»): Утв. президентом ОАО «РЖД» В.И. Якуниным. М., 2010.
3. Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е.Е. Промышленная электроника / под ред. В.А. Лабунцова. М.: Энергоатомиздат, 1988.

Статья поступила в редакцию 08.04.2016

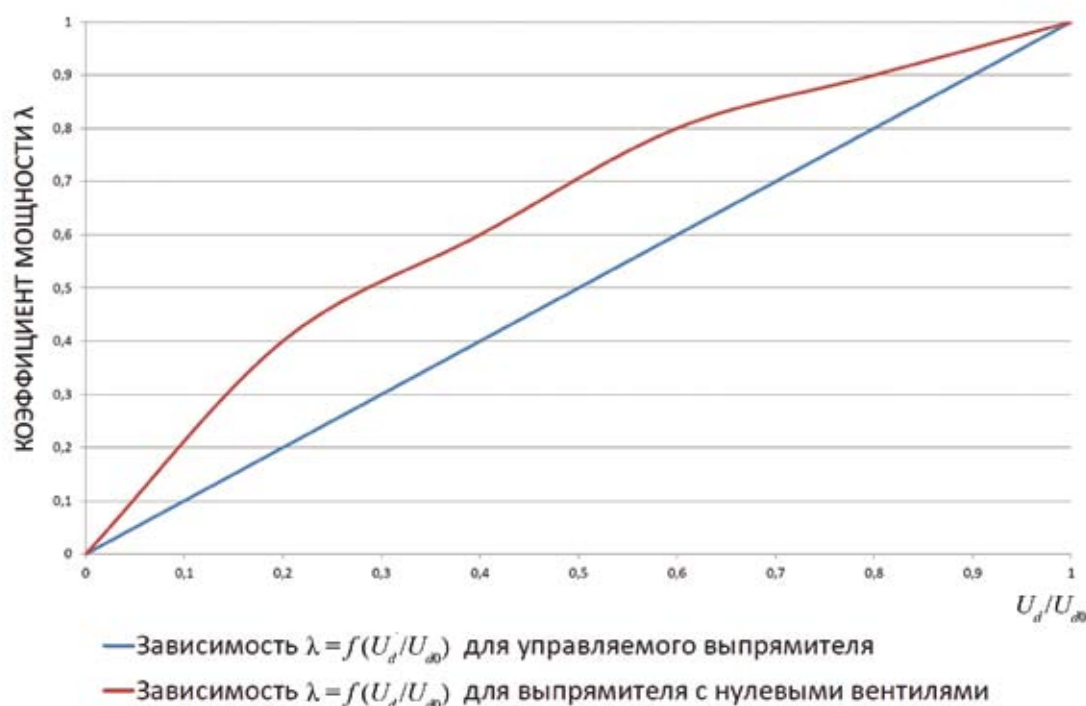


Рис. 5. Зависимость $\lambda = f(U_d/U_{a0})$ для управляемого выпрямителя и выпрямителя с нулевым вентилем