

Результаты испытаний на электровозе новой выпрямительной установки возбуждения на IGBT

В статье приведены результаты эксплуатационных испытаний электровоза переменного тока ВЛ80Р, оборудованного выпрямительной установкой возбуждения на IGBT.

**Олег Мельниченко
Алексей Линьков
Дмитрий Яговкин
Иван Полянский
Юрий Газизов**

В [1] мы познакомили читателей с новым энергоэффективным выпрямительно-инверторным преобразователем на базе IGBT для электровозов переменного тока, обеспечивающим высокий коэффициент мощности во всех режимах его работы. В данной статье речь пойдет о результатах опытной эксплуатации подобного преобразователя на электровозе, выполненного с использованием Press-Pack IGBT, и реализации нового способа его управления.

При работе электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения множество причин оказывает влияние на снижение его энергетических показателей. Одной из таких причин является низкая энергоэффективность выпрямительной установки возбуждения (ВУВ), предназначенной для независимого питания обмоток возбуждения (ОВ) тяговых электродвигателей (ТЭД). На всех электровозах переменного тока с коллекторными ТЭД используется ВУВ на основе тиристоров, выполненная по схеме

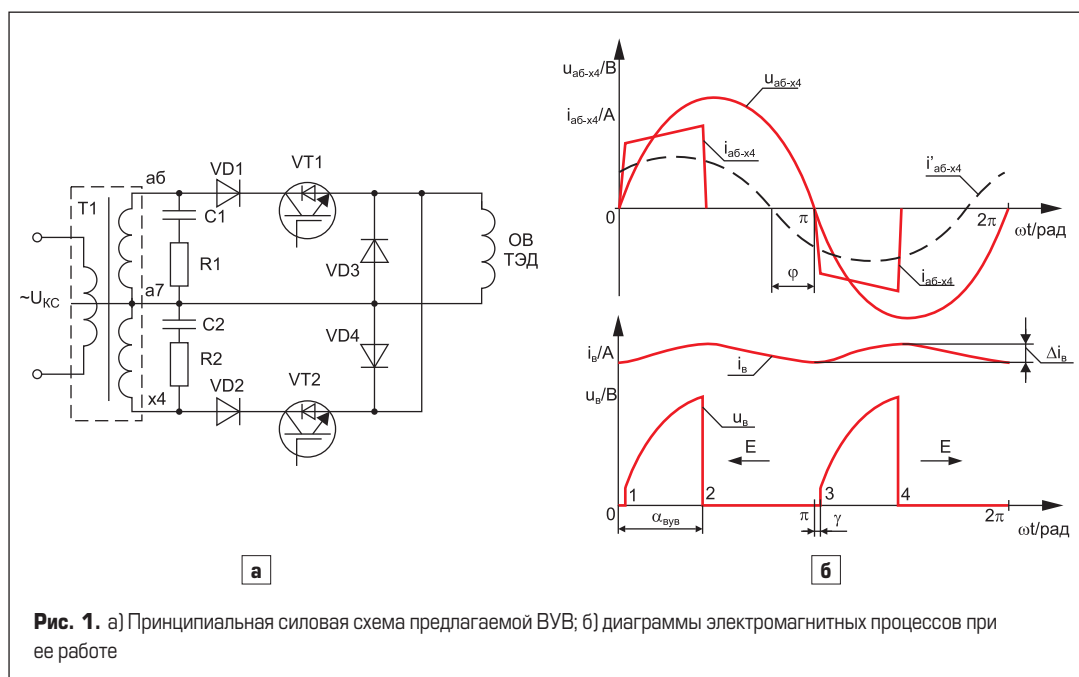


Рис. 1. а) Принципиальная силовая схема предлагаемой ВУВ; б) диаграммы электромагнитных процессов при ее работе

двухполупериодного выпрямителя с нулевой точкой. При такой схеме ВУВ увеличение величины выпрямленного напряжения возможно только при движении фазы импульса управления от конца полупериода к его началу. Недостатком работы такой ВУВ являются: увеличенный угол сдвига фаз между током и напряжением в обмотке возбуждения тягового трансформатора; увеличенная пульсация тока возбуждения из-за наличия отрицательного выпрямленного напряжения; ограниченный диапазон регулирования выпрямленного напряжения. В итоге потребляемая типовой ВУВ реактивная мощность и увеличенная пульсация выпрямленного тока возбуждения увеличивают индуктивную составляющую тока в первичной обмотке тягового трансформатора, тем самым уменьшая коэффициент мощности электровоза в режиме рекуперативного торможения [2, 3].

Учеными Иркутского государственного университета путей сообщения разработана выпрямительная установка возбуждения на базе IGBT с новым способом управления [3, 4]. Авторами предлагается в ВУВ заменить тиристоры на диоды VD1, VD2 с последовательным соединением IGBT VT1 и VT2, которые обеспечивают регулирование напряжения на обмотках возбуждения в соответствующий полупериод питающего напряжения (рис. 1а). Управление IGBT осуществляется блоком управления через драйвер, который обеспечивает гальваническую развязку сигналов управления от силовых цепей. Диоды VD3 и VD4 необходимы для поддержания тока возбуждения в моменты закрытого состояния транзисторов за счет запасенной электромагнитной энергии в ОВ ТЭД. Для защиты от коммутационных перенапряжений при переключениях IGBT используются снабберные цепи, состоящие из последовательно соединенных резистора и емкости R1, C1 и R2, C2.

Предлагаемый способ управления ВУВ заключается в том, что регулирование напряжения возбуждения u_g начинается путем подачи импульсов управления с фазой $\alpha = 0$ в начале каждого полупериода напряжения сети на соответствующий IGBT с целью его открытия и снятия этих импульсов с фазой $\alpha = \alpha_{\text{зв}}$ с целью его закрытия (рис. 1б). Отсчет фазы снятия импульсов $\alpha_{\text{зв}}$ ведется от начала полупериода напряжения сети, причем увеличение выпрямленного напряжения начинается при движении фазы $\alpha_{\text{зв}}$ от начала полупериода к его концу, увеличивая тем самым длительность открытого состояния транзистора. Это позволит обеспечить протекание максимального значения тока возбуждения i_g близко к максимальному значению напряжения u_g [4]. В результате предложенного способа значительно уменьшается угол сдвига фаз ϕ между переменным током и напряжением обмотки возбуждения а6-х4 трансформатора и меняется характер потребляемой ВУВ реактивной мощности с индуктивного на емкостной. Благодаря изменению способа управления ВУВ осуществляется частичная компенсация индуктивной составляющей тока в тяговой

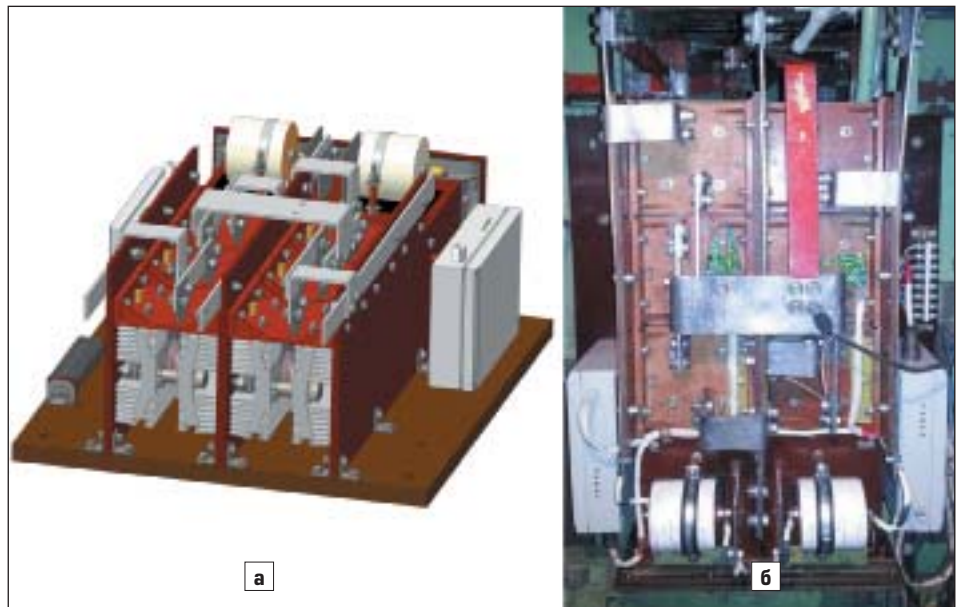


Рис. 2. Предлагаемые ВУВ, установленные на электровозе ВЛ80Р № 1829: а) 3D-модель; б) внешний вид

обмотке трансформатора, что приводит к снижению общей реактивной мощности электровоза и повышению его коэффициента мощности.

Для подтверждения преимуществ работы электровоза с предлагаемой ВУВ проведены исследования электромагнитных процессов и параметров электровоза на математической модели в среде MATLAB и на лабораторном стенде [4]. Окончательным доказательством преимуществ предлагаемой ВУВ является проведение эксплуатационных испытаний на реальном электровозе в сравнении с типовой ВУВ.

Эксплуатационные испытания электровоза ВЛ80Р № 1829, оборудованного предлагаемой ВУВ, проводились на участке Андриановская — Слюдянка Восточно-Сибирской железной дороги (филиала ОАО «РЖД») с 10 по 20 ноября 2014 г. Модернизация силовой цепи электровоза заключалась в демонтаже типовой ВУВ-758 на одной из секций электровоза и установке предлагаемой ВУВ с блоком его управления (рис. 2). Испытания электровоза осуществлялись либо при работе с типовой, либо с предлагаемой ВУВ.

Предлагаемая ВУВ состоит из двух IGBT типа IXYS T1200TB25A и четырех диодов типа

ДЛ-153-1600-34 с радиаторами охлаждения (два диода для выпрямления напряжения возбуждения и два обратных диода для поддержания тока возбуждения во время закрытого состояния IGBT) [3].

Измерение параметров электровоза и обработка данных во время эксплуатационных испытаний осуществлялись тягово-энергетической вагон-лабораторией, оборудованной аттестованным измерительно-вычислительным комплексом, соответствующим требованиям ГОСТ 26.203.

Для измерения тока, протекающего по обмоткам тяговых двигателей, в силовую схему электровоза установлены восемь датчиков типа LEM LT1000-TI/SP58, семь из которых (DT1–DT3 и DT5–DT8) включены в разрыв якорной обмотки 1–3 и 5–8 ТЭД, а один — DT4 — включен в разрыв обмотки возбуждения 4 ТЭД. Для измерения тока в первичной обмотке тягового трансформатора в разрыв провода В9 подключен датчик тока DT9 типа LEM LT1000-TI/SP58. Для измерения напряжения на каждой группе тяговых двигателей электровоза на плюсовую и минусовую шины ВИП подключены датчики напряжения DU1–DU4 типа LEM LV100/SP 51 с сопротивлением в первичной цепи 200 кОм. Для из-

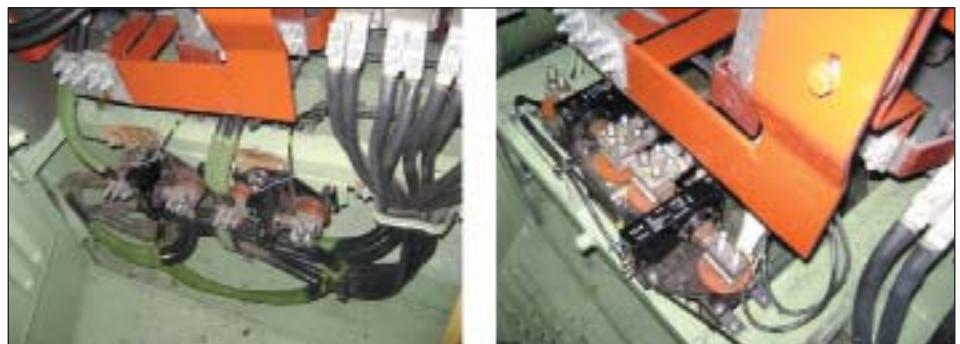


Рис. 3. Установленные датчики тока LT1000 в цепи обмотки якоря ТЭД (1–2, 7–8)

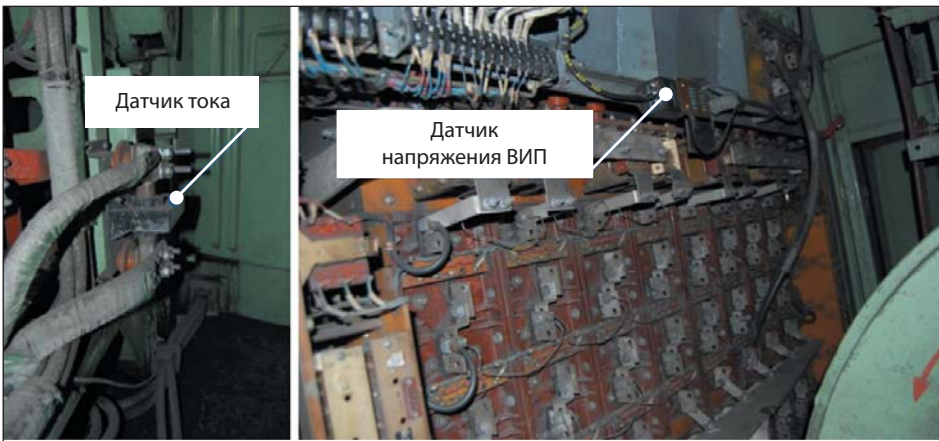


Рис. 4. Установленные датчик тока LT1000 в цепи обмотки возбуждения ТЭД (4) и датчик напряжения ВИП LV100

мерения напряжения возбуждения в режиме рекуперативного торможения на выходе ВУВ подключен датчик напряжения DU6 типа LEM LV100/SP 51 с сопротивлением в первичной цепи 18 кОм. Для регистрации уровня напря-

жения в контактной сети к проводам С1, С2 подключен датчик DU5 типа LEM LV100/SP 51 с сопротивлением первичной цепи 39 кОм.

Определение полной, активной и реактивной мощностей электровоза осуществлялось

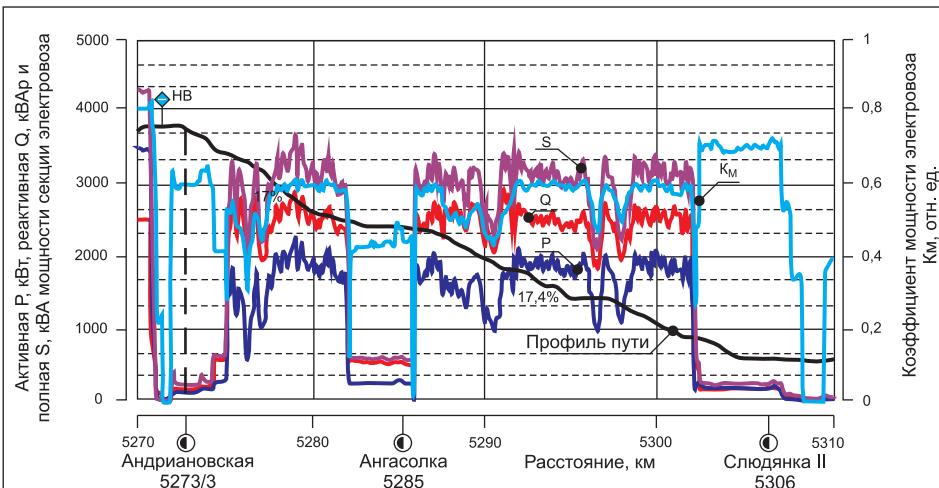


Рис. 5. Активные, реактивные, полные мощности и коэффициенты мощности секции электровоза при следовании на участке 5270–5310 км в режиме рекуперативного торможения с типовой ВУВ

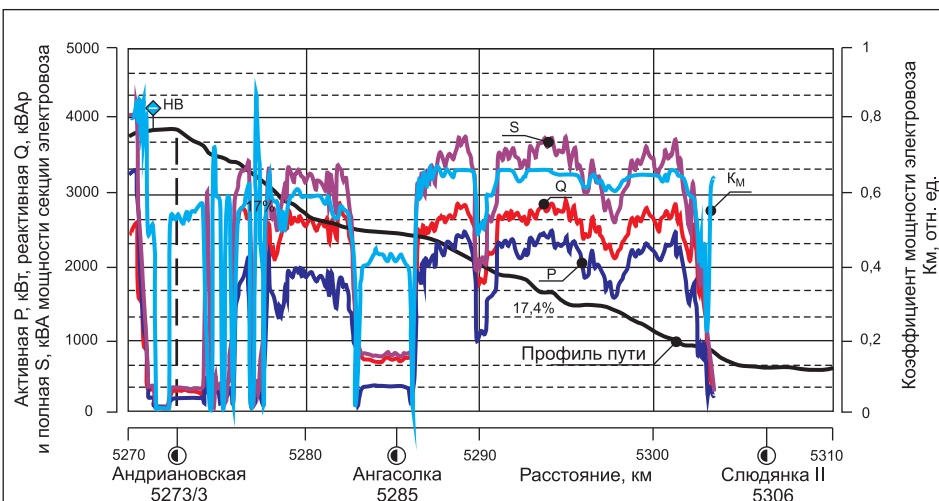


Рис. 6. Активные, реактивные, полные мощности и коэффициенты мощности секции электровоза при следовании на участке 5270–5310 км в режиме рекуперативного торможения с предлагаемой ВУВ

методом прямых измерений с помощью статического однофазного многофункционального счетчика активной и реактивной электрической энергии переменного тока СЭТ-1М.01.

Установленное на электровозе ВЛ80Р № 1829 измерительное оборудование показано на рис. 3, 4.

В ходе испытаний было выполнено восемь опытных поездок (четыре с типовой и четыре с предлагаемой ВУВ). Из них для сравнения выбраны две наиболее близкие поездки по режиму ведения поезда и уровню напряжения в контактной сети. Для этих поездок представлены активные (P), реактивные (Q) и полные (S) мощности и коэффициенты мощности K_M секции электровоза, зафиксированные счетчиком СЭТ-1М при работе с типовой (рис. 5) и предлагаемой ВУВ (рис. 6).

Анализируя полученные графики, можно видеть, что при работе электровоза с типовой ВУВ коэффициент мощности в большей части имеет значения ниже, чем при работе электровоза с предлагаемой ВУВ. В зависимости от активной мощности электровоза определено среднее значение коэффициента мощности в режиме рекуперативного торможения с типовой ВУВ, которое составило 0,572, а с предлагаемой ВУВ — 0,607. По результатам эксплуатационных испытаний электровоза ВЛ80Р № 1829 коэффициент мощности при работе с предлагаемой ВУВ оказался выше в среднем на 6% относительно работы с типовой ВУВ, а коэффициент относительной пульсации тока возбуждения уменьшился на 65%.

С целью качественной оценки работы предлагаемой ВУВ относительно типовой производился анализ электромагнитных процессов в расчете на один период ($T = 0,02$ с). На рис. 7 приведены диаграммы напряжения и тока цепи возбуждения, полученные при эксплуатационных испытаниях.

Отличительной особенностью организации работы предлагаемой ВУВ по заданному алгоритму управления является то, что открытие плеч осуществляется в начале каждого полупериода напряжения (рис. 7). Таким образом, выпрямление напряжения возбуждения производится по переднему фронту напряжения сети, не накладываясь с потерями напряжения в период коммутации плеч инвертора, возникающими при подаче угла опережения β . При работе типовой ВУВ из-за данной причины угол открытия тиристорov необходимо значительно уменьшать, чтобы компенсировать потери выпрямленного напряжения возбуждения.

Отметим также, что применение в данном проекте Press-Pack IGBT с двусторонним охлаждением позволило использовать имеющуюся систему принудительного воздушного охлаждения без существенных доработок. Кроме того, надежность данного решения подтверждена длительным периодом эксплуатации изделия при низких температурах (-50 °С).

Предлагаемая выпрямительная установка возбуждения удовлетворяет требованиям

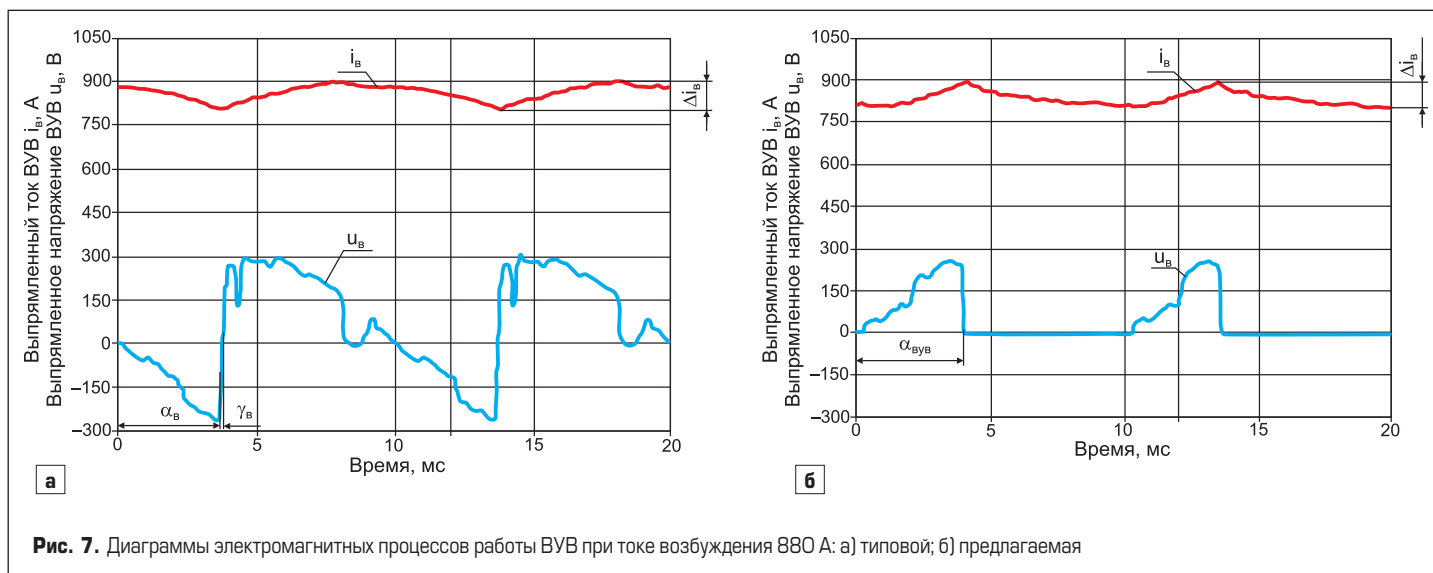


Рис. 7. Диаграммы электромагнитных процессов работы ВУВ при токе возбуждения 880 А: а) типовой; б) предлагаемая

ОАО «РЖД» по повышению энергетических показателей электровозов переменного тока и снижению эксплуатационных расходов на тягу поездов. Положительные результаты эксплуатации опытной выпрямительной установки возбуждения, выполненной с использованием Press-Pack IGBT, подтверждают техническую и экономическую целесообразность переоборудования электровозов переменного тока с коллекторными тяговыми двигателями в заводских условиях.

ВУВ на IGBT эксплуатируется на электровозе ВЛ80Р № 1829 с 14 ноября 2014 г. по настоящее время. Результаты

испытаний, представленные в данной статье, были получены при финансовой поддержке компании ОАО «РЖД». Авторы отмечают особый вклад Дирекции тяги ОАО «РЖД» в техническое развитие отечественной ж/д отрасли.

Литература

1. Мельниченко О., Линьков А., Газизов Ю., Полянский И. Выпрямительно-инверторный преобразователь для тягового подвижного состава с высоким коэффициентом мощности в режиме рекуперативного торможения // Силовая электроника. 2016. №5.

2. Трахтман Л. М. Электрическое торможение электроподвижного состава. М.: Транспорт. 1965.
 3. Мельниченко О. В. Повышение коэффициента мощности электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения // Мир транспорта. 2013. № 3(47).
 4. Линьков А. О. Математическое моделирование работы электровоза с новой выпрямительной установкой возбуждения на IGBT // Наука и техника транспорта. 2013. № 2.
 5. Электровоз ВЛ80Р. Руководство по эксплуатации. Под ред. Б. А. Тушканова. М.: Транспорт. 1985.