УДК 629.423

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РАБОТЫ ТИРИСТОРНОГО И ТРАНЗИСТОРНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЬНО-ИНВЕРТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В РЕЖИМЕ ТЯГИ НА ПЕРВОЙ ЗОНЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ

С.В. Власьевский, О.В. Мельниченко, А.Ю. Портной, С.Г. Шрамко, Д.А. Яговкин

Рассмотрены вопросы построения экспериментального стенда для исследования процессов работы тиристорного и транзисторного выпрямительно-инверторных преобразователей электровоза переменного тока в режиме тяги. На стенде реализуется два примера выполнения силовой схемы выпрямительно-инверторного преобразователя – на основе тиристоров и транзисторов, на которые даны технические характеристики. В каждой схеме преобразователя перечислены элементы электрического и механического оборудования, а также объяснено их назначение. В статье рассмотрены примеры работы тиристорного и транзисторного преобразователей в режиме выпрямителя (режим тяги электровоза) на первой зоне регулирования, имеющей отличие в процессах по отношению к более высоким (второй и третьей) зонам. Представлены осциллограммы процессов работы преобразователей в виде кривых тока и напряжения в первичной обмотке трансформатора и в цепи выпрямленного тока нагрузки (тягового двигателя), а также дано их сравнение. По результатам сравнительных испытаний работы тиристорного и транзисторного преобразователей в режиме выпрямителя на первой зоне регулирования получены экспериментальные зависимости коэффициента мощности электровоза в зависимости от изменения напряжения первой зоны. Дается сравнительная оценка энергетической эффективности работы преобразователей на первой зоне регулирования через измерение его коэффициента мощности для половины (0,5) и полного (1,0) значений напряжения первой зоны.

Ключевые слова: электровоз переменного тока, тяговый трансформатор, выпрямительно-инверторные преобразователи на тиристорах и транзисторах, колесно-моторный блок, блок управления ВИП, осциллограммы тока и напряжения, коэффициент мощности.

Введение

На сегодняшний день проблема повышения энергетических показателей электровозов переменного тока является актуальной. Так, на современных отечественных электровозах с тиристорными выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИП) коэффициент мощности в режиме тяги при номинальной нагрузке не превышает 0,84. На базе таких преобразователей созданы электровозы переменного тока серий ВЛ80Р, ВЛ85, ВЛ65, ЭП1, ЭП1М, ВЛ80ТК и 2(3)ЭС5К (Ермак) [1–3]. Все они имеют одинаковую основополагающую силовую схему, которая на сегодняшний день с точки зрения энергосбережения не отвечает современным требованиям. Ранее учеными ИрГУПС была предложена разработка ВИП на IGBT-транзисторах, обеспечивающего высокие значения коэффициента мощности [4, 5].

Описание экспериментального стенда

В данной статье описывается стенд для имитации работы ВИП электровоза в режиме тяги на первой зоне регулирования. Интерес к первой зоне заключается в том, что электромагнитные процессы на ней несколько отличаются от процессов в ВИП на высших зонах. На рис. 1 представлена функциональная схема экспериментального стенда ВИП электровоза в режиме тяги на тиристорах и IGBT-транзисторах.

В качестве нагрузки используется колёсно-моторный блок (КМБ) с тяговым двигателем НБ-514, который позволяет наиболее адекватно исследовать электромагнитные процессы работы тиристорного и транзисторного ВИП.

Стенд позволяет исследовать различные режимы работы ВИП и алгоритмы их управления, производить замеры значений коэффициента мощности, активной, реактивной и полной мощностей, переменного напряжения и тока сети, выпрямленного напряжения и тока нагрузки, производить построение необходимых зависимостей. С целью упрощения конструкции стенда и системы его управления предполагается имитация трех зон регулирования вместо четырех зон, которые имеются на реальном электровозе. Разница между этими вариантами состоит лишь в масштабе амплитуды напряжения на каждой зоне. В то же время в схеме каждой зоны сохраняется вся физическая суть электромагнитных процессов, присутствующих на реальном электровозе. Повышение

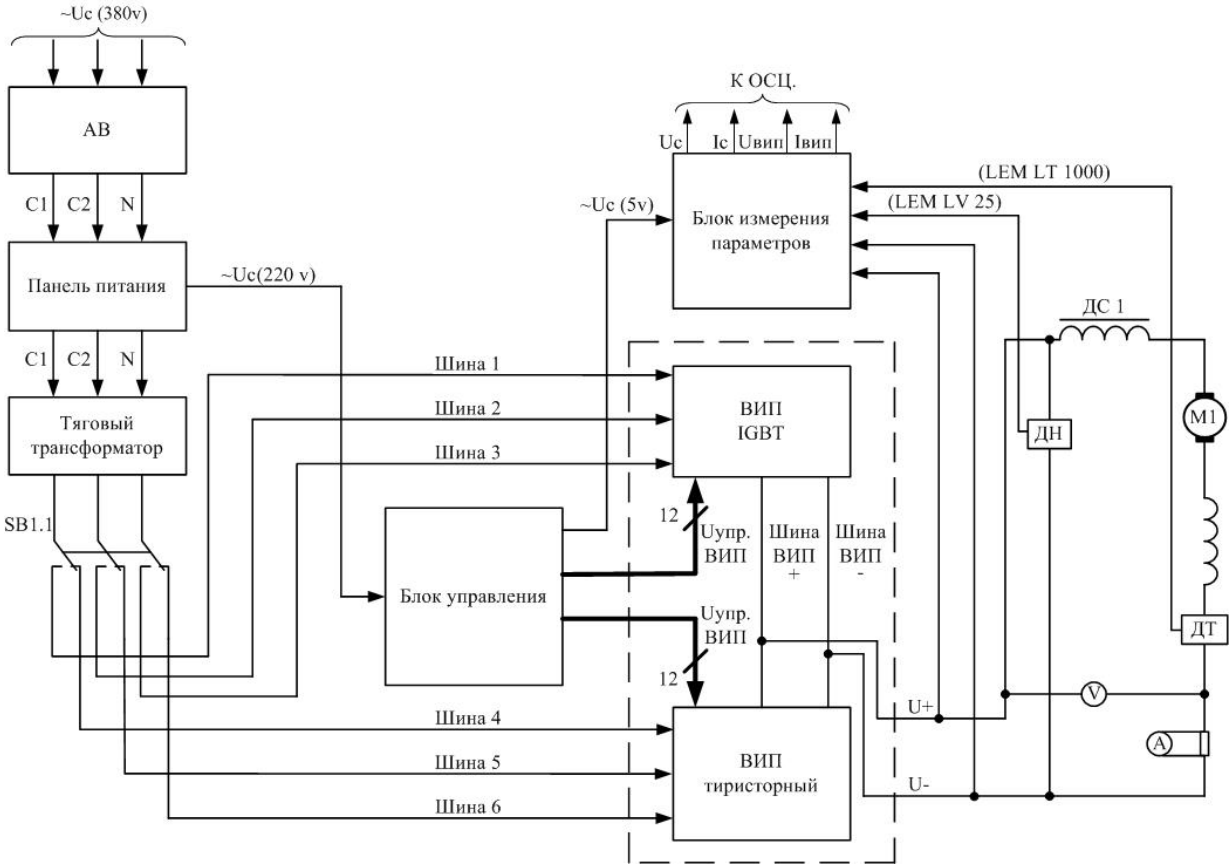


Рис. 1. Функциональная схема экспериментального стенда ВИП электровоза в режиме тяги на тиристорах и IGBT-транзисторах

напряжения при переходе на высшие зоны осуществляется последовательным подключением друг за другом необходимого количества вторичных обмоток тягового трансформатора. На рис. 2 представлена электрическая принципиальная силовая схема экспериментального стенда ВИП электровоза в режиме тяги на тиристорах и IGBT-транзисторах.

Как видно из рис. 1, стенд включает в себя две различные схемы ВИП, выбор которых осуществляется с помощью пакетного переключателя SB1. Каждое плечо тиристорного ВИП содержит один тиристор типа Т153-630-20.

Технические характеристики тиристоров Т153-630-20, используемых в экспериментальном стенде, представлены в табл. 1.

Плечи транзисторного ВИП состоят из IGBT-транзисторов типа CM1000HA-24H, технические характеристики которых представлены в табл. 2.

В каждом плече транзисторного ВИП транзистор CM1000HA-24H включен последовательно с диодом типа Д253-1600-22, основные технические характеристики которого представлены в табл. 3.

На рис. 1 и 2 содержатся следующие элементы: X1 – клеммная рейка, предназначенная для подключения напряжения сети к стенду; VS1–VS8 – плечи штатного ВИП на тиристорах; VT1–VT6, VD1–VD6, VD7, VD8 – плечи транзисторного ВИП; K1 – контактор электромагнитный; ТН – трансформатор напряжения; ТТ – трансформатор тока; СЭТ – счетчик электроэнергии; Т1 – тяговый трансформатор ОСЗМ-16 380/65В; А3 – блок системы управления; М1 – тяговый двигатель; ОВ – обмотка возбуждения; А – амперметр; V – вольтметр; SF1 – электрический автомат (автоматический выключатель); X2, X3 – розетки ~220В; АВ – автоматический выключатель; Панель питания; Блок управления; ВИП транзисторный; ВИП тиристорный; Блок измерения параметров работы ВИП; V – вольтметр; ДН – датчик напряжения LEM LV 25; ДС1 – дроссель ДС1; ТЭД – тяговый электродвигатель; ДТ – датчик тока LEM LT 1000.

В выходную цепь ВИП включен дроссель ДС-1, который необходим для сглаживания пульсаций выпрямленного тока в цепи тягового двигателя. Основные технические характеристики дросселя типа ДС-1 представлены в табл. 4.

В стенде применен тяговый трансформатор типа ОСЗМ-16 380/65 с напряжением первичной обмотки 380 В и тремя вторичными обмотками, напряжение каждой из которой равно 65 В.

Для обеспечения управления комбинированным ВИП разработана система управления, которая позволяет реализовывать различные алгоритмы управления. Питание блока управления осуществляется от сети ~220 В.

Стенд включает в себя следующие блоки:

– имитатор тягового трансформатора;

– комбинированный ВИП, предназначенный для выпрямления однофазного переменного тока в постоянный и плавного регулирования выпрямленного напряжения на тяговом двигателе;

– сглаживающий реактор, предназначенный для уменьшения пульсации выпрямленного тока ТЭД;

– блок управления БУ ВИП состоит из блока процессора, блока ключей, блоков драйверов, панели питания с индикатором;

– счетчик СЭТ-1М.01М, предназначенный для замеров значений коэффициента мощности, активной, реактивной и полной мощностей;

– осциллограф предназначен для наглядного представления формы кривых напряжения и тока первичной обмотки трансформатора, напряжения и тока ВИП, а также для сохранения полученных результатов на usb-накопитель;

– нагрузка в виде КМБ электровоза ВЛ85 с тяговым двигателем НБ-514.

В состав комбинированного ВИП входят следующие элементы:

– IGBT-транзистор;

– диод;

– тиристор;

– разрядное диодное плечо;

– снабберная цепь.

Панель питания с индикатором содержит следующие элементы:

– блок процессора, предназначенный для формирования импульсов управления плеч ВИП;

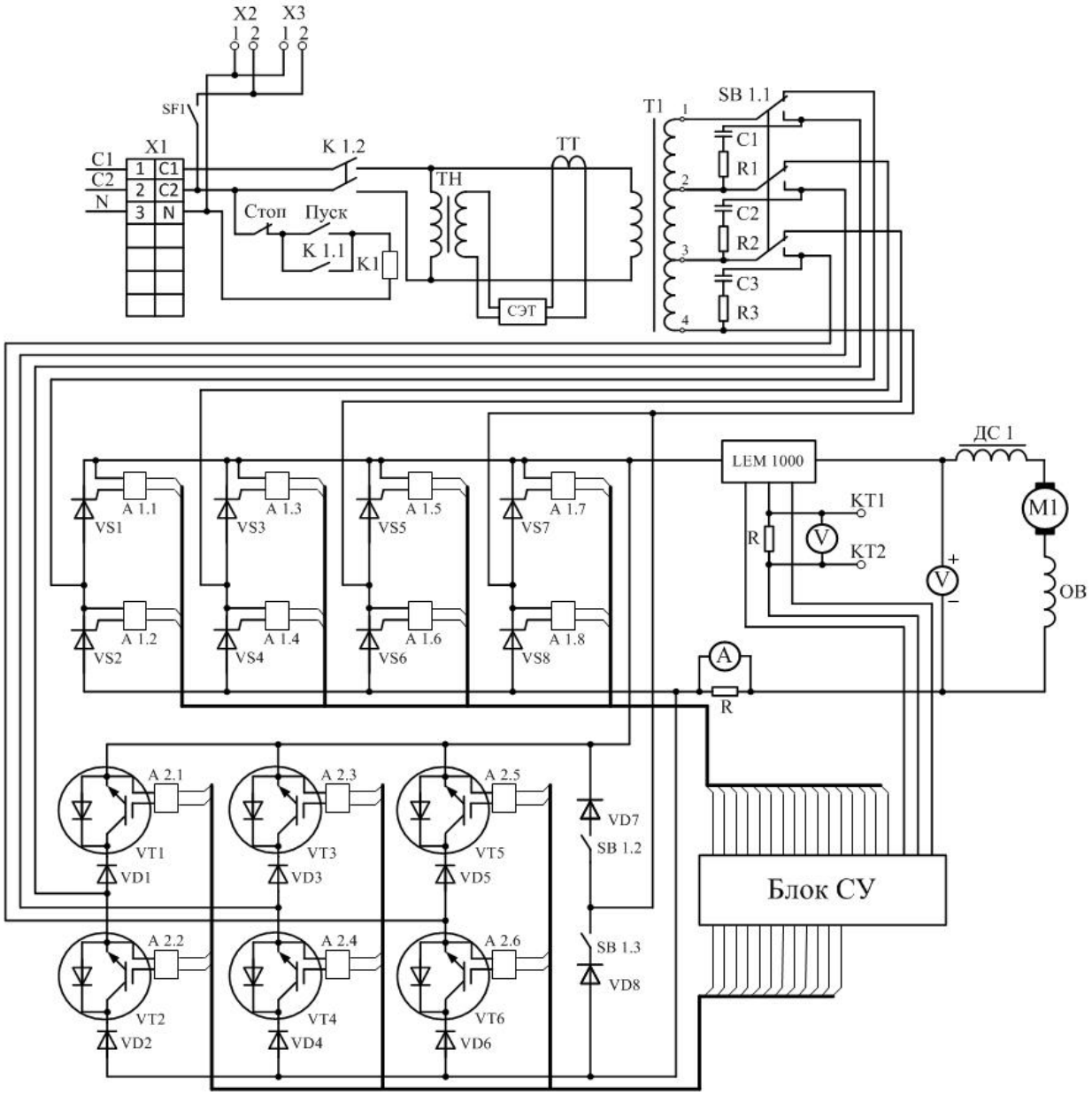


Рис. 2. Электрическая принципиальная силовая схема стенда ВИП электровоза в режиме тяги на тиристорах и IGBT-транзисторах

Таблица 1

Основные технические характеристики тиристора Т153-630-20

Климатическое исполнение	УХЛ2; Т2
Тип корпуса тиристора	РТ53
Тип применяемого охладителя	О153, О253
Средний ток в открытом состоянии, А	630
Постоянное обратное напряжение, В	2000
Повторяющийся импульсный ток в открытом состоянии, А	1610
Масса, кг	0,5

Таблица 2

Основные технические характеристики транзистора CM1000HA-24H

Максимальное напряжение коллектор – эмиттер, В	1200
Напряжение насыщения коллектор – эмиттер, В	2,5
Номинальный ток одиночного трансформатора, А	1000
Максимальная частота модуляции, кГц	25
Входная емкость затвора, нФ	20
Драйвер управления	Внешний
Максимальная рассеиваемая мощность, Вт	5800
Максимальный ток эмиттера, А	2000
Максимально допустимое напряжение затвор – эмиттер, В	6
Напряжение эмиттер – коллектор, В	2,7
Время нарастания импульса тока в цепи К–Э транзистора на индуктивной нагрузке, нс	1500
Напряжение изоляции, В	2500
Температурный диапазон, °С	40…150

Таблица 3

Основные технические характеристики диода типа Д253-1600-22

Средний прямой ток, А	1600
Ударный прямой ток, А	35000
Повторяющийся импульсный обратный ток, мА	90
Импульсное прямое напряжение, В	1,50
Повторяющееся импульсное обратное напряжение, В	2200
Максимальная температура перехода, °С	190
Тепловое сопротивление переход – корпус, град/Вт	0,018
Рекомендуемые охладители	О153, О253
Масса, кг	0,55

Таблица 4

Основные технические характеристики дросселя типа ДС-1

Номинальное напряжение, В	150
Номинальный ток, А	90 (пульсирующий)
Частота, Гц	100
Охлаждение	Воздушное, естественное
Масса, кг	58

– блок ключей, предназначенный для распределения управляющих импульсов по плечам тиристорного ВИП;

– драйвера, предназначенные для управления IGBT-транзисторами, а также обеспечивающие гальваническую развязку силовой цепи и цепи управления;

– панель включения/выключения БУ с индикатором работы.

Процессы работы тиристорного и транзисторного преобразователей и их алгоритмы управления

Регулирование выпрямленного напряжения на первой зоне в тиристорном преобразователе обеспечивается с помощью плеч VS5–VS8, а в транзисторном с помощью плеч VD5, VT5, VD6, VT6 и VD7, VD8.

Алгоритм управления плечами тиристорного преобразователя заключается в том, что в первом

полупериоде напряжения сети на плечо VS8 подают импульсы управления с фазовым нерегулируемым углом α_0, а на плечо VS5 – с фазовым регулируемым углом $\alpha_р$. Во втором полупериоде напряжения на плечо VS7 подают импульсы управления с фазовым нерегулируемым углом α_0, а на плечо VS6 – с фазовым регулируемым углом $\alpha_р$.

Алгоритм управления плечами транзисторного преобразователя заключается в том, что импульсы управления с фазовым регулируемым углом α_{reg} в первом полупериоде напряжения сети подают на плечо VT5, а во втором полупериоде напряжения – на плечо VS6.

В результате реализации таких алгоритмов управления происходит регулирование выпрямленного напряжения преобразователя на интервале от начала до конца первой зоны.

В ходе проведения сравнительных испытаний на стенде работы тиристорного и транзисторного преобразователей на первой зоне регулирования выпрямленного напряжения получены осциллограммы напряжения и тока в первичной обмотке трансформатора, выпрямленного напряжения и тока в цепи тягового двигателя, а также значения коэффициентов мощности.

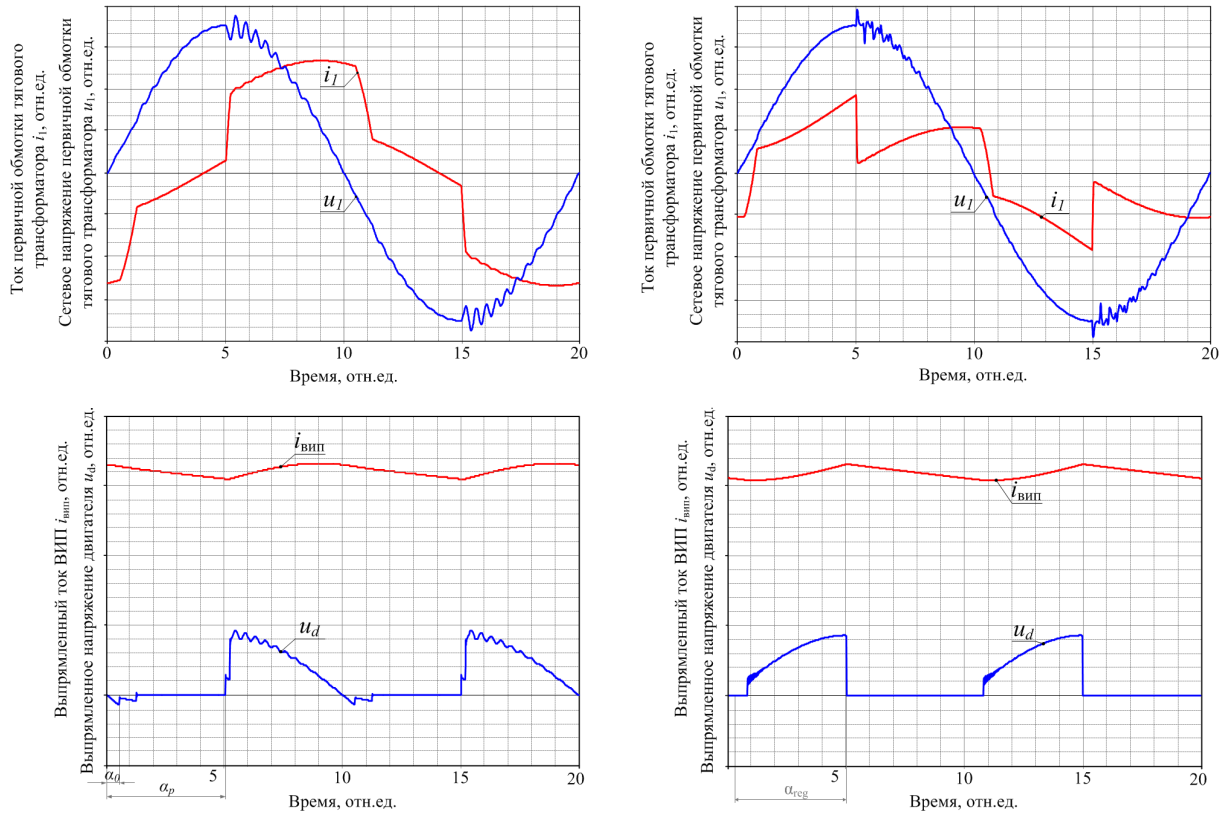
На рис. 3 представлены осциллограммы процессов работы преобразователей: тиристорного (а), транзисторного (б), полученные на экспериментальном стенде в режиме тяги электровоза на половине (0,5) первой зоны регулирования.

Результаты исследований на экспериментальном стенде

Проанализировав полученные осциллограммы, можно сделать вывод, что низкий коэффициент мощности тиристорного преобразователя объясняется тем, что в первой половине первой зоны тиристоры открываются во второй половине полупериода (см. рис. 3, а). Кроме того, индуктивный характер нагрузки обуславливает дополнительный сдвиг фазы первичного тока трансформатора относительно его напряжения. В транзисторном же преобразователе с разработанным способом его управления предлагается производить открытие плеч импульсами управления $\alpha_р$ с опережением по времени относительно максимума напряжения сети (см. рис. 3, б). Это частично компенсирует сдвиг фаз, вносимый индуктивным характером нагрузки, и обуславливает значительно больший коэффициент мощности [4, 5].

Диодные плечи VD7 и VD8, подключенные параллельно цепи выпрямленного тока преобразователя, позволяют поддерживать ток двигателей в промежуток времени между выключением и включением IGBT-транзисторов при смене полупериода напряжения сети.

На рис. 4 представлена экспериментально по-



а) б)

Рис. 3. Осциллограммы процессов работы преобразователя на половине (0,5) первой зоны регулирования: а – тиристорного, б – транзисторного

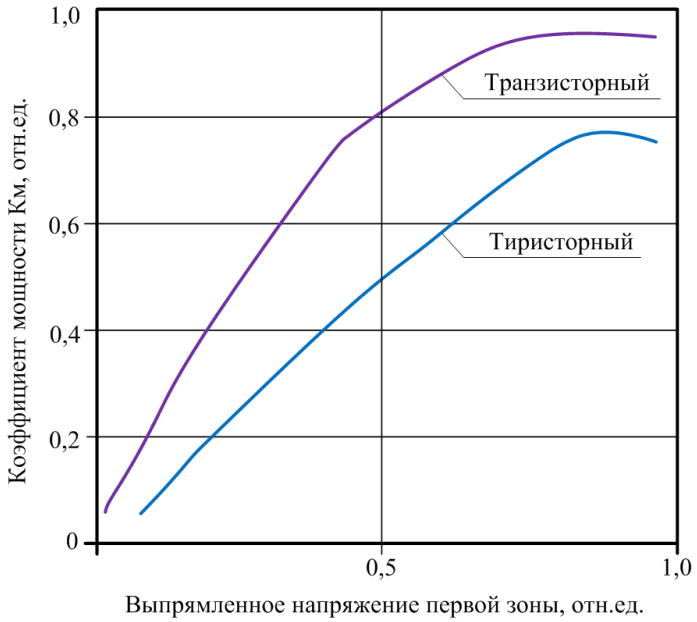


Рис. 4. Зависимость коэффициента мощности электровоза от напряжения первой зоны в режиме тяги для тиристорного и транзисторного преобразователей

Таблица 5

Коэффициенты мощности тиристорного и транзисторного преобразователей для половины (0,5) и полного (1,0) значения напряжения первой зоны

Зона регулирования	Коэффициент мощности		Разница, %
	Тиристорный ВИП	Транзисторный ВИП	
0,5	0,45	0,83	84
1,0	0,74	0,95	28

лученная зависимость коэффициента мощности электровоза от напряжения первой зоны для тиристорного и транзисторного преобразователей в режиме тяги электровоза.

Из графика видно, что на интервале всей первой зоны коэффициент мощности транзисторного преобразователя значительно выше, чем у тиристорного преобразователя и может достигать значения 0,95 в конце зоны.

В табл. 5 приведено сравнение значений коэффициентов мощности для тиристорного и транзисторного преобразователей в режиме тяги электровоза для половины (0,5) и полного (1,0) значения напряжения первой зоны.

Заключение

По результатам проведенных испытаний на экспериментальном стенде можно сделать следующие выводы:

– коэффициент мощности на половине (0,5) первой зоны регулирования у тиристорного преобразователя равен 0,45, а у транзисторного преобразователя 0,83, что больше на 84 %;

– коэффициент мощности на полной (1,0) первой зоне регулирования у тиристорного преобразователя равен 0,74, а у транзисторного 0,95, что больше на 28 %.

Литература

1. Тихменев, Б.Н. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями / Б.Н. Тихменев, В.А. Кучумов. – М.: Транспорт, 1988. – 312 с.

2. Тихменев Б.Н. Подвижной состав электрифицированных железных дорог / Б.Н. Тихменев, Л.М. Трахтман. – М.: Транспорт, 1980 – 362 с.

3. Электровоз ВЛ85: руководство по эксплуатации / Б.А. Тушканов, Н.Г. Пушкарев, Л.А. Позднякова и др. – М., 1995. – 480 с.

4. Пат. 2498490 Российская Федерация, МПК H02M, H02P, G05F, B60L. Многозонный выпрямительно-инверторный преобразователь и способ управления преобразователем / А.Ю. Портной, О.В. Мельниченко, С.Г. Шрамко, А.Г. Полуянов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный университет путей сообщения». – № 2012114982/07; заявл. 16.04.2012; опубл. 10.11.2013, Бюл. № 31. – 7 с.: ил.

5. Яговкин, Д.А. Разработка нового энергосберегающего алгоритма управления ВИП электровоза на IGBT модулях / Д.А. Яговкин, О.В. Мельниченко, А.Ю. Портной // Вестник Института подвижного состава / под ред. А.Е. Стецюка, Ю.А. Гамоли. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2013. – Вып. 5 – С. 17–24.

Власьевский Станислав Васильевич, д-р техн.х наук, профессор кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика», Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск; vlas@festu.khv.ru.

Мельниченко Олег Валерьевич, канд.т техн. наук, доцент кафедры «Электроподвижной состав», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; melnichenko@irgups.ru.

Портной Александр Юрьевич, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Теоретическая механика и приборостроение», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; portnoyiriit@yandex.ru.

Шрамко Сергей Геннадьевич, старший преподаватель кафедры «Электроподвижной состав», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; novorosserg@yandex.ru.

Яговкин Дмитрий Андреевич, аспирант кафедры «Электроподвижной состав», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; yadima11_06@mail.ru.

Поступила в редакцию 30 июля 2014 г.

Bulletin of the South Ural State University
Series "Power Engineering"
2014, vol. 14, no. 4, pp. 52–59

TEST STAND FOR RESEARCH ON OPERATION PROCESSES OF THYRISTOR AND TRANSISTOR REVERSIBLE CONVERTERS OF AC LOCOMOTIVES IN TRACTION MODE ON THE FIRST CONTROL BAND

***S.V. Vlasyevsky**, Far Eastern State Transport University (DVGUPS), Khabarovsk, Russian Federation, vlas@festu.khv.ru,*
***O.V. Melnichenko**, Irkutsk State Transport University (IrGUPS), Irkutsk, Russian Federation, Melnichenko@irgups.ru,*
***A.Yu. Portnoy**, Irkutsk State Transport University (IrGUPS), Irkutsk, Russian Federation, portnoyiriit@yandex.ru,*
***S.G. Shramko**, Irkutsk State Transport University (IrGUPS), Irkutsk, Russian Federation, novorosserg@yandex.ru,*
***D.A. Yagovkin**, Irkutsk State Transport University (IrGUPS), Irkutsk, Russian Federation, yadima11_06@mail.ru*

The paper deals with construction of a test stand for research on operation processes of thyristor and transistor reversible converters of AC locomotive in traction mode. Stand can implement two examples of structure diagrams of reversible converters – based on thyristors and transistors with engineering specifications provided. Each diagram presents elements of electrical and mechanical equipment along with explanation of their functions. It is described how thyristor and transistor converters operate as rectifiers (AC locomotive traction mode) on the first control band that differs in processes from the higher (second and third) bands. The paper presents oscillograph records of converter operation processes as curves of current and voltage on the primary coil and in rectified load current circuit (traction motor); their comparison is also given. From the results of comparative tests of thyristor and transistor converters operating as rectifier on the first control band we obtained experimental dependencies of locomotive power factor on voltage alteration in the first band. The paper gives comparative evaluation of energy performance of converter operation on the first control band through measuring its power factor for half (0.5) and full (1.0) values of the first band voltage.

Keywords: AC locomotive, traction transformer, thyristor and transistor reversible converters, wheel-motor unit, RC control unit, current and voltage oscillograph records, power factor.

References

1. Tikhmenev B.N. Kuchumov V.A. *Elektrovozy peremennogo toka s tiristornymi preobrazovatelyami* [Electric AC Thyristor Converters]. Moscow, Transport Publ., 1988. 312 p.

2. Tikhmenev B.N. Trakhtman L.M. *Podvizhnoy sostav elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* [Rolling Electrified Railways Theory of Electrical Equipment. RE. Circuits and Devices]. Moscow, Transport Publ., 1980. 362 p.

3. Tushkanov B.A., Pushkarev N.G., Pozdnjakova L.A. *Elektrovoz VL85: Rukovodstvo po ekspluatatsii* [Electric Locomotive VL85: Manual]. Moscow, 1995. 480 p.

4. Portnoy A.Y., Melnichenko O.V., Shramko S.G. Poluyanov A.G. [Multiband Rectifier Inverter Converter and Inverter Control Method]. Patent 2498490 Russian Federation, appl. 16.04.2012; publ. 11.10.2013, Bul. no. 31.

5. Stetsjuka A.E., Gamoli Yu.A. (eds.), Yagovkin D.A., Melnichenko O.V., Portnoy A.Y. [Development of New Energy-Saving Control Algorithm VIP Locomotive on IGBT Modules]. *Bulletin of the Institute of Rolling Stock*, Khabarovsk, 2013, vol. 5, pp. 17–24. (in Russ.)

Received 30 July 2014