

Оценка энергетической эффективности электровозов ЗЭС5К при использовании технологии интервального регулирования движения по типу «виртуальная сцепка»

С. В. ВЛАСЬЕВСКИЙ¹, О. А. МАЛЫШЕВА¹, Н. Г. ШАБАЛИН², В. В. СЕМЧЕНКО³

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ДВГУПС), Хабаровск, 680021, Россия

² Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), Москва, 109029, Россия

³ Акционерное общество «Дорожный центр внедрения Красноярской железной дороги» (АО «ДЦВ Красноярской ж.д.»), Красноярск, 660021, Россия

Аннотация. Представлен анализ результатов эксплуатационных испытаний технологии интервального регулирования движения поездов по типу «виртуальная сцепка» на участке Дальневосточной железной дороги Хабаровск-2 — Ружино по удельному расходу электрической энергии на тягу и возврату ее в контактную сеть при рекуперативном торможении электровозами ЗЭС5К. Результаты испытаний указывают на повышение энергетической эффективности работы электровозов при применении этой технологии по типу «виртуальная сцепка».

Ключевые слова: электровоз; интервальное регулирование движения поездов; виртуальная сцепка; удельный расход электрической энергии; энергетическая эффективность

Введение. При современной инфраструктуре железных дорог повышение их пропускной и провозной способности можно осуществить за счет сокращения интервала попутного следования поездов, их пакетного пропуска, увеличения скоростей движения локомотивов и повышения массы поездов. Для выполнения поставленных целей необходимо решить целый ряд задач по совершенствованию технологии формирования, отправления, пропуска и приема поездов, изменения их нормативного графика движения и др. [1, 2, 3].

Одним из перспективных путей повышения пропускной способности железных дорог является способ сокращения интервала попутного следования поездов и их пакетного пропуска. В 2019 г. апробация новой технологии интервального регулирования движения поездов (ИРДП) состоялась на Дальневосточной железной дороге, где прошли эксплуатационные испытания ИРДП по типу «виртуальная сцепка». Внедрение технологии ИРДП является одним из приоритетных направлений развития железнодорожного транспорта России, которые отражены в документе «Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД на

период до 2025 года», утвержденном Правительством Российской Федерации от 19.03.2019 № 466-р. Предполагается, что технология ИРДП будет использоваться прежде всего на тех полигонах железных дорог, где имеется интенсивное движение поездов с грузонапряженностью более 50 млн т·км брутто [4].

Реализовываться технология ИРДП должна на основе развития современных технических решений в области организации управления процессами перевозок, путейского хозяйства, связи, электроснабжения, подвижного состава, и в частности электровозов переменного тока. В комплекс задач по совершенствованию технического уровня систем управления и безопасности движения на электровозах переменного тока должны быть включены и задачи по разработке современных выпрямительно-инверторных преобразователей, обеспечивающих высокий коэффициент мощности электровоза в режиме тяги и рекуперативного торможения (до величины 0,96). Благодаря повышению коэффициента мощности снижается удельный расход электроэнергии на тягу поездов, что увеличивает эффективность применения технологии ИРДП.

Общие сведения о технологии ИРДП по типу «виртуальная сцепка». ИРДП — это технология организации движения поездов с обеспечением между ними минимального интервала, безопасного для движения на перегонах и станциях.

Технология реализуется благодаря наличию системы интервального регулирования движения поездов (СИРДП), которая представляет собой комплекс программно-функциональных блоков системы управления движением, обеспечивающий безопасное автоматическое регулирование интервалов попутного следования по одному пути и направлению движения железнодорожных поездов, обращающихся на станциях и перегонах участков железных дорог.

■ E-mail: vlas@festu.khv.ru (С. В. Власьевский)

Цель внедрения СИРДП заключается в том, чтобы повысить пропускную способность железных дорог путем увеличения количества пар поездов на выбранных участках. Для достижения этой цели потребовалось решить такие задачи, как внедрение новой системы автоблокировки, основанной на применении перегонной системы управления движением с подвижными блок-участками, внедрение на электровозах бортовых устройств локомотивной сигнализации типа АЛС-ЕН и АЛС-Р, обеспечивающих режим автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа с многозначной фазоразностной модуляцией кодов и передачей данных по каналу радиосвязи на бортовые устройства безопасности [5, 6, 7, 8, 9, 10].

На участках железных дорог, оборудованных типовой числовой кодовой автоблокировкой, на электровозах используют известное бортовое устройство АЛСН, обеспечивающее режим автоматической локомотивной сигнализации непрерывного действия с числовым кодированием рельсовых цепей [7], и систему автоматического управления торможением (САУТ). В этом случае для внедрения технологии ИРДП на электровозах надо использовать бортовые комплексы БЛОК и КЛУБ-У (бортовые устройства безопасности со спутниковой навигацией и электронной картой маршрута) [8], ИСАВП-РТ-М (система автоведения для двояных поездов) [9] и радиомодемы для передачи данных [10]. Применение этих устройств при пакетном графике движения позволит сократить интервал попутного следования на участках железной дороги и снизить потерю времени при движении поезда на желтый сигнал светофора.

В настоящее время более перспективной является технология ИРДП по типу «виртуальная сцепка». Такая технология позволяет решить проблемы, возникающие при пропуске двояных поездов по типу «жесткая сцепка». ИРДП по типу «виртуальная сцепка» снимает проблему удлинения приемоотправочных путей, сокращает пиковые нагрузки на систему тягового электроснабжения и время формирования виртуального сцепного состава, повышает скорость движения поезда на желтый сигнал светофора с гарантией безопасности. На рисунке представлена технология ИРДП по типу «виртуальная сцепка» с разновидностями технологии управления потоком поездов.

Эксплуатационные испытания технологии ИРДП по типу «виртуальная сцепка» на Дальневосточной железной дороге. В июле 2019 г. на участке Хабаровск-2 — Ружино Дальневосточной железной дороги были проведены эксплуатационные испытания технологии ИРДП по типу «виртуальная сцепка» в условиях реального перевозочного процесса. Опытные поездки выполнялись с грузовыми поездами четного и нечетного направления, которые вели электровозы

ЗЭС5К № 132 и № 329 [11]. На электровозах были модернизированы системы автоведения типа ИСАВП-РТ, установлены радиомодемы «М-Линк», осуществлена доработка бортовой управляющей программы.

Во время эксплуатационных испытаний технологии ИРДП значения параметров движения поездов фиксировались на съемный носитель БНИ-9, а для последующего анализа результатов испытаний расшифровка параметров движения и автоведения осуществлялась с помощью автоматизированного рабочего места АРМ РПДА-Т версии 4.7.18.0608. Кроме этих параметров, по счетчикам электроэнергии проводился учет расхода электроэнергии ведущим и ведомым электровозами по станциям Хабаровск-2, Кругликово, Вяземская, Бикин, Ласточка, Ружино.

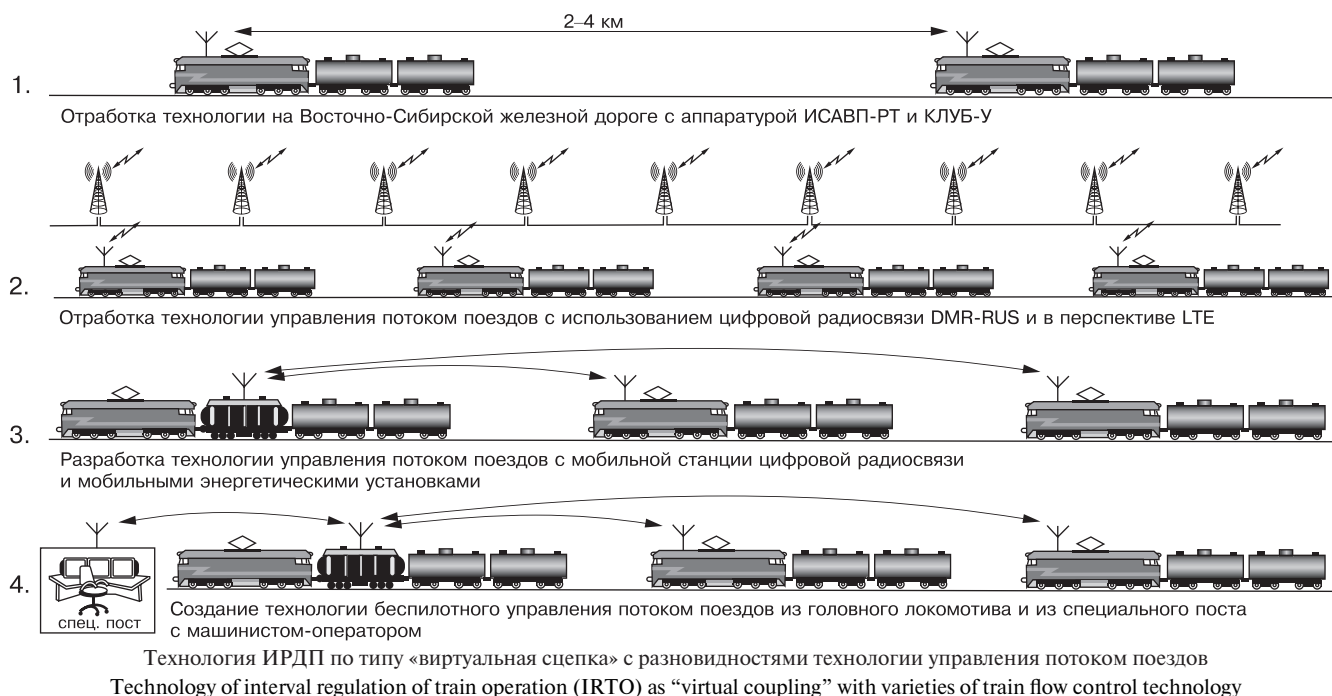
В процессе испытаний технологии ИРДП согласно программе и методике были проведены проверки систем управления на правильность их функционирования:

- проверка обмена связи между электровозами по радиоканалу;
- проверка управления ведомого электровоза с поездом при движении ведущего электровоза с поездом;
- проверка управления ведомым электровозом при торможении поезда ведущим электровозом;
- проверка регламента переговоров между машинистами ведущего и ведомого электровозов;
- проверка регламента переговоров между дежурным по станции (ДСП), поездным диспетчером (ДНЦ) и машинистом электровоза (ТЧМ);
- проверка порядка проследования места ограничения скорости по предупреждению.

Во время испытаний были реализованы режимы ведения поездов с минимальными и максимальными расстояниями между нахождением составов относительно друг друга. В процессе испытаний было выполнено ведущим электровозом пять регулировочных торможений, обусловленных профилем пути и требованиями по ограничению скорости. Эти торможения показали, что расстояние между поездами поддерживалось достаточным для сохранения ведомым электровозом нормативных режимов ведения поезда, что не потребовало дополнительных действий от системы автоведения ИСАВП-РТ-М.

В табл. 1 приведены показатели движения поездов при применении технологии ИРДП по типу «виртуальная сцепка» в четном и нечетном направлении.

В выводах после испытаний данной технологии указано, что программная и аппаратная части системы автоведения ИСАВП-РТ-М работали устойчиво, режимы тяги и выбега осуществлялись корректно с учетом профиля пути, а режим торможения поезда при подъезде к местам, требующим снижения скорости, осуществлялся в соответствии с Правилами тех-



нического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава. Опытная проверка технологии показала, что вмешательства устройств безопасности КЛУБ-У и САУТ-ЦМ/485 в процесс испытаний не происходило.

Анализ результатов проверок позволил выявить недостатки по реализации некоторых процессов ведения поездов в технологии ИРДП по типу «виртуальная сцепка». Так, например, процесс ведения поезда ведущим электровозом с минимальным временем хода движения приводит к значительному увеличению расстояния между поездами вследствие невозможности нагона отставания поезда с ведомым электровозом после проследования им мест ограничения скорости и лимитирующих подъемов.

Все выявленные недостатки в настоящее время устраняются специалистами, причастными к разработке технологии ИРДП по типу «виртуальная сцепка», и планируется, что усовершенствованная технология будет проверяться на линии в последующих эксплуатационных испытаниях.

Оценка расхода электроэнергии электровозами на тягу поездов четного и нечетного направления движения на участке Хабаровск-2 — Ружино при испытании технологии ИРДП по типу «виртуальная сцепка». Как сказано выше, во время испытаний технологии ИРДП по типу «виртуальная сцепка» осуществлялся учет расхода электроэнергии ведущим и ведомым электровозами на тягу поездов по станциям Хабаровск-2, Кругликово, Вяземская, Бикин, Ласточка, Ружино.

Таблица 1

Показатели движения поездов при применении технологии ИРДП по типу «виртуальная сцепка» в четном и нечетном направлении

Table 1

Indicators of the trains motion when using the IRTO technology like “virtual coupling” in even and odd directions

Направление движения, участок пути	Техническая скорость ведущего электровоза, км/ч	Техническая скорость ведомого электровоза, км/ч	Минимальное расстояние между поездами, км	Максимальное расстояние между поездами, км	Частота смены режима ведения (максимальная) за 1 мин
Четное, Хабаровск-2 — Ружино	52,8	52,7	3,9	9,0	2
Нечетное, Ружино — Хабаровск-2	54,7	54,6	4,1	11,6	2

В табл. 2 представлены данные расхода (тяги) и возврата электроэнергии в контактную сеть (рекуперативное торможение) электровозами ЗЭС5К № 132 и ЗЭС5К № 329 на тягу поездов по перегонам четного направления движения на участке Хабаровск-2 — Ружино, а в табл. 3 — нечетного направления на том же участке, записанные со счетчиков электроэнергии электровозов.

Анализ удельного расхода электроэнергии электровозами на тягу поездов, движущихся по

Таблица 2

Данные расхода (тяги) и возврата в контактную сеть (рекуперативное торможение) электроэнергии электровозами 3ЭС5К № 329 (ведущий) и 3ЭС5К № 132 (ведомый) на тягу поездов четного направления движения на участке Хабаровск-2 — Ружино

Table 2

Data on consumption (traction) and return to the contact network (regenerative braking) of electric power by 3ES5K electric locomotives No. 329 (lead) and 3ES5K No. 132 (driven) for traction of trains of even direction on the section Khabarovsk-2 — Ruzhino

Перегон между станциями, длина в км	Режим работы электровоза	Расход и возврат в контактную сеть электроэнергии в кВт·ч по секциям (№ 1, 2, 3) ведущего электровоза 3ЭС5К № 329 с поездом массой 6284 т (груз — уголь), 69 вагонов		Расход и возврат в контактную сеть электроэнергии в кВт·ч по секциям (№ 1, 2, 3) ведомого электровоза 3ЭС5К № 132 с поездом массой 6217 т (груз — уголь), 69 вагонов	
		Секции электровоза	Сумма на электровоз	Секции электровоза	Сумма на электровоз
Хабаровск-2 — Кругликово, 43 км	Тяга	№ 1 — 929,0	2795,0	№ 1 — 1038,3	2977,5
		№ 2 — 935,2		№ 2 — 971,8	
		№ 3 — 930,8		№ 3 — 967,4	
	Рекуперативное торможение	№ 1 — 126,0	370,3	№ 1 — 150,2	473,9
		№ 2 — 121,3		№ 2 — 138,9	
		№ 3 — 123,0		№ 3 — 184,8	
Кругликово — Вяземская, 76 км	Тяга	№ 1 — 1091,1	3245,2	№ 1 — 1253,0	3638,7
		№ 2 — 1074,1		№ 2 — 1179,1	
		№ 3 — 1080,0		№ 3 — 1206,6	
	Рекуперативное торможение	№ 1 — 138,8	401,2	№ 1 — 102,5	292,6
		№ 2 — 127,4		№ 2 — 87,1	
		№ 3 — 135,0		№ 3 — 103,0	
Вяземская — Бикин, 105 км	Тяга	№ 1 — 2029,9	6103,4	№ 1 — 2258,8	6621,3
		№ 2 — 2033,5		№ 2 — 2119,4	
		№ 3 — 2040,0		№ 3 — 2243,1	
	Рекуперативное торможение	№ 1 — 442,9	1299,4	№ 1 — 451,6	1378,5
		№ 2 — 426,5		№ 2 — 425,7	
		№ 3 — 430,0		№ 3 — 501,2	
Бикин — Ласточка, 57 км	Тяга	№ 1 — 761,7	2286,0	№ 1 — 846,3	2457,2
		№ 2 — 754,3		№ 2 — 799,7	
		№ 3 — 770,0		№ 3 — 811,2	
	Рекуперативное торможение	№ 1 — 35,0	90,0	№ 1 — 15,7	50,0
		№ 2 — 25,0		№ 2 — 15,9	
		№ 3 — 30,0		№ 3 — 18,4	
Ласточка — Ружино, 118 км	Тяга	№ 1 — 1462,8	4353,7	№ 1 — 1950,9	5444,9
		№ 2 — 1420,9		№ 2 — 1885,9	
		№ 3 — 1470,0		№ 3 — 1608,1	
	Рекуперативное торможение	№ 1 — 182,1	530,4	№ 1 — 207,4	636,5
		№ 2 — 172,3		№ 2 — 200,6	
		№ 3 — 176,0		№ 3 — 228,5	
Итого по всем перегонам участка Хабаровск-2 — Ружино, 399 км	Тяга, $\Theta_{\text{тяги}}$	18782,5		21139,6	
	Рекуперативное торможение $\Theta_{\text{рек}}$	2681,3		2831,5	
Коэффициент рекуперации K_p электровозов для участка $K_p = \frac{\Theta_{\text{рек}}}{\Theta_{\text{тяги}}} \cdot 100 \%$		14,27 %		13,39 %	
Выполненная работа ИРДП по типу «виртуальная сцепка», 10^4 т·км	$A = (Q_1 + Q_2)S = (6284 + 6217) \cdot 399 = 12\,501 \cdot 399 = 498,7899$				
Удельный расход электроэнергии ИРДП по типу «виртуальная сцепка», кВт·ч/ 10^4 т·км	$\text{Уд. расход} = (\sum \Theta_{\text{тяги}} - \sum \Theta_{\text{рек}}) / A = ((18782,5 + 21139,6) - (2681,3 + 2831,5)) / 498,7899 = 69$				

Таблица 3

Данные расхода (тяги) и возврата в контактную сеть (рекуперативное торможение) электроэнергии электровозами 3ЭС5К № 132 (ведущий) и 3ЭС5К № 329 (ведомый) на тягу поездов нечетного направления движения на участке Ружино — Хабаровск-2

Table 3

Data on consumption (traction) and return to the contact network (regenerative braking) of electric power by 3ES5K electric locomotives No. 132 (lead) and 3ES5K No. 329 (driven) for traction of trains of odd direction on the section Ruzhino — Khabarovsk-2

Перегон между станциями, длина в км	Режим работы электровоза	Расход и возврат в контактную сеть электроэнергии в кВт·ч по секциям (№ 1, 2, 3) ведущего электровоза 3ЭС5К № 132 с поездом массой 1688 т, (порожняк), 71 вагон		Расход и возврат в контактную сеть электроэнергии в кВт·ч по секциям (№ 1, 2, 3) ведомого электровоза 3ЭС5К № 329 с поездом массой 1676 т, (порожняк), 71 вагон	
		Секции электровоза	Сумма на электровоз	Секции электровоза	Сумма на электровоз
Ружино — Ласточка, 118 км	Тяга	№ 1 — 1670,0	5067,9	№ 1 — 1231,7	3705,0
		№ 2 — 1659,6		№ 2 — 1235,3	
		№ 3 — 1738,3		№ 3 — 1238,0	
	Рекуперативное торможение	№ 1 — 34,0	101,5	№ 1 — 29,5	79,0
		№ 2 — 29,6		№ 2 — 14,4	
		№ 3 — 37,9		№ 3 — 35,1	
Ласточка — Бикин, 57 км	Тяга	№ 1 — 683,0	2055,7	№ 1 — 476,0	1402,4
		№ 2 — 672,5		№ 2 — 465,4	
		№ 3 — 700,2		№ 3 — 461,0	
	Рекуперативное торможение	№ 1 — 22,0	66,0	№ 1 — 15,2	43,1
		№ 2 — 19,1		№ 2 — 10,9	
		№ 3 — 24,9		№ 3 — 17,0	
Бикин — Вяземская, 105 км	Тяга	№ 1 — 1396,0	4179,5	№ 1 — 1019,7	3074,8
		№ 2 — 1359,5		№ 2 — 1030,1	
		№ 3 — 1424,0		№ 3 — 1025,0	
	Рекуперативное торможение	№ 1 — 70,0	210,9	№ 1 — 61,4	180,0
		№ 2 — 64,7		№ 2 — 60,0	
		№ 3 — 76,2		№ 3 — 58,6	
Вяземская — Кругликово, 76 км	Тяга	№ 1 — 940,2	2832,0	№ 1 — 690,0	2070,8
		№ 2 — 930,8		№ 2 — 688,8	
		№ 3 — 961,0		№ 3 — 692,0	
	Рекуперативное торможение	№ 1 — 11,0	32,6	№ 1 — 62,8	184,0
		№ 2 — 9,6		№ 2 — 61,2	
		№ 3 — 12,0		№ 3 — 60,0	
Кругликово — Хабаровск-2, 43 км	Тяга	№ 1 — 550,2	1645,0	№ 1 — 394,6	1179,0
		№ 2 — 540,8		№ 2 — 394,8	
		№ 3 — 554,0		№ 3 — 389,6	
	Рекуперативное торможение	№ 1 — 68,0	203,9	№ 1 — 56,6	179,0
		№ 2 — 62,0		№ 2 — 62,4	
		№ 3 — 73,9		№ 3 — 60,0	
Итого для участка (по всем перегонам) Ружино — Хабаровск-2, 399 км	Тяга, $\mathcal{E}_{\text{тяги}}$	15780,1		11422,0	
	Рекуперативное торможение, $\mathcal{E}_{\text{рек}}$	614,9		665,1	
Коэффициент рекуперации K_p электровозов для участка $K_p = \frac{\mathcal{E}_{\text{рек}}}{\mathcal{E}_{\text{тяги}}} \cdot 100 \%$		3,89 %		6,82 %	
Выполненная работа ИРДП по типу «виртуальная сцепка», 10^4 т·км	$A = (Q_1 + Q_2)S = (1688 + 1676) \cdot 399 = 3364 \cdot 399 = 134,2236$				
Удельный расход электроэнергии ИРДП по типу «виртуальная сцепка», кВт·ч/ 10^4 т·км	Уд. расход = $(\sum \mathcal{E}_{\text{тяги}} - \sum \mathcal{E}_{\text{рек}}) / A = ((15780,1 + 11422,0) - (614,9 + 665,1)) / 134,2236 = 193,1$				

технологии ИРДП по типу «виртуальная сцепка», показывает, что в четном направлении движения достигаются наилучшие результаты удельного расхода электровозами (в 2,8 раза меньше по сравнению с нечетным направлением движения поездов). Этот результат достигнут за счет значительного увеличения (в 3,7 раза) массы поездов в четном направлении.

Проведем сравнение удельных показателей расхода электроэнергии электровозами на тягу поездов, движущихся по технологии ИРДП по типу «виртуальная сцепка» в четном и нечетном направлении, с движением одиночных грузовых поездов на участках Хабаровск-2 — Ружино и Ружино — Хабаровск-2. Плановый показатель удельного расхода электроэнергии электровозами ЗЭС5К для четного направления движения на участке Хабаровск-2 — Ружино равен $67 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / 10^4 \text{ т} \cdot \text{км}$, а для нечетного направления движения на участке Ружино — Хабаровск-2 — $139 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / 10^4 \text{ т} \cdot \text{км}$.

По данным локомотивного депо Хабаровск-2, при эксплуатации электровозов ЗЭС5К с одиночными поездами на участке Хабаровск-2 — Ружино реальные показатели удельного расхода электроэнергии выше и находятся в диапазоне $70\text{--}80 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / 10^4 \text{ т} \cdot \text{км}$, а для нечетного движения — в диапазоне $200\text{--}220 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / 10^4 \text{ т} \cdot \text{км}$, т. е. работа этих электровозов по тяге одиночных грузовых поездов происходит с пережогом против плановых показателей. Выходит, что на участке Хабаровск-2 — Ружино для четного и нечетного направления движения поездов планируемые показатели удельного расхода электроэнергии на тягу одиночных грузовых поездов для электровозов ЗЭС5К занижены в сравнении с показателями, которые получаются для этих электровозов при реальной эксплуатации. Почему так происходит? Попробуем разобраться в этом вопросе.

Согласно полученным данным по расходу электроэнергии электровозами ЗЭС5К, участвующим 4–5 июля 2019 г. в проведении грузовых поездов по технологии ИРДП по типу «виртуальная сцепка», удельный расход электроэнергии для четного грузового направления движения двух грузовых поездов массой 6284 и 6217 т составил $69 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / 10^4 \text{ т} \cdot \text{км}$, а для нечетного порожнего направления движения двух порожних грузовых поездов массой 1688 и 1676 т — $193,1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / 10^4 \text{ т} \cdot \text{км}$, что выше плановых показателей 67 и $139 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / 10^4 \text{ т} \cdot \text{км}$ соответственно.

Необходимо отметить, что при испытании технологии ИРДП поезда двигались в наилучших условиях эксплуатации, их показатели получены в условиях безостановочного движения по станциям и перегонам участка и при минимальном количестве ограничений скорости, т. е. электровозы двигались с минимальным количеством торможений для снижения скорости движения и, следовательно, отсутствием пусковых

режимов с места после остановок. Такой режим работы электровозов обычно сопровождается наименьшим расходом электроэнергии, а значит, и низким удельным ее расходом на тягу поездов. Таким образом, даже идеальные условия эксплуатации электровозов, которые были созданы в период проведения испытаний ИРДП, не позволили выполнить плановые показатели удельного расхода электроэнергии.

Однако надо понимать, что такие экспериментальные поездки входят в разряд опытных и проводятся прежде всего с целью выявления всех особенностей и возможностей технологии ИРДП, а не для получения наилучших энергетических показателей электровозов. Реальная эксплуатация электровозов изобилует большим количеством отклонений от идеальных условий, которые происходят порой по независящим причинам. И поэтому неслучайно оценку показателей эксплуатационной работы большинства технических объектов на железнодорожном транспорте да и оценку работы самих хозяйств железных дорог проводят по средним показателям (например, средняя масса поезда и т. д.).

Теперь рассмотрим, например, сравнение показателей удельного расхода электроэнергии электровозами, полученных в поездке по технологии ИРДП по типу «виртуальная сцепка» в четном направлении движения, с данными, которые бы были получены в условиях, когда каждый электровоз вел свой отдельный поезд по обычной технологии одиночного движения и в графике движения имел бы свой номер поезда.

Ведущий электровоз ЗЭС5К № 329 вел поезд массой 6284 т на участке Хабаровск-2 — Ружино длиной 399 км и затратил на тягу поезда $18782,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$, а возвратил в сеть при рекуперативном торможении $2681,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$. Его показатель удельного расхода равен

$$\begin{aligned} \text{Уд. расход} &= \frac{\Theta_{\text{тяги}} - \Theta_{\text{рек}}}{A} = \frac{18782,5 - 2681,3}{6284 \cdot 399} = \\ &= 64,2 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{10^4 \text{ т} \cdot \text{км}}. \end{aligned}$$

Ведомый электровоз ЗЭС5К № 132 вел поезд массой 6217 т на участке Хабаровск-2 — Ружино и затратил на тягу $21139,6 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$, а возвратил в сеть при рекуперативном торможении $2831,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$. Его показатель удельного расхода будет равен

$$\begin{aligned} \text{Уд. расход} &= \frac{\Theta_{\text{тяги}} - \Theta_{\text{рек}}}{A} = \frac{21139,6 - 2831,5}{6217 \cdot 399} = \\ &= 73,8 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{10^4 \text{ т} \cdot \text{км}}. \end{aligned}$$

По результатам проведенного расчета видно, что показатель удельного расхода электроэнергии электровозом ЗЭС5К № 329 при движении с поездом массой 6284 т, работающим в наилучших условиях

ведения по технологии одиночного поезда, ниже планового на $2,8 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/10^4 \text{ т}\cdot\text{км}$, а показатель удельного расхода электроэнергии электровозом 3ЭС5К № 132 при движении с поездом массой 6217 т выше планового на $6,8 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/10^4 \text{ т}\cdot\text{км}$. Это говорит о том, что даже в идеальных условиях движения не каждый поезд может выполнить плановый показатель удельного расхода. Отсюда следует вывод, что плановые показатели удельного расхода электроэнергии для участка Хабаровск-2—Ружино рассчитаны не совсем точно и не полностью учитывают реальные условия эксплуатации. Такой подход, на наш взгляд, является не совсем правильным, не мотивирует машинистов на достижение лучших результатов и вносит ошибки в статистику реального учета расхода электроэнергии в системе локомотивного хозяйства.

Начиная с 2012 г. в Иркутском и Дальневосточном государственных университетах путей сообщения (ИрГУПС, ДВГУПС) проводятся научно-исследовательские и конструкторские работы по созданию энергоэффективных силовых выпрямительных установок возбуждения и тиристорных выпрямительно-инверторных преобразователей с разрядными диодами, а также новых транзисторных выпрямительно-инверторных преобразователей (ВИП). Предполагаемая модернизация электровазов 2(3,4)ЭС5К на основе выполненных разработок этих университетов приведет к значительному повышению коэффициента мощности этих электровазов, который на 4-й зоне регулирования напряжения на тяговых двигателях в номинальном режиме работы может достигнуть значения $0,96\text{--}0,97$ [12, 13, 14]. В результате энергетическая эффективность работы этих электровазов существенно возрастет. Учитывая большие размеры движения поездов повышенной массы и длины на сети железных дорог экономический эффект от эксплуатации модернизированных электровазов переменного тока с коллекторным приводом, обладающих повышенной энергетической эффективностью, будет весьма высоким.

На основе исследований ДВГУПС и ИрГУПС в период с 2018 по 2019 г. в дорожном центре внедрения (ДЦВ) Красноярской железной дороги выполнена исследовательская работа по разработке блока реактивных токов (БРТ), который при присоединении к выходным выводам ВИП электровоза переменного тока типа ВЛ80^Р значительно повышает его коэффициент мощности [15]. Так, на 4-й зоне регулирования напряжения тяговых двигателей коэффициент мощности электровоза увеличивается с $0,84$ до $0,96$. В локомотивном депо Боготол на производственной базе ДЦВ Красноярской железной дороги были проведены стендовые испытания БРТ совместно с ВИП-4000 электровоза ВЛ80^Р, которые подтвер-

дили результаты НИР «Разработка ВИП электровоза переменного тока с применением разрядного диодно-транзисторного плеча с конденсатором», выполненной в ДЦВ Красноярской железной дороги в период с октября 2018 г. по апрель 2019 г. В июне 2019 г. была оборудована опытная секция № 1784 в составе трехсекционного электровоза ВЛ80^Р № 1764 двумя ВИП-4000 и БРТ. В июле 2019 г. этот электровоз прошел $20\,000 \text{ км}$ эксплуатационного испытательного пробега на Восточном полигоне железных дорог. Результаты эксплуатационных испытаний показали, что опытная секция № 1784 в равных условиях нагрузки с двумя соседними секциями № 1764А и № 1764Б потребляет на 7 % меньше полной энергии переменного тока из сети. Это уменьшение произошло за счет снижения на 14 % потребления реактивной энергии из сети. При этом средний эксплуатационный коэффициент мощности опытной секции № 1784 электровоза повысился на 6 %. Этот результат работы показывает, что если все три секции электровоза будут оборудованы ВИП с БРТ, то удельный расход электрической энергии электровоза на тягу поездов снизится примерно на 5 %. Если ВИП-4000М на электровазах 3ЭС5К, которые применяются для реализации технологии ИРДП по типу «виртуальная сцепка», будут оборудованы БРТ, то следует ожидать еще большей энергетической эффективности данной технологии на Восточном полигоне железных дорог России.

Выводы. 1. Использование технологии ИРДП по типу «виртуальная сцепка» создает условия для повышения энергетической эффективности эксплуатации электровазов переменного тока типа 3ЭС5К.

2. Применение БРТ, разработанного в ДЦВ Красноярской железной дороги, в ВИП-4000М электровазов 2(3, 4)ЭС5К позволит еще больше повысить энергетическую эффективность этих электровазов в виде снижения ими удельного расхода электроэнергии на тягу поездов примерно на 5 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мугинштейн Л.А., Мехедов М.И. Методические подходы к выявлению факторов, влияющих на стабильность пропуска поездопотоков // Вестник ВНИИЖТ. 2014. № 2. С. 24–32.
2. Мугинштейн Л.А., Мехедов М.И. Вопросы организации стабильного пропуска транзитных грузовых поездов на направлениях железных дорог с учетом технических и технологических особенностей работы технических станций и перегонов // Вестник ВНИИЖТ. 2016. Т. 75. № 1. С. 3–11.
3. Розенберг И.Н., Розенберг Е.Н. Интеллектуальные системы управления движением поездов // Экономика железных дорог. 2016. № 8. С. 9–16.
4. Розенберг Е.Н., Абрамов А.А., Батраев В.В. Интервальное регулирование движения поездов // Железнодорожный транспорт. 2017. № 9. С. 19–24.

5. Розенберг Е.Н., Батраев В.В. Инновационное развитие систем интервального регулирования // Автоматика, связь, информатика. 2018. № 7. С. 5–9.

6. Моисеенко В.В. Современные тенденции развития систем управления движением // Автоматика, связь, информатика. 2018. № 12. С. 36–38.

7. Шухина Е.Е. Локомотивные системы обеспечения безопасности // Автоматика, связь, информатика. 2013. № 2. С. 2–3.

8. Устройство КЛУБ-У. Интервальное регулирование: программа и методика эксплуатационных испытаний. 36991-00-00 ПМ1-13: утв. 29.04.2019.

9. Волковский Д.В. От системы автоведения к цифровому локомотиву // Железнодорожный транспорт. 2019. № 7. С. 46–48.

10. Абдрахманов А.К. От блок-участка к радиоканалу // Автоматика, связь, информатика. 2017. № 1. С. 43–45.

11. Электровоз магистральный 2ЭС5К (ЗЭС5К) «Ермак». Руководство по эксплуатации. Кн. 1. Электрические схемы. Новочеркасск, 2004. 248 с.

12. Способ управления многозонным выпрямительно-инверторным преобразователем однофазного переменного тока: патент № 2561913 Рос. Федерация: МПК H02P 7/292(2006.01) / С.В. Власьевский [и др.]. № 2014115762; заявл. 18.04.2014; опубл. 10.09.2015, Бюл. № 25.

13. Власьевский С.В., Малышева О.А., Мельниченко О.В. Аварийные процессы работы тиристорного выпрямителя электровоза переменного тока // Электротехника. 2016. № 2. С. 12–16.

14. Власьевский С.В., Малышева О.А., Мельниченко О.В. Перспективный тип электровоза переменного тока на железных дорогах Восточного полигона // Наука, творчество и образование в области электроэнергетики и электротехники: дости-

жения и перспективы: тр. Всерос. науч.-практ. конф. (Хабаровск, 19–20 нояб. 2015 г.) / под ред. И.В. Игнатенко. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2015. С. 194–197.

15. Власьевский С.В., Малышева О.А., Семченко В.В. Устройство повышения коэффициента мощности электровоза переменного тока с коллекторным приводом // Eltrans 10.0: тезисы докл. Десятого Междунар. симпозиума «Eltrans 10.0», посвященного 210-летию со дня основания первого транспортного вуза России — Петербургского гос. ун-та путей сообщения Императора Александра I (Санкт-Петербург, 9–11 окт. 2019 г.). СПб.: ФГБОУ ВО ДВГУПС, 2019. Ч. I. С. 41–43.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ВЛАСЬЕВСКИЙ Станислав Васильевич, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика», ФГБОУ ВО ДВГУПС

МАЛЫШЕВА Ольга Александровна, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника, электроника и электромеханика», ФГБОУ ВО ДВГУПС

ШАБАЛИН Николай Григорьевич, д-р техн. наук, начальник управления, АО «НИИАС»

СЕМЧЕНКО Виктор Васильевич, канд. техн. наук, генеральный директор АО «ДЦВ Красноярской ж.д.»

Статья поступила в редакцию 28.11.2019 г., принята к публикации 21.01.2020 г.

Для цитирования: Оценка энергетической эффективности электровозов 3ЭС5К при использовании технологии интервального регулирования движения по типу «виртуальная сцепка» / С. В. Власьевский [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 2020. Т. 79. № 1. С. 17–25. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-1-17-25>.

Energy efficiency assessment of the 3ES5K electric locomotives when using interval regulation technology in the form of “virtual coupling”

S. V. VLAS'YEVSKIY¹, O. A. MALYSHEVA¹, N. G. SHABALIN², V. V. SEMCHENKO³

¹ Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Far Eastern State University of Railway Engineering” (FGBOU VO DVGUPS), Khabarovsk, 680021, Russia

² Joint Stock Company “Research and Design Institute of informatization, automation and communications in railway transport” (JSC “NIIAS”), Moscow, 109029, Russia

³ Joint Stock Company “Railway Implementing Center of the Krasnoyarsk Railway” (JSC “DTsV of the Krasnoyarsk Railway”), Krasnoyarsk, 660021, Russia

Abstract. One of the promising ways to increase the capacity of railways is the way to reduce the interval between trains and its packet-mode handling. This method is implemented through the introduction of technology for interval regulation of train traffic. More advanced at present is the technology of interval regulation of train operation according to the “virtual coupling” type, which organizes the operation of trains with a minimum interval between them, which is safe for motion at and between stations. This technology removes the problem of extending the receiving and departure tracks, reduces peak loads on the traction power supply system and the formation time of the virtual coupling structure, and increases the train speed to the yellow traffic signal with safety guaranteed. The technology is implemented due to the presence of an interval control system for train operation, the introduction of on-board automatic locomotive signaling devices ALS-EN and ALS-R, on-board complexes BLOK and KЛУБ-У (safety devices

with satellite navigation and electronic route map), ISAVP-RT-M (auto-driving system for coupled trains) and radio modems for data transmission. The use of these devices in packet mode traffic schedule will reduce the time interval along the sections of the railway and reduce the loss of time when the train runs to the yellow traffic signal. The set of tasks to increase the energy efficiency of applying the technology of interval regulation of train operation according to the “virtual coupling” type should also include the tasks of developing modern rectifier-inverter converters VIP-4000M on AC electric locomotives together with the reactive current block developed in the Railway Implementing Center of the Krasnoyarsk Railway. These developments provide a high power factor of the electric locomotive in the traction and regenerative braking modes (up to 0.96), which will reduce the specific electric energy consumption by electric locomotives for train traction, which will increase the efficiency of the application of the technology of interval regu-

lation of train operation according to the “virtual coupling” type. In July 2019 pilot operational tests of this technology were carried out on the Far Eastern Railway, which showed generally positive results. The paper also presents an analysis of the results on the specific consumption of electric energy for traction and its return to the contact network during regenerative braking by 3ES5K electric locomotives participating in the technology of interval regulation of train operation of the “virtual coupling” type in the sections Khabarovsk-2-Ruzhino and Ruzhino-Khabarovsk-2 of the Far Eastern Railway. These results show an increase in the energy efficiency of electric locomotives using this technology.

Keywords: electric locomotive; interval regulation of train traffic; virtual coupling; specific consumption of electric energy; energy efficiency

DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-1-17-25>

REFERENCES

1. Muginshteyn L. A., Mekhedov M. I. *Metodicheskie podkhody k vyyavleniyu faktorov, vliyayushchikh na stabil'nost' propuska poezdopotokov* [Methodological approaches to identifying factors affecting the stability of the passage of train flows]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2014, no. 2, pp. 24–32.
2. Muginshteyn L. A., Mekhedov M. I. *Voprosy organizatsii stabil'nogo propuska tranzitnykh gruzovykh poezdov na napravleniyakh zheleznykh dorog s uchetom tekhnicheskikh i tekhnologicheskikh osobennostey raboty tekhnicheskikh stantsiy i peregonov* [Issues of organization of stable passage of transit freight trains on the railway lines in accordance with technical and technological features of operation of technical stations and running sections]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2016, Vol. 75, no. 1, pp. 3–11.
3. Rozenberg I. N., Rozenberg E. N. *Intellektual'nye sistemy upravleniya dvizheniem poezdov* [Intelligent control systems for the movement of trains]. Ekonomika zheleznykh dorog [Railway economy], 2016, no. 8, pp. 9–16.
4. Rozenberg E. N., Abramov A. A., Batraev V. V. *Interval'noe regulirovanie dvizheniya poezdov* [Interval regulation of train traffic]. Zheleznodorozhnyy transport, 2017, no. 9, pp. 19–24.
5. Rozenberg E. N., Batraev V. V. *Innovatsionnoe razvitiye sistem interval'nogo regulirovaniya* [Innovative development of interval regulation systems]. Avtomatika, svyaz', informatika [Automation, communication, computer science], 2018, no. 7, pp. 5–9.
6. Moiseenko V. V. *Sovremennyye tendentsii razvitiya sistem upravleniya dvizheniem* [Modern trends in the development of traffic control systems]. Avtomatika, svyaz', informatika [Automation, communication, computer science], 2018, no. 12, pp. 36–38.
7. Shukhina E. E. *Lokomotivnye sistemy obespecheniya bezopasnosti* [Locomotive safety ensuring systems]. Avtomatika, svyaz', informatika [Automation, communication, computer science], 2013, no. 2, pp. 2–3.
8. *KLUB-U device. Interval regulation: program and methodology of operational tests. 36991-00-00 PM1-13*. Approved 29.04.2019 (in Russ.).
9. Volkovskiy D. V. *Ot sistemy avtovedeniya k tsifrovomu lokomotivu* [From the system of auto-driving to a digital locomotive]. Zheleznodorozhnyy transport, 2019, no. 7, pp. 46–48.
10. Abdrakhmanov A. K. *Ot blok-uchastka k radiokanalul* [From the block section to the radio channel]. Avtomatika, svyaz', infor-

matika [Automation, communication, computer science], 2017, no. 1, pp. 43–45.

11. *Elektrovoz magistral'nyy 2ES5K (3ES5K) "Ermak". Rukovodstvo po ekspluatatsii. Kn. 1. Elektricheskie skhemy* [Electric locomotive 2ES5K (3ES5K) "Ermak". Manual. Book 1. Electrical circuits]. Novocherkassk, 2004, 248 p.

12. Vlas'evskiy S. V. *Method of controlling multiband inverter-rectifier converter of single-phase AC*. Patent no. 2561913, publ. 10.09.2015, Bul. No. 25 (in Russ.).

13. Vlas'evskiy S. V., Malysheva O. A., Mel'nichenko O. V. *Avariynye protsessy raboty tiristorogo vypryamitelya elektrovoza pere-mennogo toka* [Emergency processes of the thyristor rectifier of an AC electric locomotive]. Elektrotehnika [Electric Engineering], 2016, no. 2, pp. 12–16.

14. Vlas'evskiy S. V., Malysheva O. A., Mel'nichenko O. V. *Perspektivnyy tip elektrovoza peremennogo toka na zheleznykh dorogakh Vostochnogo poligona* [Promising type of AC electric locomotive on the railroads of the Eastern training ground]. Nauka, tvorchestvo i obrazovanie v oblasti elektroenergetiki i elektrotekhniki: dostizheniya i perspektivy. Tr. Vseros. nauch.-prakt. konf. (Khabarovsk, 19–20 noyab. 2015 g.) [Science, Creativity and Education in the Field of Electric Power Engineering and Electrical Engineering: Achievements and Prospects. Proc. of the All-union scientific-practical conf. (Khabarovsk, November 19–20, 2015)]. Khabarovsk, DVGUPS Publ., 2015, pp. 194–197.

15. Vlas'evskiy S. V., Malysheva O. A., Semchenko V. V. *Ustroystvo povysheniya koeffitsienta moshchnosti elektrovoza peremennogo toka s kollektornym privodom* [Device for increasing the power factor of an alternating current electric locomotive with a collector drive]. Eltrans 10.0: tezisy dokl. Desyatogo Mezhdunar. simpoziuma "Eltrans 10.0", posvyashchennogo 210-letiyu so dnya osnovaniya pervogo transportnogo vuzsa Rossii — Peterburgskogo gos. un-ta putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I (St. Petersburg, 9–11 okt. 2019 g.) [Eltrans 10.0: abstracts articles. Tenth International Symposium "Eltrans 10.0", dedicated to the 210th anniversary of the founding of the first transport university in Russia — St. Petersburg State. University of Railways of Emperor Alexander I (St. Petersburg, October 9–11, 2019)]. St. Petersburg, FGBOU VO PGUPS Publ., 2019, Ch. I, pp. 41–43.

ABOUT THE AUTHORS

Stanislav V. VLAS'EVSKIY,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department “Electrical engineering, electronics and electromechanics”, FGBOU VO DVGUPS

Olga A. MALYSHEVA,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department “Electrical engineering, electronics and electromechanics”, FGBOU VO DVGUPS

Nikolay G. SHABALIN,

Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department, JSC “NIAS”

Victor V. SEMCHENKO,

Cand. Sci. (Eng.), General Director of the JSC “DTsV of the Krasnoyarsk Railway”

Received 28.11.2019

Accepted 21.01.2020

■ E-mail: vlas@festu.khv.ru (S. V. Vlas'evskiy)

For citation: Vlas'evskiy S. V., Malysheva O. A., Shabalin N. G., Semchenko V. V. Energy efficiency assessment of the 3ES5K electric locomotives when using interval regulation technology in the form of “virtual coupling”. Vestnik of the Railway Research Institute. 2020. 79 (1): 17–25 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-1-17-25>.