



Исследование эффективности сглаживающих реакторов РЖФА-6500



Владимир ЛОБЫНЦЕВ



Станислав ПОЛЕВ



Кирилл МОГИЛЕВСКИЙ

Лобынцев Владимир Васильевич – Российский университет транспорта, Москва, Россия.

Полев Станислав Сергеевич – Курчатowskiй комплекс ядерных транспортных энергетических технологий НИЦ «Курчатowskiй институт», Москва, Россия.

Могилевский Кирилл Георгиевич – ООО «Кинетик», Москва, Россия*.

Системы тягового электроснабжения постоянного тока получили своё распространение в ряде стран. Потребление электроэнергии системами тягового электроснабжения имеет явно выраженные сезонные и суточные пики. Пиковый характер потребления приводит к дополнительному нагреву токоведущих частей в связи с тем, что постоянные времени переходных тепловых и электрофизических процессов различаются на несколько порядков, поэтому снижение омического сопротивления электрооборудования при прочих равных условиях является чрезвычайно важной задачей.

В рамках решения проблемы повышения энергоэффективности оборудования тяговых подстанций постоянного тока были разработаны и изготовлены сглаживающие реакторы фильтров устройства с бронестержневой радиально-цилиндрической магнитной системой с пониженным омическим сопротивлением, получившие название РЖФА-6500.

В 2018 году два блока реакторов РЖФА-6500 введены в опытно-промышленную эксплуатацию на одном из самых грузонапряжённых участков магистральных железных дорог постоянного тока, обеспечивающем пропуск поездов массой до 9000 тонн с размерами движения порядка ста пар поездов в сутки.

В целях определения сравнительных показателей энергоэффективности были запрошены данные по расходу электриче-

ской энергии на тягу поездов за аналогичные периоды до внедрения сглаживающих реакторов нового типа и после. От ОАО «РЖД» получены данные относительно размеров движения, типа подвижного состава и массы перевезённых грузов, согласно исполненному графику движения поездов на рассматриваемом участке. Полученная совокупность данных послужила основой для разработки многофакторной методики оценки энергоэффективности реакторов нового типа, а также их вклада в эффективность поездной работы на рассматриваемом сравнительном интервале времени. Ввиду того, что эффективность энергосилового оборудования зависит также от температуры окружающей среды, в методику расчёта был введён среднеинтегральный параметр среднесуточной температуры, который, как оказалось в ходе обработки исходных данных и представления их в виде характерных графических зависимостей, имеет сравнительное отличие – менее одного процента за аналогичные периоды наблюдений.

Точный количественный учёт расхода электрической энергии на тягу поездов, обмена реактивной энергии с питающей сетью, объёмов выполненных перевозок позволил провести объективное сравнение вклада сглаживающих реакторов нового типа в повышение эффективности поездной работы и снижение расходов электрической энергии на тягу поездов.

Ключевые слова: железная дорога, показатели энергоэффективности, размеры движения, сглаживающие реакторы, фильтровое устройство, активная энергия, реактивная энергия.

*Информация об авторах:

Лобынцев Владимир Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики транспорта Российского университета транспорта, Москва, Россия, Lobyntsev_VV@nrcki.ru.

Полев Станислав Сергеевич – ведущий специалист отдела сопровождения договоров Курчатowskiй комплекс ядерных транспортных энергетических технологий НИЦ «Курчатowskiй институт», Москва, Россия, stpolev@yandex.ru.

Могилевский Кирилл Георгиевич – заместитель генерального директора ООО «Кинетик», Москва, Россия, mogilevsk@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 27.04.2020, принята к публикации 23.06.2020.

For the English text of the article please see p. 78.

Повышение внимания к проблемам энергоэффективности и энергосбережения обусловлено ростом потребления электрической энергии во всём мире. Постепенный перевод транспортных систем с углеводородного топлива на электроэнергию одновременно требует как увеличения объёмов генерации, так и повышает требования к оборудованию систем её передачи и распределения в части снижения мощности потерь.

С развитием новых транспортных коридоров и увеличением объёмов перевозок отмечается значительный рост потребления электроэнергии системами тягового электроснабжения, имеющего явно выраженные сезонные и суточные пики. Пиковый характер потребления приводит к дополнительному нагреву токоведущих частей в связи с тем, что постоянные времени переходных тепловых и электрофизических процессов различаются на несколько порядков. В этой связи снижение омического сопротивления электрооборудования при прочих равных условиях является чрезвычайно важной задачей.

В рамках решения проблемы повышения энергоэффективности оборудования тяговых подстанций постоянного тока был разработан проект, а впоследствии изготовлены два комплекта сглаживающего реактора фильтр-устройства с пониженным омическим сопротивлением [1].

Ввиду того, что системы тягового электроснабжения постоянного тока получили своё распространение не только в России, но и в ряде европейских государств: Италии, Литве, Латвии, Эстонии, а также в Польше, в которой 80 % железных дорог электрифицированы на постоянном токе — указанный реактор может иметь высокую степень унификации.

Для проведения опытно-промышленной эксплуатации изготовленных реакторов, получивших аббревиатуру РЖФА-6500, АО «Трансэнерго» — филиалом ОАО «РЖД» были определены два участка постоянного тока с тяжеловесным движением Свердловской и Западно-Сибирской железных дорог.

Объектом внедрения первого комплекта из двух сглаживающих реакторов с бронестержневой радиально-цилиндрической магнитной системой стала тяговая подстанция «Лётная» Свердловской железной дороги [2]. Эта тяговая подстанция расположена на расчётном подъёме, что определяет сравнительно более высокий уровень нагрузки по фидерам контактной сети.

Два последовательно включённых блока РЖФА-6500 были также смонтированы во втором звене фильтр-устройства схемы Западно-Сибирской железной дороги без перенастройки его резонансных цепочек [1].

Уровень психофизического напряжения на шинах распределительного устройства постоянного тока тяговой подстанции

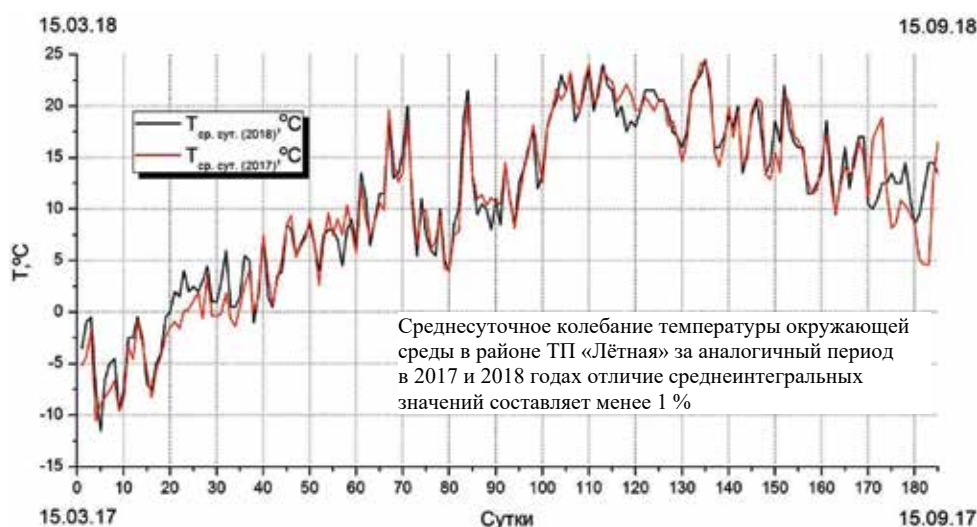


Рис. 1. Среднесуточное изменение температуры за характерные периоды наблюдений (составлено авторами).

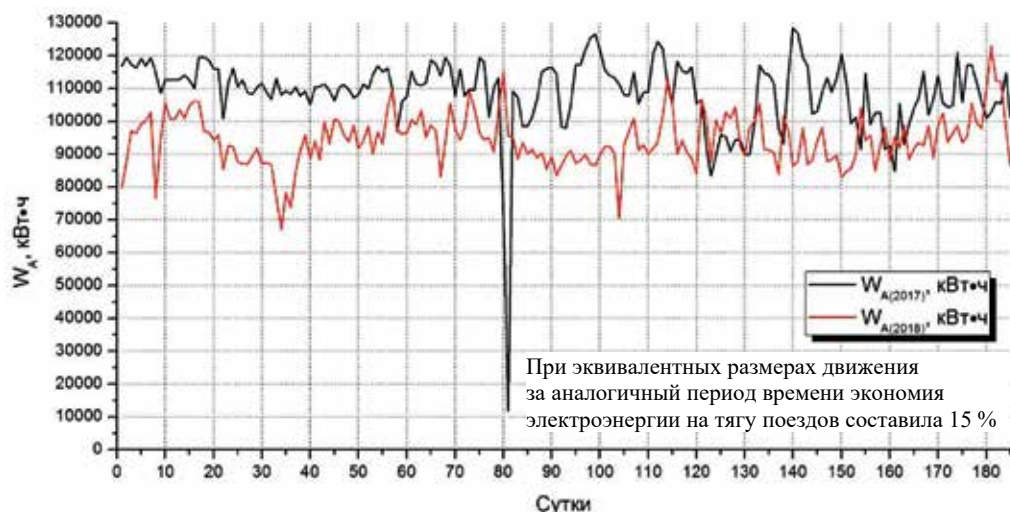


Рис. 2. Среднесуточный расход активной энергии на тягу поездов за характерные периоды наблюдений (составлено авторами).

в широком диапазоне значений тягового тока не превысил 15 В [3–7]. Увеличения воздействия опасных и мешающих влияний на устройства систем централизованной блокировки (СЦБ), связи и смежные линии продольного электроснабжения 6/10 кВ не отмечено, равно как и значительного нагрева элементов конструкции блоков РЖФА-6500 в процессе эксплуатации [8].

Реакторы типа РЖФА-6500 хорошо себя зарекомендовали, в том числе при эксплуатации в летнее время года, когда температура окружающего воздуха в тени

поднималась до +31°C [9]. График колебаний среднесуточной температуры за период опытно-промышленной эксплуатации представлен на рис. 1.

Для оценки энергетической эффективности реакторов нового типа на дистанции электроснабжения Шарташская (ЭЧЭ-232) были официально запрошены показания счётчиков активной и реактивной энергии по вводам преобразовательных трансформаторов ТП «Лётная» за полугодовой период (с 15.03.2018 по 15.09.2018 гг.) опытно-промышленной



Рис. 3. Среднесуточные показатели реактивной энергии за характерные периоды наблюдений (составлено авторами).

Таблица 1

Серия ЭПС	Месяцы 2017 года						
	03	04	05	06	07	08	09
2ЭС10	0	0	0	0	0	42	0
2ЭС6	44854	38510	41825	40586	33436	42834	39869
ВЛ10	12531	12240	9644	7323	8197	10841	10020
ВЛ10К	2197	2217	1942	1327	630	714	1147
ВЛ10У	187	203	0	0	0	0	44
ВЛ10УК	0	0	0	0	0	0	0
ВЛ11	3289	2934	3315	3000	2317	2305	1975
ВЛ11К	391	436	55	660	235	505	567
ВЛ11М	1329	1333	485	707	442	576	279
Итого	64779	57872	57266	53603	45257	57818	53900
Всего за рассматриваемый период 2017 г.						390495	
Серия ЭПС	Месяцы 2018 года						
	03	04	05	06	07	08	09
2ЭС10	69	0	58	0	286	264	69
2ЭС6	40112	38118	33938	34567	36756	37899	34967
ВЛ10	9318	8446	8528	7074	7116	9868	7045
ВЛ10К	1425	2312	1659	1235	2135	2565	1971
ВЛ10У	831	579	69	197	1073	2042	2146
ВЛ10УК	0	0	0	69	0	0	0
ВЛ11	1688	1080	1018	926	1154	1624	910
ВЛ11К	553	650	339	400	619	891	612
ВЛ11М	550	304	221	385	315	332	283
Итого	54546	51489	45830	44852	49455	55485	48003
Всего за рассматриваемый период 2018 г.						349659	

эксплуатации РЖФА-6500 и за аналогичный период предшествовавшего его внедрению года (с 15.03.2017 по 15.09.2017 гг.). По результатам обработки полученных данных построены графики среднесуточных значений активной энергии (рис. 2), израсходованной на тягу поездов, и реактивной энергии (рис. 3) – энергии обмена с питающей сетью.

Средние значения активной $W_{\text{Аср}}$ и реактивной $W_{\text{Рср}}$ энергий за полугодовой период определены с использованием следующих выражений:

$$W_{\text{Аср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_{\text{Аi}}, \text{ кВт} \cdot \text{ч}, \tag{1}$$

$$W_{\text{Рср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_{\text{Рi}}, \text{ квар} \cdot \text{ч}, \tag{2}$$

где $W_{\text{Аi}}$ и $W_{\text{Рi}}$ – среднесуточные показания активной и реактивной энергий;

n – количество дней в рассматриваемом периоде.

Для корректировки средних значений активной и реактивной энергий аналогичным образом рассчитана среднесуточная температура за рассматриваемые периоды:

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i, \text{ } ^\circ\text{C}. \tag{3}$$

С помощью полученных средних температур для аналогичных периодов 2017 и 2018 гг. рассчитан поправочный температурный коэффициент:

$$\eta_T = \frac{T_{\text{ср}(2017)}}{T_{\text{ср}(2018)}}. \tag{4}$$

Объём выполненной работы электроподвижным составом (ЭПС) разного типа за март–сентябрь 2017–2018 гг. по Шарташской дистанции электроснабжения (ЭЧЭ-232) по нечётным путям приведён в табл. 1, по чётным путям – в табл. 2 (единицы измерения – 10 тыс. т • км брутто). На основании суммарных объёмов перевозок по обоим путям за аналогичные перио-



Таблица 2

Серия ЭПС	Месяцы 2017 года						
	03	04	05	06	07	08	09
2ЭС10	0	0	0	0	0	0	0
2ЭС6	22 312	21 786	21 294	20 817	24 649	25 684	24 973
ВЛ10	8 595	6 925	6 703	5 506	7 146	9 074	7 656
ВЛ10К	1 581	1 265	1 399	655	348	621	1 236
ВЛ10У	176	103	20	0	42	104	64
ВЛ10УК	0	0	0	0	0	0	0
ВЛ11	1 412	1 051	1 211	1 186	391	1 082	861
ВЛ11К	111	80	63	97	87	140	122
ВЛ11М	297	271	102	116	215	312	163
Итого	34 485	31 481	30 792	28 376	32 878	37 018	35 075
Всего за рассматриваемый период 2017 г.						230 106	
Серия ЭПС	Месяцы 2018 года						
	03	04	05	06	07	08	09
2ЭС10	0	0	0	0	0	0	0
2ЭС6	20 587	22 723	23 326	22 990	23 723	26 790	24 339
ВЛ10	8 001	6 918	8 228	6 794	8 152	8 693	7 962
ВЛ10К	1 363	2 098	1 707	1 406	1 777	2 239	2 540
ВЛ10У	412	606	199	148	988	1 625	2 157
ВЛ10УК	0	0	0	29	0	0	0
ВЛ11	1 033	556	284	487	693	884	717
ВЛ11К	232	398	129	101	243	526	365
ВЛ11М	132	108	106	185	122	249	354
Итого	31 760	33 406	33 978	32 139	35 698	41 006	38 433
Всего за рассматриваемый период 2018 г.						246 421	

ды 2017 и 2018 гг., рассчитан поправочный коэффициент:

$$\eta_v = \frac{\sum V_{2017}}{\sum V_{2018}}. \tag{5}$$

Для оценки энергоэффективности внедрения РЖФА-6500:

$$\varepsilon = \frac{\eta_v W_{cp(2017)}}{\eta_r W_{cp(2018)}}. \tag{6}$$

Удельные затраты энергии на перевозку 1 тонны брутто на 1 км:

$$w_0 = \frac{\sum W_A}{\sum V}. \tag{7}$$

Если эффективность работы РБФА-У-6500/3250 принять равной 100 %, то при известных коэффициентах $\eta_T = 0,967$ и $\eta_v = 1,041$, а также среднесуточных показателей расхода электроэнергии за период наблюдений $W_{A\,cp(2017)} = 108781,91 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$; $W_{A\,cp(2018)} = 94332,68 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ и её реактивной составляющей $W_{P\,cp(2017)} = 35168,18 \text{ квар} \cdot \text{ч}$, $W_{P\,cp(2018)} = 28080,71 \text{ квар} \cdot \text{ч}$ эффективность внедрения РЖФА-6500 по активной энергии, расходуемой на тягу поездов, составит $\varepsilon_A = 1,241$, по реактивной энергии $\varepsilon_P = 1,348$.

Если удельные затраты энергии на перевозку 1 тонны брутто на 1 км за 2017 год принять за 100 %, тогда эффективность локомотивной работы Э за аналогичный период наблюдений в 2018 году при известных коэффициентах η_T , η_v , суммарных расходах электроэнергии $\sum W_{A\,(2017)} = 20124653 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$; $\sum W_{A\,(2018)} = 17451546 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ на тягу поездов, рассчитанных с использованием выражения (7) $w_{0(2017)} = 3,243 \text{ Вт} \cdot \text{ч/т} \cdot \text{км}$ брутто, $w_{0(2018)} = 2,928 \text{ Вт} \cdot \text{ч/т} \cdot \text{км}$ брутто, составит: $\Theta = 9,71 \text{ \%}$.

Вторым объектом внедрения реакторов нового типа является тяговая подстанция «Углерод» Западно-Сибирской железной дороги, питающая участок с интенсивным грузовым движением поездов единичной массы до 6000 тонн при объёмах движения до 120 пар поездов в сутки. Однако провести объективную оценку параметров энергосбережения [10] и уровня монетизации энергоэффективности двухблочного РЖФА-6500, согласно существующим нормативам [11], не представляется возможным. Причиной тому служит станция стыкования, располо-

женная в непосредственной близости от ТП «Углерод», которая за счёт питания мощной однофазной тяговой нагрузки вызывает несимметрию напряжений в фазах линии продольного электроснабжения и, следовательно, чётных гармоник на стороне выпрямленного напряжения [12]. Более того, реактор РЖФА-6500 включён в цепь возврата тягового тока последовательно с РБФА-У-6500/3250 за точкой присоединения апериодического конденсатора и 100 Гц резонансной цепочки, в связи с чем, его вклад в работу Г-образного фильтр-устройства заключается, в основном, в токоограничивающем действии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод оценки эксплуатационной эффективности РЖФА-6500 позволяет учесть в ходе выполнения расчётов КПД тяговой подстанции, влияние температуры окружающей среды, контактной и рельсовой цепи, того или иного типа электроподвижного состава на основании исполненного графика движения. Вместе с тем в расчётах использованы среднеинтегральные значения объёма перевозок и расхода электрической энергии на тягу поездов за аналогичные периоды наблюдений до и после внедрения реакторов нового типа в опытно-промышленную эксплуатацию. Результаты расчётов наглядно иллюстрируют сравнительные преимущества РЖФА-6500 при его использовании в цепи возврата тягового тока взамен реакторов старого типа, позволяющем повысить эффективность локомотивной работы почти на 10 %. Последнее говорит о том, что могут быть подняты участковые скорости движения, а также применены энергоэффективные режимы ведения локомотивов с составами установленной массы при входе на расчётный подъём и не только.

В целом реактор типа РЖФА-6500 представляет собой оригинальную и надёжную конструкцию, обладающую привлекательными параметрами энергоэффективности для его дальнейшего внедрения на сети железных дорог России в рамках реализации Энергетической стратегии холдинга «РЖД» на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года [13], а также положений Федерального закона от 23.11.2009 г. № 261-ФЗ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лобынцев В. В., Дураков Д. Н., Бадёр М. П., Устинов В. С. Опытнo-промышленная эксплуатация реакторов РЖФА-6500 в составе двухзвенного сглаживающего фильтрующего устройства // Электротехника. — 2018. — № 9. — С. 19–25.
2. Бадёр М. П., Лобынцев В. В., Дураков Д. Н., Динислов А. С., Дожина Г. В., Бурсук В. И. Разработка сглаживающего реактора фильтрующего устройства тяговой подстанции постоянного тока с замкнутым магнитным потоком // Электроника и электрооборудование транспорта. — 2017. — № 6. — С. 12–16.
3. Зевеке Г. В., Ионкин П. А., Нетушил А. В., Страхов С. В. Основы теории цепей: Учебник для вузов. — Изд. 4-е, перераб. — М.: «Энергия», 1975. — 752 с.
4. Правила защиты устройств проводной связи и проводного вещания от влияния тяговой сети электрических железных дорог переменного тока. — М.: Транспорт, 1973. — 96 с.
5. Правила защиты устройств проводной связи и проводного вещания от влияния тяговой сети электрических железных дорог постоянного тока. — М.: Транспорт, 1969. — 44 с.
6. Правила защиты устройств проводной связи, железнодорожной сигнализации и телемеханики от опасного и мешающего влияния линий электропередачи. Часть 1. Общие положения. Опасные влияния. — М.: Энергия, 1966. — 40 с.
7. Правила защиты устройств проводной связи, железнодорожной сигнализации и телемеханики от опасного и мешающего влияния линий электропередачи. Часть 2. Мешающие влияния. — М.: Связь, 1972. — 56 с.
8. Бадёр М. П., Загуменный М. Н., Лобынцев В. В., Устинов В. С. Верификационный трёхмерный гидродинамический (CFD) расчёт теплового состояния реактора РЖФА-6500 в эксплуатационных режимах при естественном воздушном конвективном теплосъёме // Электроника и электрооборудование транспорта. — 2019. — № 4. — С. 33–37.
9. Архив погоды в Арамиле. [Электронный ресурс]: www.meteoservice.ru/archive/aramil. Доступ 23.06.2020.
10. Федеральный закон «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 23.11.2009 г. № 261-ФЗ. [Электронный ресурс]: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978/. Доступ 23.06.2020.
11. Приказ Минпромэнерго РФ от 22.02.2007 г. № 49 «О Порядке расчёта значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии, применяемых для определения обязательств сторон в договорах об оказании услуг по передаче электрической энергии (договорах энергоснабжения)». [Электронный ресурс]: <https://legalacts.ru/doc/prikaz-minpromenergo-rf-ot-22022007-n-49/>. Доступ 23.06.2020.
12. Бадёр М. П., Дураков Д. Н., Лобынцев В. В., Устинов В. С. Исследование работоспособности реактора РЖФА-6500 в составе Г-образного фильтрующего устройства тяговой подстанции постоянного тока // Электротехника. — 2019. — № 8. — С. 60–67.
13. Энергетическая стратегия холдинга Российские железные дороги на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года, утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от «15» декабря 2011 г. № 2718р. — 96 с. [Электронный ресурс]: http://www.rzd-expo.ru/doc/Energ_Strateg_new.pdf. Доступ 23.06.2020.

