

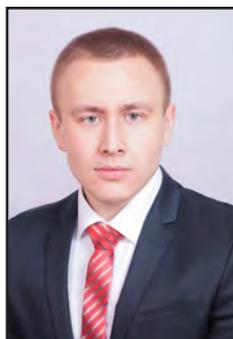
Мониторинг технического состояния электровозов переменного тока по расходу электроэнергии на тягу поездов



Александр СЕМЕНОВ



Виктор СЕМЧЕНКО



Игорь ХРОМОВ

Семенов Александр Павлович – ОАО «Научно-исследовательский институт технологии, контроля и диагностики железнодорожного транспорта», Омск, Россия.

Семченко Виктор Васильевич – АО «Дорожный центр внедрения Красноярской железной дороги», Красноярск, Россия.

Хромов Игорь Юрьевич – ООО «2050-Интегратор», Москва, Россия.*

В настоящее время широко развиваются методы диагностирования технического состояния локомотивов по данным бортовых микропроцессорных систем управления. В России в настоящее время такой мониторинг является действующей технологией системы технического обслуживания и ремонта локомотивов.

Основной проблемой реализации мониторинга является ограниченность набора датчиков в цепях локомотива. Увеличение количества датчиков ведёт к снижению надёжности и увеличению стоимости локомотива и его жизненного цикла, но повышает качество диагностической информации.

При этом целесообразно иметь интеграционные показатели технического состояния локомотива. В статье представлен программный продукт для ЭВМ по анализу технического состояния локомотива, по динамическим данным о расходе активной и генерации реактивной электроэнергии на тягу поездов. Программное обеспечение разработано на алгоритмическом языке Visual BASIC for Applications, встроенного в MS Excel, с использованием вероятностно-статистических методов анализа.

Ключевые слова: железная дорога, локомотив, мониторинг технического состояния, тяга поездов, электровоз, микропроцессорные системы управления

Основа метода для диагностирования технического состояния локомотивов в системе их мониторинга – сравнение динамики расхода активной и генерации реактивной энергий двух секций одного локомотива по принципу функционального бенчмаркинга. При мониторинге технического состояния локомотивов предлагается использовать понятие «предотказ», определяемый как работоспособное состояние локомотива при наличии внутренних скрытых дефектов или повреждений. Предотказ проявляется в расходе электроэнергии. Для анализа технического состояния электровозов переменного тока по расходу электроэнергии исходные данные должны обладать высокой степенью унимодальности, что определяется однотипностью условий эксплуатации.

Полученные в результате анализа технического состояния локомотива, по динамическим данным о расходе активной и генерации реактивной электроэнергии на тягу поездов, итоговые данные можно использовать для определения дефекта, вызывающего изменение расхода электроэнергии, при заходе локомотива на техническое обслуживание и ремонт.

*Информация об авторах:

Семенов Александр Павлович – кандидат технических наук, генеральный директор ОАО «Научно-исследовательский институт технологии, контроля и диагностики железнодорожного транспорта» (ОАО «НИИТКД»), Омск, Россия, corp@niitkd.ru.

Семченко Виктор Васильевич – кандидат технических наук, генеральный директор АО «Дорожный центр внедрения Красноярской железной дороги», Красноярск, Россия, office@dcv.ru.

Хромов Игорь Юрьевич – бизнес-аналитик ООО «2050-Интегратор», Москва, Россия, KhromovIu@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 13.05.2020, принята к публикации 23.10.2020.

For the English text of the article please see p. 76.

1. ОПЫТ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПО ДАННЫМ МСУ

В настоящее время широко развиваются методы диагностирования технического состояния локомотивов по данным бортовых микропроцессорных систем управления (МСУ) [1]. Наибольший опыт накоплен компанией General Electric, где в ситуационном центре завода-изготовителя тепловозов в городе Эри (США) осуществляется в онлайн-режиме мониторинг технического состояния более 15 тыс. секций тепловозов по данным, передаваемым в автоматическом режиме с борта локомотива от микропроцессорных систем управления (МСУ) при помощи системы Bright Star [1; 2]. Аналогичный опыт есть и у компаний Siemens, Alstom, Bombardier [1].

Интересный опыт накоплен и отечественным железнодорожным транспортом [1; 3; 4]. Например, в группе компаний «ЛокоТех» в сервисных локомотивных депо (СЛД) созданы группы диагностики, которые при заходе локомотива в депо считывают с бортовых МСУ с помощью переносных флеш-накопителей информацию и расшифровывают её на стационарных компьютерах с использованием специального программного обеспечения автоматизированных рабочих мест (АРМ МСУ). Данные используются как для мониторинга режимов эксплуатации локомотивов [5], так и для планирования объёма ремонта при заходе локомотива в СЛД [6]. Аналогично Новочеркасский электровозостроительный завод (НЭВЗ, г. Новочеркасск), Коломенский тепловозостроительный завод (КЗ, г. Коломна) и Брянский машиностроительный завод (БМЗ, г. Брянск) АО «Трансмашхолдинг» [7] осуществляют мониторинг гарантийных локомотивов. Аналогичный опыт накоплен у компании «Уральские локомотивы» [8] совместно с НПО «САУТ» и «ТрансИнфо-Проект» [9].

Большой опыт технического обслуживания и ремонта (ТОиР) электронного и микропроцессорного оборудования с использованием данных бортовых МСУ накоплен в Дорожном центре внедрения Красноярской железной дороги (далее — ДЦВ), где разработана уникальная модель ТОиР [10], получившая в 2019 году приз

ОАО «РЖД» за лучшую систему в области управления надёжностью локомотивов.

Все существующие системы мониторинга выявляют возникшие отказы, локализируют возможное место их возникновения [11; 12]. При ТОиР локомотивов большой интерес представляют предотказные технические состояния, которые согласно ГОСТ 27.002-2015 [12] определены как «Состояние объекта, характеризующееся повышенным риском отказа». Фактически — это один из видов прогнозирования остаточного ресурса по ГОСТ 20911-89 [11] (ресурса предельного состояния по ГОСТ 57445-2017). Для удобства регистрации события авторами дополнительно предлагается термин «предотказ»: работоспособное состояние объекта диагностирования при наличии дефекта или повреждения (по ГОСТ 20911-89).

Например, при понижении сопротивления изоляции имеет место дефект, повышающий риск отказа, но локомотив остаётся работоспособным. На рис. 1 приведены графики изменения токов тяговых электродвигателей (ТЭД) электровоза серии ВЛ80С по данным системы автоведения (унифицированная система автоматизированного ведения поезда, УСАВП) [3]. При включении второй ступени ослабления поля (ОП) не сработал контактор одного ТЭД, в результате ток одного ТЭД не вырос — произошёл отказ. Кроме того, на второй (ОП2) и третьей (ОП3) ступенях ослабления поля наблюдался недопустимо большой разброс токов ТЭД — имеет место предотказ. Локомотив работоспособен (замечаний нет), но требуется ремонт контактора ослабления поля ОП2 и настройка резисторов ослабления поля для выравнивания токов ТЭД в параллельных цепях.

При диагностировании чаще используют аналитические и логические (параметрические) методы: выход параметров за допуски или соответствующий тренд, нарушение логики работы. Одновременно развиваются и интеллектуальные математические методы диагностирования в основном по данным статистики (data mining) [2; 16]. Например, используется метод выявления предотказных состояний у однотипного оборудования локомотива (тяговые электродвигатели, крышки цилиндров и др.) по коэффициенту корреляции



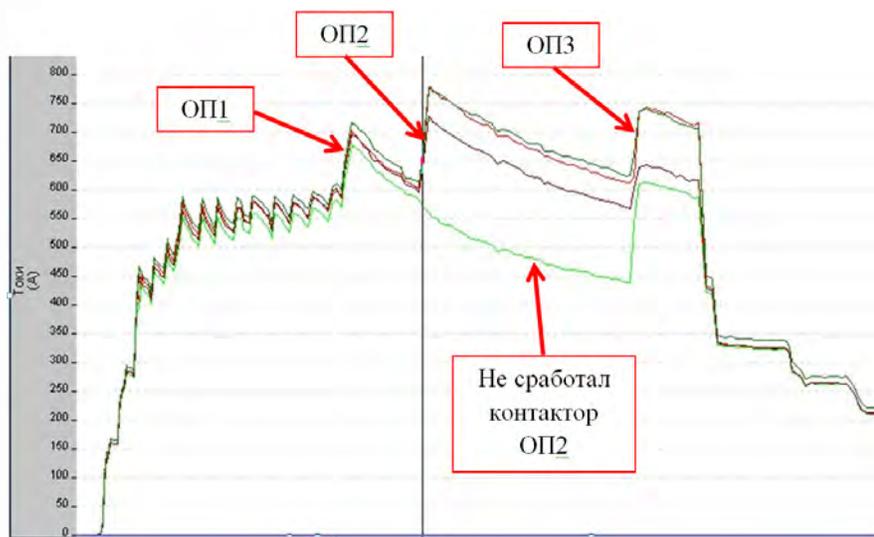


Рис. 1. Пример обнаружения отказа и предотказа по данным МСУ [3].

[13]. Данные мониторинга используются в технологическом процессе ТОиР локомотивов [14].

Таким образом, мониторинг технического состояния локомотивов по данным бортовых МСУ в настоящее время является действующей технологией системы ТОиР локомотивов.

Главной проблемой мониторинга по данным МСУ является ограниченность набора датчиков в цепях локомотива. Их увеличение повышает диагностическую информативность, но снижает надёжность и повышает стоимость локомотива и его жизненного цикла. Желательно иметь интеграционные показатели технического состояния локомотива.

Наряду с мониторингом технического состояния локомотивов и режимов их эксплуатации активно развиваются дистанционные методы контроля расхода топлива и электроэнергии на тягу поездов, что создаёт дополнительные предпосылки для мониторинга технического состояния локомотивов. Например, система учёта топлива тепловозов «Борт» разработки Научно-исследовательского института технологии, контроля и диагностики железнодорожного транспорта (НИИТКД) [15] позволяет контролировать техническое состояние локомотива как по логическому анализу контролируемых технических параметров (число оборотов вала дизеля

и мощность на каждой позиции контроллера машиниста, давление, температура и др.), так и по расходу топлива: если при норме расхода дизельного топлива в 205 г/кВт·ч наблюдается расход в 250 г/кВт·ч, то высока вероятность наличия на локомотиве предотказа в дизель-генераторной установке (ДГУ) [16].

В настоящее время на электровозах внедряются современные электронные счётчики электроэнергии типа СЭППТ с системой радиопередачи информации АСИМ производства компании «АВП Технология» в онлайн-режиме на стационарный сервер [17]. При этом класс точности СЭППТ составляет в режиме тяги по активной энергии 0,2 и по реактивной энергии 0,5. Показания счётчиков передаются в информационные системы ОАО «РЖД» (примерно каждые четыре минуты). Данные достоверны и доступны, например, в виде отчётов УСАВП (табл. 1).

Затраты на создание автоматизированной системы учёта электроэнергии согласно плану ОАО «РЖД» должны окупиться за счёт дальнейшей экономии энергоресурсов, и одновременно появляется дополнительная возможность комплексной оценки технического состояния локомотива. В ДЦВ выполнен анализ возможностей мониторинга технического состояния электровозов по динамике расхода электроэнергии на тягу поездов.

Данные о расходе электроэнергии из отчёта УСАВИП

Серия	№	Секция	Дата и время отправки	№ счётчика	Активная энергия тока тяги, кВт•ч	Активная энергия тока рекуперации, кВт•ч	Реактивная энергия тока тяги, кВАр•ч	Реактивная энергия тока рекуперации, кВАр•ч
ВЛ80Р	1769	А	31.08.2019 11:40:02	0	4132097	4751613	3951915	4856641
ВЛ80Р	1769	А	31.08.2019 11:45:02	0	4132100	4751613	3951925	4856641
ВЛ80Р	1769	А	31.08.2019 11:50:02	0	4132103	4751613	3951936	4856641
ВЛ80Р	1769	А	31.08.2019 11:55:02	0	4132105	4751613	3951945	4856641
ВЛ80Р	1769	А	31.08.2019 12:00:02	0	4132108	4751613	3951956	4856641
ВЛ80Р	1769	А	31.08.2019 12:05:02	0	4132110	4751613	3951969	4856641
ВЛ80Р	1769	А	31.08.2019 12:10:02	0	4132217	4751613	3952062	4856641

Таким образом, автоматизированные системы учёта энергоресурсов предоставляют дополнительные возможности мониторинга технического состояния локомотивов.

Целью исследования является повышение эффективности мониторинга технического состояния электровозов переменного тока с выпрямительно-инверторными преобразователями методом диагностирования их исправности в целом — по данным электронных счётчиков электроэнергии, передающих данные в онлайн-режиме.

2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Большинство отечественных электровозов переменного тока производства Новочеркасского электровозостроительного завода (Трансмашхолдинг) имеют привод постоянного тока, управляемый через выпрямительно-инверторные преобразователи (ВИП) [18; 19], позволяющие плавно управлять режимами тяги и рекуперации. Электровозы с ВИП (ВЛ80Р, ВЛ85, ЭП1, ЭС5К) надёжней большинства других локомотивов, обладая при этом эффективными тяговыми характеристиками [20], поэтому эксплуатируются в тяжёлых условиях Восточного полигона ОАО «РЖД» [21–23]. В качестве существенного

недостатка их силовой схемы следует отметить низкий коэффициент мощности, связанный с большим объёмом реактивной энергии [24; 25].

В ДЦВ разработаны методика и соответствующее программное обеспечение для мониторинга электровозов с ВИП [26]: по динамическим данным о расходе активной и реактивной электроэнергии на тягу поездов (табл. 1) выполняется анализ технического состояния локомотива. Программное обеспечение разработано на алгоритмическом языке Visual BASIC for Applications (VBA), встроенного в MS Excel [27], с использованием вероятностно-статистических методов анализа [28]. Чтобы избежать влияния условий эксплуатации локомотива на результаты анализа эффективности модернизации, предлагается подвергать модернизации одну секцию электровоза, сравнивая параметры её эксплуатации со второй немодернизированной секцией, работающей в точности таких же условиях (пробег, масса поезда, профиль, климатические и погодные условия, др.). Кроме эффективности модернизации можно контролировать и техническое состояние секций, сравнивая их друг с другом.

В начале работы программы по заданному диапазону и интервалу суммирования



Расчёт расхода электроэнергии по показаниям счётчиков

Дата и час события	Расчитанный расход электроэнергии, кВтАр • ч					
	ВЛ80Р № 1793А			ВЛ80Р № 1854Б		
	W _{a1}	W _{r1}	K _{m1}	W _{a3}	W _{r3}	K _{m3}
19.07.2020 11:00	1694,0	1466,0	0,756	1288,0	1048,0	0,775
19.07.2020 15:00	2660,0	2041,0	0,793	2666,0	2067,0	0,790
19.07.2020 19:00	2939,0	2275,0	0,790	2943,0	2315,0	0,786
19.07.2020 23:00	588,0	488,0	0,769	634,0	523,0	0,771
20.07.2020 00:00	922,0	1201,0	0,608	939,0	1238,0	0,604
20.07.2020 04:00	1014,0	1237,0	0,634	1015,0	1230,0	0,636
20.07.2020 08:00	2928,0	2308,0	0,785	2961,0	2346,0	0,784



Рис. 2. Динамика изменения потребления активной энергии двумя секциями электровоза (составлено авторами).

показания электронных счётчиков каждой секции (табл. 1) пересчитываются в данные о расходе электроэнергии (табл. 2).

Расход активной и реактивной энергий рассчитывается по разнице показаний счётчиков каждой секции электровоза за смежные периоды (табл. 1). Полная электроэнергия W_i и коэффициент мощности K_{M_i} за период i рассчитываются по активной W_{a_i} и реактивной энергиям W_{r_i} :

$$W_i = \sqrt{W_{a_i}^2 + W_{r_i}^2}; \tag{1}$$

$$K_{M_i} = \frac{W_{a_i}}{\sqrt{W_{a_i}^2 + W_{r_i}^2}} = \frac{W_{a_i}}{W_i}. \tag{2}$$

Для исключения погрешности из-за асинхронности поступления данных с каждой секции и повышения точности измерения поступающие со счётчиков локомотива данные W_i группируются путём их суммирования:

$$W = \sum_{i=1}^n W_i, \tag{3}$$

где n – число поступивших данных за выбранный период времени, кратный часу.

В результате строятся динамические графики расхода электроэнергии. На рис. 2 приведены данные электровоза ВЛ80Р-1793А/1854Б, по которым зафиксировано отключение одного ВИП второй секции с последующим восстановлением его работоспособности: по динамическим диаграммам можно в онлайн-режиме оценить техническое состояние локомотива.

На рис. 3 показана зависимость коэффициента мощности K_m от текущей мощности W (табл. 2) как расход электроэнергии за час. При потребляемой мощности менее 200 кВт • ч (фактически, мощность, рассчитанная по расходу электроэнергии) значение коэффициента мощности носит характер белого шума (из-за соизмеримого влияния на расход электроэнергии вспомогательных машин). Поэтому для анализа данные при малой мощности (рис. 2) к

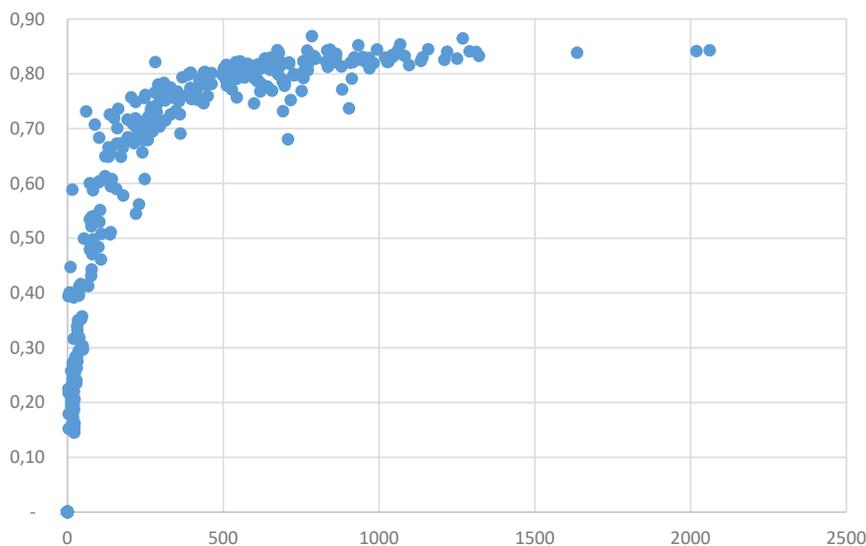


Рис. 3. Точечная диаграмма зависимости коэффициента мощности от потребляемой энергии (составлено авторами).

рассмотрению предлагается не принимать: программа преобразует исходную таблицу (табл. 2) в аналогичную, но с отфильтрованными данными.

Программа последовательно для обеих секций рассчитывает и визуализирует математическое ожидание параметров МА, их среднеквадратичное отклонение σ_A , коэффициент вариации KVA, минимальное и максимальное значения параметра, встречавшиеся в выборке [28].

Важное свойство статистической выборки, подтверждающее достоверность исходных данных и корректность исследования – это унимодальность. Согласно закону больших чисел [28], любое распределение стремится к нормальному, если нет доминирующих воздействий. Если в выборке замешано два независимых процесса, то распределение будет бимодальным и даже мультимодальным, например, если в одной выборке использованы локомотивы разных серий, разных полигонов, в разные времена года и др. В результате выводы могут быть сделаны на основе некорректных данных. Проверять унимодальность данных предлагается через вероятность соответствия распределения данных P одному из законов распределения случайной величины с использованием критерия Колмогорова–Смирнова [28] с фильтрацией исходных данных по правилу трёх сигм: отбраковываются исходные данные вне диапазона $M_A \pm 3 \cdot \sigma_A$.

Программа по установленной в ней константе разбивает общий диапазон от минимального до максимального значения на 12 поддиапазонов как оптимальных по результатам предварительных исследований. Затем рассчитывается число попаданий в каждый диапазон i . Рассчитывается разность λ между интенсивностями попадания в диапазон: теоретический R_{Ti} и фактический R_{ϕ_i} . Берётся максимальная обнаруженная разность:

$$R_{Ti} = V_{Ti} / V_T; \quad (4)$$

$$R_{\phi_i} = V_i / V; \quad (5)$$

$$\lambda = \text{Max}\{|R_{Ti} - R_{\phi_i}|\}, \quad (6)$$

где V – объём статистической выборки;

V_T – объём теоретической выборки;

V_{Ti} – объём расчётных попаданий в диапазон i ;

где i :

$$V_{Ti} = V_T \cdot (1 / (\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi})) \cdot \int_{d_1}^{d_2} e^{-\frac{(x_i - M_A)^2}{2 \cdot \sigma^2}}. \quad (7)$$

Примечание: действие интегрирования реализовано как суммирование площадей прямоугольников с диапазонами $(x_2 - k_1)$.

Критерий Колмогорова–Смирнова D для нормального закона распределения случайной величины как:

$$D = \lambda \cdot (\sqrt{V} - 0,001 + 0,85 / \sqrt{V}). \quad (8)$$

Вероятность соответствия закону распределения P и вероятность достоверных отличий характеристик двух секций определяются по таблице по значению D .



Общие результаты анализа

Параметры	Исследуемые пары секций одного локомотива				
	1793А/1854Б	1769А/1776А	1764А/1764Б	1764А/1784Б	1791А/1791Б
Отличие W_a , %	-0,4 %	-7,1 %	6,9 %	8,6 %	0,2 %
Отличие W_r , %	-0,2 %	-16,3 %	-4,4 %	-10,0 %	-6,9 %
Отличие W_Σ , %	-0,3 %	-11,4	1,0 %	-0,9 %	-3,5 %
Отличие K_m , %	-0,1 %	4,9 %	5,8 %	9,6 %	3,8 %
Унимодальность максимальная, %	59 %	88 %	51 %	61 %	45 %
Достоверность отличий по W_a , %	0,001 %	5 %	2 %	6 %	0,001 %
Достоверность отличий по W_r , %	0,55 %	81 %	93 %	84 %	52 %
Достоверность отличий по W_Σ , %	0,001 %	41 %	0,001 %	0,3 %	0,7 %
Достоверность отличий по K_m , %	20,8 %	99,7 %	99 %	97 %	95,8 %
Коэффициент корреляции параметров					
W_{a1}/W_{a2}	0,984	0,998	0,967	0,987	0,992
W_{r1}/W_{r2}	0,986	0,959	0,951	0,982	0,987
K_{m1}/K_{m2}	0,985	0,924	0,981	0,985	0,989
W_{a1}/W_{r1}	0,937	0,941	0,915	0,934	0,949
W_{a2}/W_{r2}	0,947	0,986	0,934	0,954	0,962

Примечание: знак в строках «отличие» W_a , W_r , W_Σ , K_m показывает направление отличий второй секции по отношению к первой.

Расчёт λ производится по интенсивности попадания в диапазон i первой R_i и второй R_2 секций:

$$\lambda = \text{Max}(|R_i - R_2|). \quad (9)$$

При сравнении двух секций расчёт D производится по формуле:

$$D = \lambda \cdot \sqrt{V} + 1 / (6 \cdot \sqrt{V}). \quad (10)$$

Тестирование программы и расчёт тестовых примеров позволил максимально автоматизировать расчёты, минимизировав при этом вероятность ошибок в вычислениях. Таким образом, разработан метод исследования энергоэффективности и технического состояния отечественных электровозов переменного тока с ВИП, обладающий следующими преимуществами:

- привязка к существующим автоматизированным информационным источникам ОАО «РЖД» о расходе электроэнергии на тягу поездов;
- автоматический расчёт статистических показателей по большому объёму исходных данных (до 2800 суток);
- визуализация результатов расчётов;

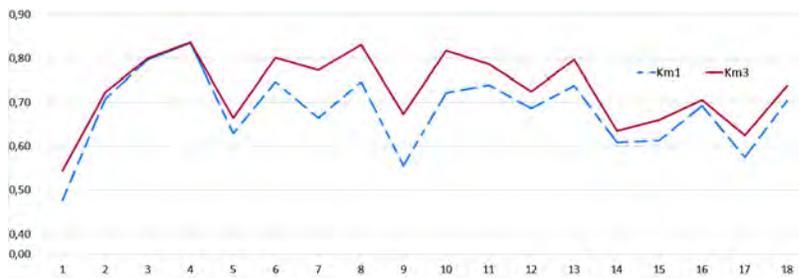
- простая и наглядная адаптация программы в среде VBA [26] под особенности решаемых задач.

Таким образом, разработанная методика и программное обеспечение позволяют выполнить научно-технический анализ возможности мониторинга технического состояния электровозов переменного тока с ВИП по данным о расходе активной и реактивной электроэнергии на тягу поездов.

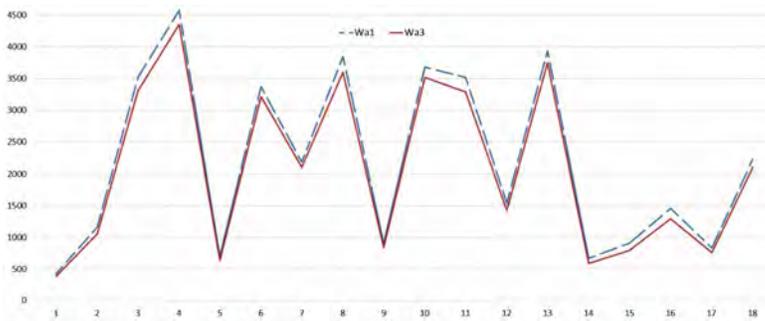
3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СЕКЦИЙ

В ДЦВ по данным отчётов УСАВП [17] с использованием разработанной методики и программного обеспечения [26] выполнен анализ расхода электроэнергии электровозов серии ВЛ80Р [21] (в т.ч. в трёхсекционном исполнении): 1793А/1854Б, 1769А/1776А, 1764А/1764Б, 1764А/1784Б, 1791А/1791Б. В табл. 3 приведены основные результаты исследований по данным за четыре месяца 2019 года (в среднем по 36 тыс. строк (табл. 1) исходных данных).

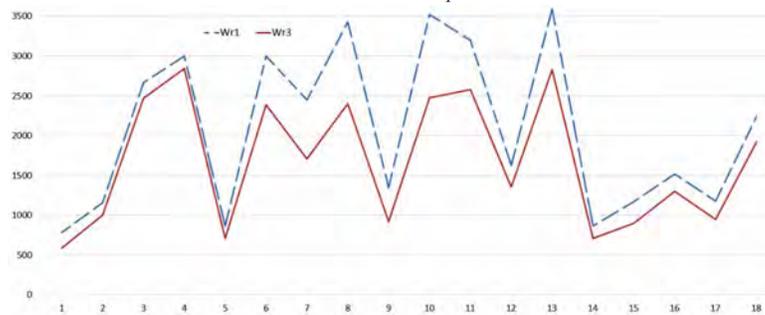
К основным результатам анализа относятся следующие:



а – коэффициент мощности



б – активная энергия



в – реактивная энергия

Рис. 4. Динамика изменения параметров секций ВЛ80Р-1769А (1) и ВЛ80Р-1776А (3) (составлено авторами).

1. Исходные данные обладают высокой степенью унимодальности, что определяется однотипностью условий эксплуатации (профиль, масса поезда, погодные условия и др.) на Восточном полигоне ОАО «РЖД».

2. Только один из пяти локомотивов (ВЛ80Р-1793А/1854Б) можно считать технически исправным (без признаков предотказов), т.к. разброс потребления электроэнергии не превышает 0,4 %. У остальных локомотивов очевидно есть проблемы с их техническим состоянием – имеют место предотказы.

3. Самым чувствительным оказался параметр «Достоверность отличий по коэффициенту мощности K_m », определяемый по критерию Колмогорова-Смирнова.

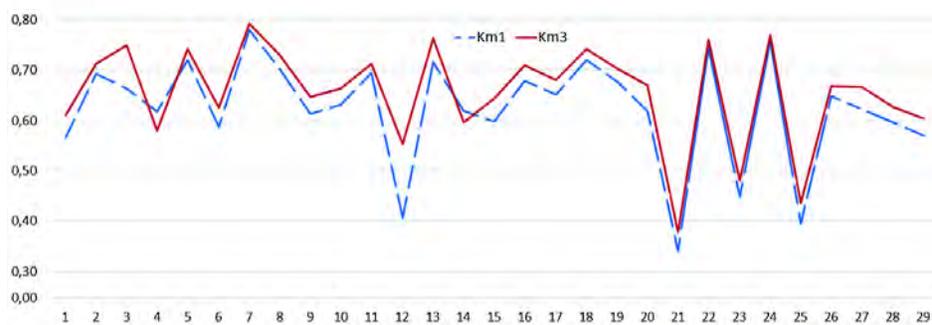
Даже у ВЛ80Р-1793А/1854Б при минимальном разбросе значений параметров «Достоверность отличий по коэффициенту мощности K_m » составила 20,8 %. У остальных локомотивов этот параметр был выше 95 %.

4. Самым нечувствительным параметром оказался параметр «Отличия по общей энергии W_Σ », что вызвано разнонаправленностью отличий по активной и реактивной электроэнергиям.

5. Коэффициент корреляции отражает визуально очевидное различие в динамических графиках параметров двух секций.

Таким образом, мониторинг технического состояния электровозов переменного тока возможен по данным о расходе активной и генерации реактивной электроэнергии.





а – коэффициент мощности



б – активная энергия



в – реактивная энергия

Рис. 5. Динамика изменения параметров секций ВЛ80Р-1791А (1) и ВЛ80Р-1791Б (3) (составлено авторами).

На рис. 2 предыдущего раздела приведена динамическая диаграмма исправного электровоза ВЛ80Р-1793/1854Б (табл. 3), на которой наблюдается практически полное совпадение графиков расхода электроэнергии первой и второй секций (кроме периода отключения одного ВИП в секции ВЛ80Р-1793А). При этом можно диагностировать кратковременное отключение одного ВИП. Отклонение характеристик секций друг от друга у других локомотивов

свидетельствует о наличии предотказов оборудования: у локомотива ВЛ80Р-1769/1776А (рис. 4) наблюдается разброс по коэффициенту мощности и реактивной мощности, что подтверждается низким коэффициентом корреляции между параметрами (0,959 и 0,924). Разброс по активной мощности низкий, что подтверждается высоким коэффициентом корреляции (0,998). Аналогичные закономерности и у электровоза ВЛ80Р-1791 (рис. 5).

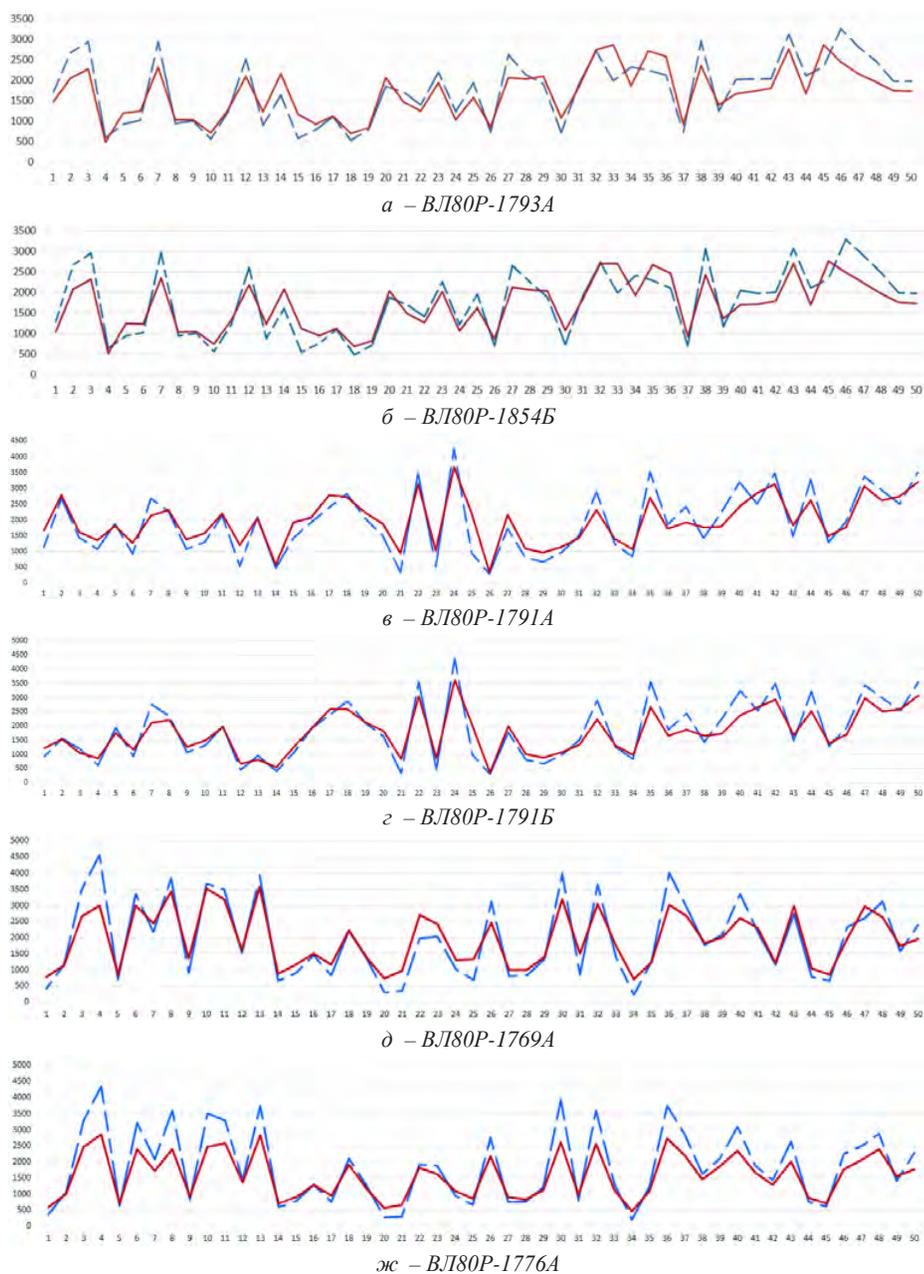


Рис. 6. Динамика изменения активной и реактивной мощности секции (пунктир – W_a , неразрывная линия – W_r) (составлено авторами).

Таким образом, по коэффициенту корреляции однотипных параметров двух секций $r < 0,99$ можно диагностировать наличие предотказов.

На рис. 6 приведено сравнение расхода активной W_a и реактивной W_r мощности двумя исправными секциями одного локомотива (рис. 6а и 6б) и секциями с предотказами (6в, 6г, 6д, 6ж). У исправного локомотива изменение активной W_a и реактивной W_r мощностей у обеих секций проис-

ходит синхронно. У других синхронность отсутствует. У всех секций есть смена соотношения мощностей: $W_a > W_r$, $W_a < W_r$, но у секций с предотказом это происходит не всегда синхронно.

4. ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ПО АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Электровозы переменного тока с выпрямительно-инверторными преобразова-



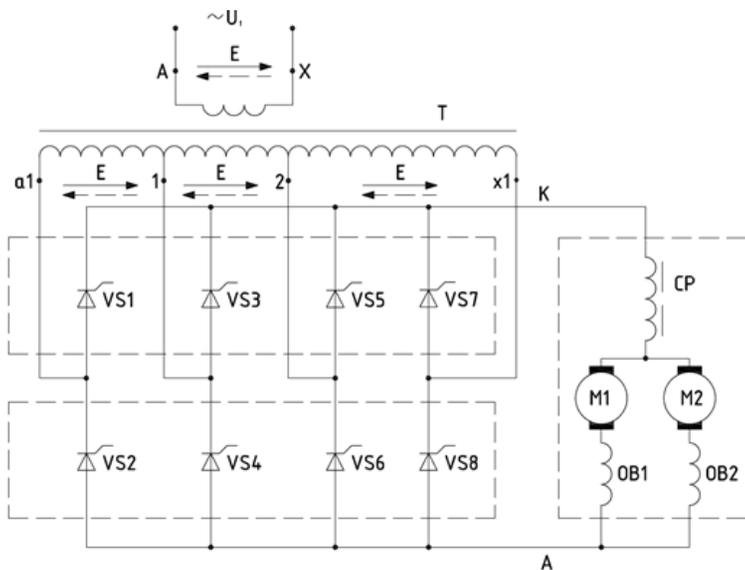
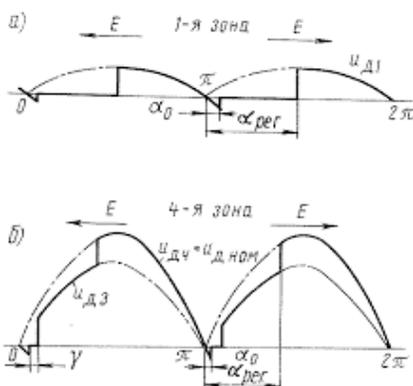


Рис. 7. Принципиальная силовая электрическая схема электровоза ВЛ80Р [20–24].

Режим работы электровоза	Этап	Положение реостата	Плечи ВИП								
			1	2	3	4	5	6	7	8	
Тапа	I	+				○					
	I	-				○					
	II	+	●			○					
	II	-	●			○					
Регулирования	III	+				○					
	III	-				○					
	IV	+	●			○					
	IV	-	●			○					
Регулирования	II	+				○					
	II	-				○					
	I	+				○					
	I	-				○					

а – алгоритм управления ВИП



б – диаграмма напряжения ВИП

Рис. 8. Четырёхзонное управление ВИП электровоза ВЛ80Р [20–24].

телями имеют типовую электрическую схему (рис. 7) [18–24]: первичная обмотка силового трансформатора электровоза $U_1 = 25$ кВ питает две группы вторичных обмоток (на рис. 7 показана одна группа) напряжением 300 В, 300 В, 600 В, которое поступает на вход выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП, VS_1 – VS_8). К выходу ВИП подключены последовательно сглаживающий реактор СР и два параллельно работающих тяговых электродвигателя (ТЭД) постоянного тока с последовательным возбуждением М1, М2. Все ВИП у ВЛ80Р получают управляющие сигналы на открытие тиристоров с одного блока управления, которые реализуют алгоритм управления согласно рис. 8.

Наличие реактивной мощности обусловлено наличием индуктивных нагрузок в цепи электровоза [29] – это силовой трансформатор, сглаживающий реактор и сами тяговые двигатели (рис. 7). Дополнительное запаздывание тока от напряжения даёт тиристорное управление, позволяющее управлять выпрямленным напряжением только «слева» – на открытие (рис. 8) [24]. Поэтому у электровозов переменного тока с ВИП номинальный коэффициент мощности ниже и составляет $K_m = 0,84$ [19]. В выполненных исследованиях у исправного локомотива математическое ожидание $K_m = 0,69$ при $\sigma = 10$ и унимодальности 3%. Максимальное значение не превышало $K_m \leq 0,83$.

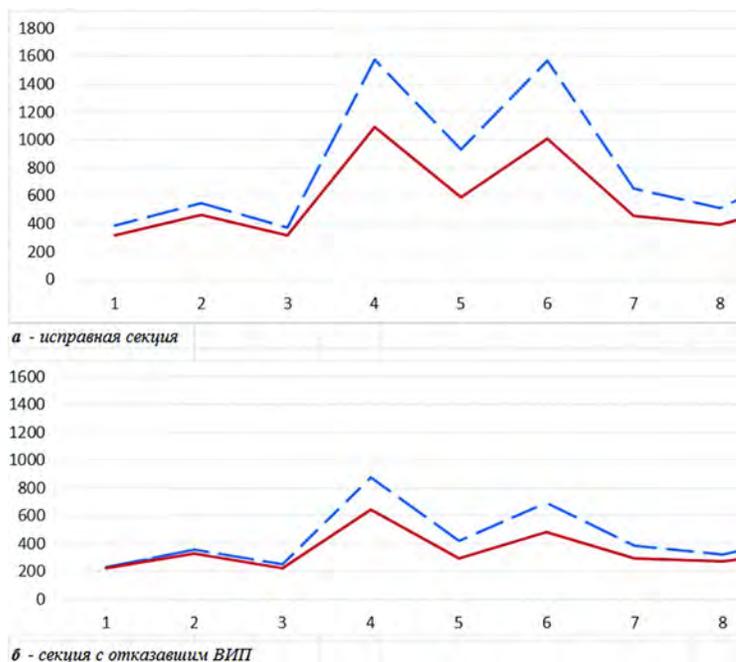


Рис. 9. Активная (синий пунктир, верхняя линия) и реактивная (неразрывная красная нижняя линия) составляющие энергии одного локомотива исправной секции и секции с отказавшим ВИП (составлено авторами).

Максимальный разброс могут давать тяговые электродвигатели, но допустимый разброс их характеристик не превышает 3%. У сглаживающих реакторов, даже если есть незначительный разброс, то он вносит постоянную погрешность.

Таким образом, из устройства локомотива и его системы управления следует, что существенного разброса в потреблении активной и реактивной энергии у двух исправных секций одного локомотива теоретически быть не должно.

Причин для изменения соотношения активной и реактивной мощности может быть две: непропорциональное изменение активной мощности и/или непропорциональное изменение реактивной мощности.

Реактивная мощность локомотива имеет место, прежде всего, из-за тиристорной схемы управления, когда открытие ВИП (по сути – выпрямительного моста) происходит по импульсу управления $9^\circ < \alpha_{PEГ} < 156^\circ$. Таким образом, отставание тока от напряжения всегда имеет место (рис. 8б).

Дополнительное отставание тока от напряжения обусловлено временем коммутации тиристоров γ (рис. 8б), длительность которого зависит от значения индук-

тивной нагрузки: сглаживающего реактора и двух тяговых электродвигателей. При одной и той же позиции регулирования непропорциональное изменение нагрузки может быть только за счёт изменения параметров тягового электродвигателя, в т.ч. из-за отключения. У ТЭД имеется постоянная индуктивность $L_{ТЭД}$, которая определяется его конструктивным исполнением, и переменная – за счёт явлений самоиндукции и взаимной индукции [29–31].

На рис. 3 приведён пример обнаружения аварийного отключения части силовой цепи секции электровоза, что приводит к существенному снижению энергопотребления секции: при отключении одного ТЭД потребление электроэнергии на тягу упадёт на 25%, одного ВИП – на 50%. Однако при исправной работе вспомогательных машин (мотор-вентиляторов и компрессора), потребляющих до 20% от общего расхода электроэнергии, падение составит примерно 21% и 42%. В примере на рис. 3 падение составило 41–45%. При этом соотношение активной и реактивной энергий не изменилось (рис. 9).

Главной причиной изменения тока одной секции (кроме отключения секции, ВИП или ТЭД) является боксование одной



или нескольких колёсных пар, которое при неизменном напряжении на тяговом электродвигателе $U_{\text{ТЭД}} = \text{const}$ сопровождается ростом электродвижущей силы E (э.д.с.) и падением тока ТЭД $I_{\text{ТЭД}}$ [30]:

$$U_{\text{ТЭД}} = I_{\text{ТЭД}} \cdot r_{\text{ТЭД}} + E = I_{\text{ТЭД}} \cdot r_{\text{ТЭД}} + C \cdot n_{\text{ТЭД}} \cdot \Phi_{\text{ТЭД}}, \quad (11)$$

где $r_{\text{ТЭД}}$ – сопротивление ТЭД;
 $n_{\text{ТЭД}}$ – скорость вращения ТЭД;
 $\Phi_{\text{ТЭД}}$ – магнитный поток ТЭД;
 C – константа.

Повышенное боксование возникает у первого по ходу движения колёсно-моторного блока (КМБ), у КМБ с нарушением развески локомотива, у КМБ с меньшим диаметром бандажа колёсной пары $D_{\text{кп}}$, т.к. при равном крутящем моменте колёсной пары $M_{\text{кп}}$ сила тяги $F_{\text{т}}$ будет увеличенной:

$$M_{\text{кп}} = F_{\text{т}} \cdot D_{\text{кп}} / 2. \quad (12)$$

При боксовании ток падает, как следствие, падает потребление электроэнергии. При неизменном сопротивлении и индуктивности цепи активная и реактивная мощности должны уменьшиться пропорционально. Однако это не так: при боксовании у буксующего ТЭД растёт индуктивное сопротивление ωL :

$$\omega L = (\omega_1 L_1 \cdot \omega_2 L_2) / (\omega_1 L_1 + \omega_2 L_2), \quad (13)$$

где $\omega_1 L_1$, $\omega_2 L_2$ – индуктивное сопротивление первого и второго ТЭД;

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f;$$

f – частота изменения сигнала.

В пределе при $f \rightarrow \infty$ индуктивное сопротивление двух ТЭД возрастёт вдвое.

Таким образом, при боксовании происходит уменьшение потребляемой мощности с увеличением доли реактивной мощности и уменьшением коэффициента мощности секции локомотива. Таким образом, меньшее потребление мощности с уменьшением коэффициента мощности может быть признаком наличия повышенного боксования.

На рис. 1 показано, что при ослаблении тока могут возникать существенные выбросы токов ТЭД. У ТЭД с меньшим током будет меньше индуктивное сопротивление, что тоже должно отразиться на закономерностях активной и реактивной мощностей.

Таким образом, все основные виды неисправностей в силовых цепях электровоза с ВИП влияют на характер расхода активной и реактивной электроэнергии.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. С целью повышения эффективности мониторинга технического состояния электровозов переменного тока с выпрямительно-инверторными преобразователями предложен метод диагностирования их исправности в целом, по данным электронных счётчиков электроэнергии, передающих данные в онлайн-режиме.

2. Выполненные исследования показали, что динамические данные о расходе активной и реактивной электроэнергии, автоматически собираемые в онлайн-режиме с отечественных локомотивов переменного тока с выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИП), могут быть использованы для диагностирования технического состояния локомотива в системе их мониторинга. Основа метода – сравнение динамики расхода активной и реактивной энергий двух секций одного локомотива по принципу функционального бенчмаркинга.

3. При мониторинге технического состояния локомотивов следует использовать понятие «предотказ», определяемое как работоспособное состояние локомотива при наличии внутренних скрытых дефектов или повреждений. Предотказ проявляется на расходе электроэнергии – вызвавший его дефект следует определять при заходе локомотива на ТОиР.

4. Наиболее чувствительным к предотказам является параметр «Достоверность отличий по коэффициенту мощности K_m », определяемый с использованием критерия Колмогорова–Смирнова. Наименее чувствительным к предотказам оказался параметр «Достоверность отличий по общей энергии».

5. В дальнейших исследованиях авторы намерены установить закономерности (функциональные связи) между проявлениями предотказных состояний по данным о расходе активной и реактивной составляющих электроэнергии и возникшими в цепях электровоза переменного тока с ВИП неисправностями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов. Теория и практика / Под общей редакцией И. К. Лакина. – М.: ООО «Локомотивные Технологии», 2015. – 212 с.

2. Hedlund, E. H., Roddy, N. E., Gibson, D. R., Biley, R. G., Pander, J. E., Puri, A., O'Camb, T. E., Lovelace, J. H., Steven, L. Apparatus and Method for Performance and Fault Data Analysis. US Patent 6,651,034 B1, 2003; US Patent 7,013,239 B2, 2006. Assignee: General Electric Company.

3. Лакин И. И. Мониторинг технического состояния локомотивов по данным бортовых аппаратно-программных комплексов / Дис... канд. техн. наук. — М.: МИИТ, 2016. — 211 с. [Электронный ресурс]: https://www.mii.ru/content/%D0%94%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F.pdf?id_wm=756728. Доступ 13.05.2020.

4. Аболмасов А. А. Управление техническим состоянием тягового подвижного состава в условиях сервисного обслуживания / Дис... канд. техн. наук. — М.: МИИТ, 2017. — 180 с. [Электронный ресурс]: <https://docplayer.ru/49152812-Abolmasov-aleksey-aleksandrovich-upravlenie-tehnicheskim-sostoyaniemyagovizhivaniya.html>. Доступ 13.05.2020.

5. Пустовой В. Н., Лянгасов С. Л., Лакин И. К. Мониторинг нарушений режимов эксплуатации локомотивов по данным МСУ // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы 6 международной научно-практической конференции. — Иркутск, 2015. — С. 354–358.

6. Пустовой И. В. Разработка информационно-динамической модели управления сервисным техническим обслуживанием / Дис... канд. техн. наук — Омск: ОмГУПС, 2019. — 181 с. [Электронный ресурс]: https://www.usurt.ru/uploads/main/065/5b97add2b36f8/%D0%94%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%9F%D1%83%D1%81%D1%82%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%D0%98%D0%BB%D1%8C%D0%B8%D0%92%D0%BB%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%87%D0%B0.pdf. Доступ 13.05.2020.

7. Официальный сайт АО «Трансмашхолдинг». Раздел «Предприятия». [Электронный ресурс]: https://www.tmholding.ru/about_us/enterprises/. Доступ 13.05.2020.

8. Официальный сайт ООО «Уральские локомотивы». Раздел «Продукция». [Электронный ресурс]: <http://ulkm.ru/produkcija/>. Доступ 13.05.2020.

9. Головин В. И., Наговицын В. С. АСУ с функцией безопасности для электровазона 2ЭС6 / Сайт «СЦБИСТ». 2018, № 4. [Электронный ресурс]: <http://scbist.com/>. Доступ 13.05.2020.

10. Семченко В. В., Лакин И. К., Чмилёв И. Е. Эксплуатация и техническое обслуживание электронных систем управления электровазона переменного тока. — Красноярск: Издательство дорожного центра внедрения Красноярской железной дороги, 2010. — 72 с.

11. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. [Электронный ресурс]: <http://docs.cntd.ru/document/1200009481>. Доступ 13.05.2020.

12. ГОСТ 27.002-2015. Надёжность в технике (ССНТ). Термины и определения. [Электронный ресурс]: <http://docs.cntd.ru/document/1200136419>. Доступ 13.05.2020.

13. Липа К. В., Гриненко В. И., Лянгасов С. Л., Лакин И. К., Аболмасов А. А. и др. Способ технического диагностирования оборудования локомотива и устройство для его осуществления. Патент на изобретение от 21.07.2017 г. № 2626168. [Электронный ресурс]: https://yandex.ru/patents/doc/RU2626168C2_20170721. Доступ 13.05.2020.

14. Липа К. В., Гриненко В. И., Лянгасов С. Л., Лакин И. К., Аболмасов А. А. и др. Способ управления обслуживанием и ремонтом железнодорожного транспорта и система для его осуществления. Патент на изобретение от 24.10.2013 г. № 2569216. [Электронный ресурс]: https://yandex.ru/patents/doc/RU2569216C2_20151120. Доступ 13.05.2020.

15. Официальный сайт НИИТКД. Раздел «Локомотивное хозяйство». [Электронный ресурс]: <http://niitkd.com/locomotivnoe/ekspluatatsiya/apparatno-programmnyy-kompleks-bort-detail>. Доступ 13.05.2020.

16. Овчаренко С. М. Повышение эффективности системы диагностирования тепловозов / Дис... док. техн. наук. — Омск: ОмГУПС, 2007. — 366 с.

17. Официальный сайт компании «АВП Технологии». Раздел «Мониторинг». [Электронный ресурс]: <https://avpt.ru/projects/monitoring-i-kontrol/>. Доступ 13.05.2020.

18. Тихменев Б. Н., Трахтман Л. М. Подвижной состав электрифицированных железных дорог. Теория работы электрооборудования. Электрические схемы и аппараты. — М.: Транспорт, 1980. — 471 с.

19. Капустин Л. Д., Копанев А. С., Лозановский А. Л. Особенности устройства и эксплуатации электровазона ВЛ80Р. — М.: Транспорт, 1979. — 175 с.

20. Горбань В. Н., Донской А. Л., Шабалин Н. Г. Электронное оборудование электровазона ВЛ80: Ремонт и техническое обслуживание. — М.: Транспорт, 1984. — 184 с.

21. Электровазона ВЛ80Р. Руководство по эксплуатации — М.: Транспорт, 1982. — 541 с.

22. Электровазона ВЛ85. Руководство по эксплуатации. — М.: Транспорт, 1986. — 572 с.

23. Электровазона магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К). Руководство по эксплуатации. — Кн. 1. Электрические схемы. — Новочеркасск, 2004. — 248 с.

24. Капустин Л. Д., Копанев А. С., Лозановский А. Л. Надёжность и эффективность электровазона ВЛ80Р в эксплуатации. — М.: Транспорт, 1986. — 240 с.

25. Семченко В. В., Власьевский С. В. Устройство для повышения коэффициента мощности выпрямительно-инверторного преобразователя однофазного переменного тока. Патент на полезную модель № 192613 от 24.09.2019. [Электронный ресурс]: https://yandex.ru/patents/doc/RU192613U1_20190924. Доступ 13.05.2020.

26. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020613912 Российская Федерация. Программа анализа энергоэффективности электровазона переменного тока с выпрямительно-инверторными преобразователями / Семченко В. В., Лакин И. К. и др.; правообладатель Акционерное общество «Дорожный центр внедрения Красноярской железной дороги» № 2019665780 заявл. 05.12.2019; опублик. 24.03.2020. — 1 с.

27. Осетрова И. С., Осипов Н. А. Microsoft Visual Basic for Application. — СПб.: НИУ ИТМО, 2013. — 120 с.

28. Вентцель Е. С. Теория вероятности: Учебник. — 12-е изд., стер. — М.: Юстиция, 2018. — 658 с.

29. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. — М.: Высшая школа, 1996. — 638 с.

30. Динамическая индуктивность. [Электронный ресурс]: <http://www.transportine.ru/inets-455-2.html>. Доступ 13.05.2020.

31. Захарченко Д. Д., Ротанов Н. А. Тяговые электрические машины. — М.: Транспорт, 1991. — 343 с. ●

