

УДК 629.1

*Е. А. Третьяков, Д. Н. Соловьёв*

*Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Российская Федерация*

## **К ВОПРОСУ О СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ БОРТОВЫХ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГРУЗОВЫХ ЭЛЕКТРОВЗОВ**

**Аннотация.** В работе представлены результаты эксплуатационной надежности электровозов серии 2ЭС6 приписки эксплуатационного локомотивного депо Омск Западно-Сибирской железной дороги за 2020 г. по видам неисправностей и оборудования. Выполнен сравнительный анализ отечественных и зарубежных исследований в области бортовых систем технического диагностирования электроподвижного состава, обеспечивающих контроль и техническое состояние локомотивов в реальном времени.

Показано, что основным направлением совершенствования бортовых систем прескриптивного технического диагностирования магистральных грузовых электровозов является прогнозирование событий и сценариев, снижающих ресурс электрооборудования или приводящих к отключению действиями защиты, и определение оптимальных воздействий на электровоз для повышения надежности его работы и недопущения создания неприемлемых условий работы и аварийных ситуаций на основе цифровых математических моделей объектов реального времени. Показаны результаты анализа данных с бортовых измерительных систем электроподвижного состава с помощью инструментального средства машинного обучения KNIME.

**Ключевые слова:** электровоз, анализ, неисправности оборудования, техническое диагностирование, эффективность, цифровая модель.

*Е. А. Tretyakov, D. N. Solovyov*

*Omsk State Transport University, Omsk, the Russian Federation*

## **TO THE QUESTION OF IMPROVEMENT OF ON-BOARD SYSTEMS OF TECHNICAL DIAGNOSIS OF THE MAIN CARGO ELECTRIC LOCOMOTIVES**

**Abstract.** The paper presents the results of the operational reliability of electric locomotives of the 2ES6 series at the registration of the operational locomotive depot Omsk of the West Siberian Railway for 2020 by types of malfunctions and equipment. A comparative analysis of domestic and foreign studies in the field of on-board systems for predictive technical diagnostics of electric rolling stock, which provide control and technical condition of locomotives in real time, has been carried out.

It is shown that the main direction of improving on-board systems of prescriptive technical diagnostics of main-line freight electric locomotives is the prediction of events and scenes that reduce the life of electrical equipment or lead to disconnection by protection actions, and determining optimal effects on the electric locomotive to increase the reliability of its operation and prevent the creation of unacceptable working conditions and emergency situations based on digital mathematical models of real-time objects. The results of data analysis from on-board measuring systems of electric rolling stock using the KNIME machine learning tool are shown.

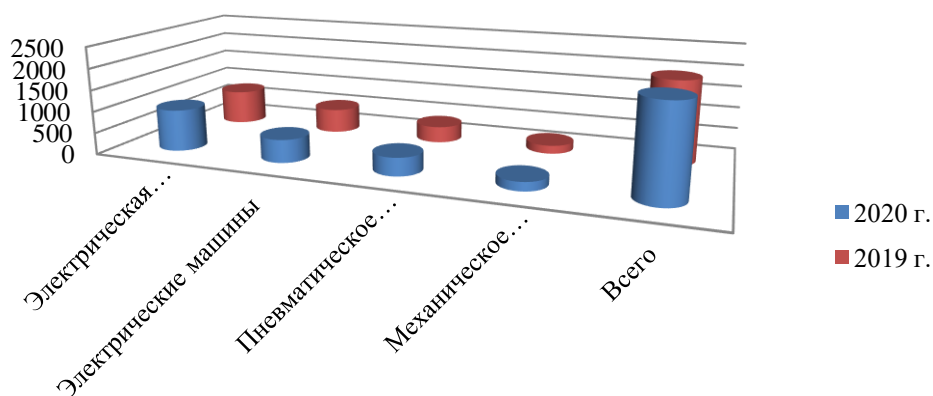
**Keywords:** electric locomotive, analysis, equipment failures, technical diagnostics, efficiency, digital model.

### **Введение**

В 2020 году завод «Уральские локомотивы» изготовил и передал ОАО «РЖД» 96 двухсекционных грузовых электровозов постоянного тока серии 2ЭС6. Но, несмотря на применяемые новые технические решения и улучшенные характеристики данных электровозов, проблема отказов оборудования остается актуальной. Основной объём отказов приходится на долю электрической аппаратуры и электрических машин. Для решения данной проблемы необходимо повышать эксплуатационную надежность электровозов взяв за основу новые цифровые технологии технического диагностирования.

В процессе эксплуатации электровозов серии 2ЭС6 приписки эксплуатационного локомотивного депо Омск Западно – Сибирской железной дороги в 2020 году было выявлено 2116 случаев неисправностей локомотивов и, как следствие, их перевод в неэксплуатируемый парк (неплановый ремонт).

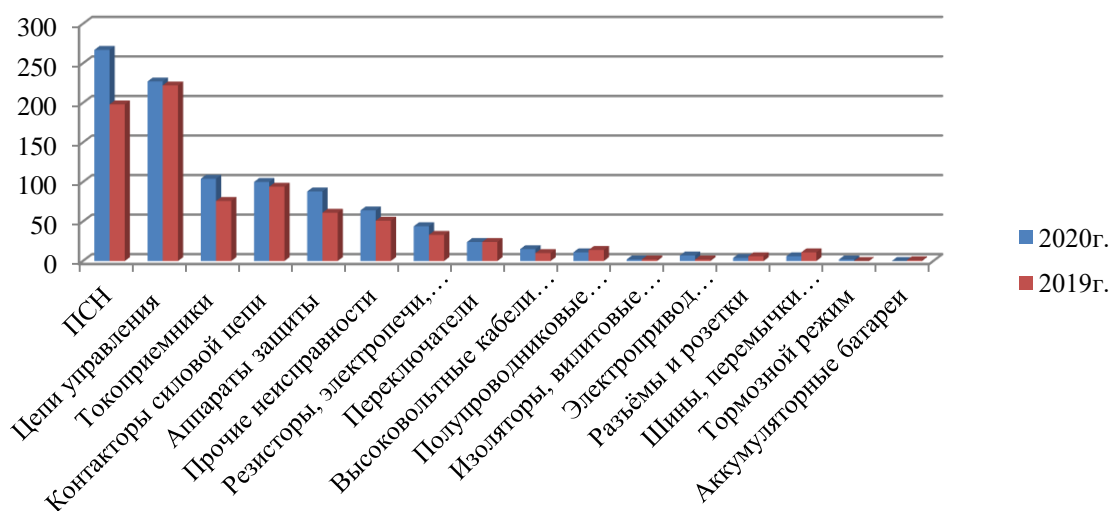
Распределение неисправностей локомотивов по виду оборудования в 2020 году по сравнению с 2019 годом представлены на рис. 1 (в количестве случаев).



**Рисунок 1 – Распределение неисправностей локомотивов по виду оборудования**

Как следует из рис.1, основную долю неисправностей электровозов составляет электрическая аппаратура, второе место занимают электрические машины, третье место – пневматическое оборудование и на четвертом – механическое оборудование.

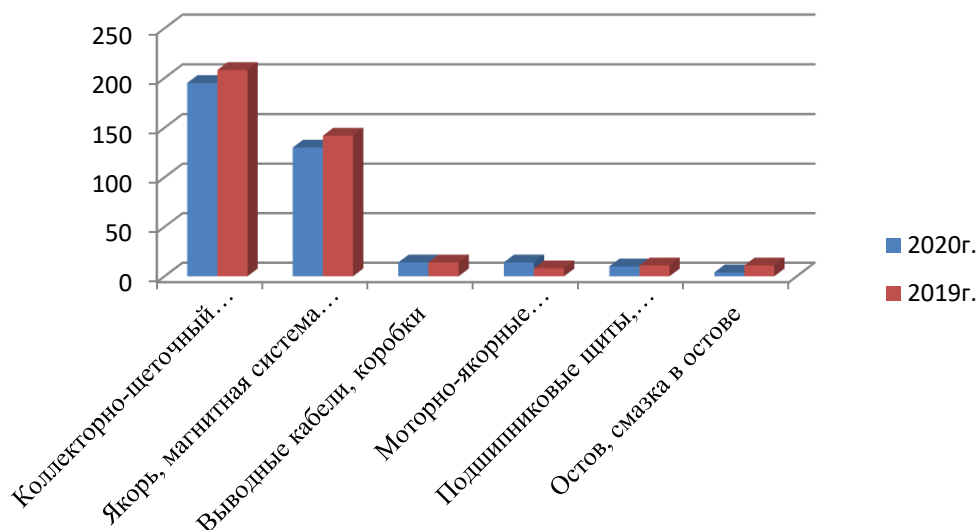
Рассмотрим более подробно случаи выхода из строя электровозов 2ЭС6 по причине неисправности электрической аппаратуры и электрических машин. Распределение неисправностей электрической аппаратуры в 2020 г. по сравнению с 2019 г. представлены на рис. 2.



**Рисунок 2 – Распределение неисправностей электрической аппаратуры**

Как следует из рис.2, основную долю неисправностей электрической аппаратуры составляет преобразователь собственных нужд (ПСН), цепи управления, токоприемники, контакторы силовой цепи и аппараты защиты.

Распределение неисправностей электрических машин в 2020 г. по сравнению с 2019 г. представлены на рис. 3. Основную долю неисправностей электрических машин составляют повреждение коллекторно-щеточного аппарата, якоря и магнитной системы остова.



**Рисунок 3 – Распределение неисправностей электрических машин**

В соответствии со Стратегией научно-технологического развития холдинга «РЖД» до 2025 и на перспективу до 2030 года, Концепцией реализации комплексный научно-технический проект «Цифровая железная дорога» приоритетными направлениями развития локомотивного комплекса являются совершенствование бортовых средств технического диагностирования и автоматического энергооптимального вождения подвижного состава, что должно способствовать повышению безопасности, надежности движения поездов, энергоэффективности, снижению рисков, связанных с человеческим фактором.

В настоящее время в России и за рубежом широко начали применять дистанционные методы диагностики тягового подвижного состава (ТПС) [1-4]. General Motors разработала систему FIRE, обеспечивающую контроль и техническое состояние локомотивов в реальном времени.

В Германии разработана система ruDi для контроля и управления парком ТПС [5]. Она обеспечивает регистрацию всех эксплуатационных данных, техническую диагностику подвижного состава в оперативном режиме и определяет его местонахождение.

Сегодня в ОАО «РЖД» активно развивается проект «Умный локомотив», разрабатывается автоматизированная система учета, анализа и расследования отказов технических средств [6-10]. В группе компаний ООО «ЛокоТех» совместно с ООО «Кlover групп» имеется успешный опыт реализации диагностирования подвижного состава для целей ТО и ТР по состоянию. Разрабатываются модели прогнозирования ресурса работы объектов диагностирования до отказа от эксплуатационных факторов.

Развивается также направление, связанное с реализацией алгоритмических защит от нарушений режимов эксплуатации локомотивов, когда из-за ошибочного действия / бездействия локомотивной бригады или прочих факторов возникают условия возникновения отказов сейчас или в будущем. На данном этапе развития технологии алгоритмических защит локомотивов, как следует из опубликованных источников [11-13], до конца не удалось определить связь превышения допустимых параметров режима эксплуатации и вероятного отказа в течение последующих 30-40 дней. Как правило, алгоритмические защиты работают на отключение / снижение параметра или оборудования локомотива с выдачей соответствующего диагностического сообщения. После срабатывания подобных защит машинист самостоятельно должен далее осуществлять включение / изменение режимов работы локомотива.

Основная идея реализуемого авторами подхода прескриптивной системы технического диагностирования тяговых электродвигателей, элементов силовой схемы электровозов серии 2ЭС6 заключается в том, что необходимо не просто диагностировать состояния оборудования и его остаточный ресурс, не просто контролировать превышение допустимых парамет-

ров и режимов эксплуатации, а прогнозировать события и сценарии, снижающие ресурс электрооборудования или приводящие к его отключению действиями защиты, далее определять оптимальные воздействия на электровоз для повышения надежности его работы и недопущения создания неприемлемых условий работы и аварийных ситуаций.

#### Методы и средства.

В рамках настоящего исследования, как составной части прескриптивной бортовой системы технического диагностирования, решаются следующие задачи:

– выявление неисправности тяговых электродвигателей, неравномерная их загрузка, а также различие электромеханических характеристик;

– выявление отклонений и выбросов (аномалий) измеренных значений электрических величин, связанных с нарушениями в режимах работы электрооборудования, отклонением параметров элементов силовой цепи электровозов от расчетных, в том числе на основе создания математической модели локомотива;

– определение случаев превышений фактических эксплуатационных параметров электровозов над расчетными, установленными заводом-изготовителем;

– выявление корреляционной связи между внешними возмущениями электрических величин и отклонениями в работе, отказами электрооборудования электровоза и пр.

Анализ данных с бортовых измерительных систем электровоза 2ЭС6 в рамках решаемых задач выполнялся с помощью программной среды машинного обучения KNIME [14].

При различных режимах работы электровоза (режим тяги, выбег, торможение, изменение силовой схемы, внешних сил и факторов) происходит динамическое изменение контролируемых МПСУиД параметров, в том числе случайным образом.

В качестве моделей режимов, например, тяговых электродвигателей (ТЭД) будем рассматривать следующие:

1. Нормальный: все параметры ТЭД, силовой цепи в эксплуатации находятся в пределах значений, установленных заводом-изготовителем и прочими нормативными документами.

2. Предаварийный: нарушение режимов эксплуатации (как правило, превышение допустимых параметров) и предотказное состояние ТЭД.

3. Аварийный: связан с ненормальной работой электрооборудования, как правило, его развитие приводит к срабатыванию защиты и (или) отказу.

Рассмотрим предлагаемые модели предаварийного и аварийного режимов с точки зрения критериев, принципов идентификации указанных режимов и выявления аномалий.

На рисунке 4 представлен общий порядок идентификации режимов на примере ТЭД.

Под аномалией в данном случае будем понимать ситуацию, когда значение измеренного (определенного) показателя работы ТЭД достаточно сильно отклоняется от прогнозируемого (ожидаемого, установленного) для данного режима работы.

Модель идентифицирует режим как предаварийный в случае превышения допустимых измеренных электрических параметров и выявления предотказного состояния ТЭД на основе косвенных оценок.

Критерии нарушения режимов эксплуатации – это превышение допустимых параметров, установленных заводом-изготовителем [15].

Ограничение по предельному току якоря и возбуждения ТЭД:  $I_{я} > I_{я\text{доп}}$ ;  $I_{в} > I_{в\text{доп}}$ .

Ограничение тока якоря по коммутации (при заданных токах возбуждения), описывается в выражении (1):

$$I_{я} > \begin{cases} 900 \text{ при } I_{в} = 800 \text{ A}; \\ 802,8 I_{в}^{-0,269} \text{ при } 200 < I_{в} < 800 \text{ A}; \\ 800 \text{ при } 350 \leq I_{в} < 580 \text{ A}. \end{cases} \quad (1)$$

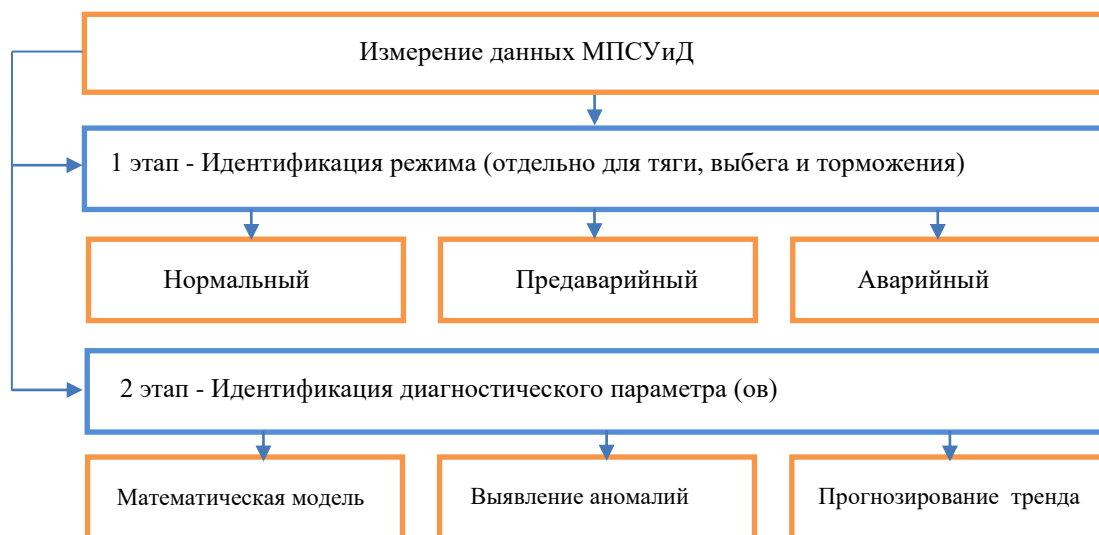


Рисунок 4 – Общий порядок идентификации режимов ТЭД

Ограничение по предельному току принимается с учетом ограничения по коммутации, по силе тяги часового и продолжительного режима (по всем ТЭД):

$$F_k > \begin{cases} F_{\text{к доп}} & \text{при } U_{\text{кc}} > 2,9 \text{ кВ;} \\ F_{\text{к доп}} \left( \frac{U_{\text{кc факт}}}{U_{\text{кc ном}}} \right) & \text{при } U < 2,9 \text{ кВ.} \end{cases} \quad (2)$$

по наибольшему напряжению на вводах ТЭД

$$U_{\text{тэд}} > U_{\text{тэд доп}} ;$$

по току якоря, току возбуждения группы ТЭД при трогании

$$I_{\text{я трог}} > I_{\text{ядоп трог}} ; I_{\text{в трог}} > I_{\text{вдоп трог}} ; 0 < v < 5 \text{ км/ч.}$$

по предельной степени ослабления возбуждения:

при напряжении 1500 В – соединение П;

$$\beta < 30\% ; 750 \text{ В – соединение СП; } 375 \text{ В – соединение С) } \beta < 25\% ;$$

по наибольшей частоте вращения, об/мин

$$n > n_{\text{доп}} ;$$

по допусжаемому сопротивлению изоляции группы ТЭД

$$R > R_{\text{доп}} .$$

Критерии предотказного состояния ТЭД:

отклонение токов якоря, возбуждения групп ТЭД (несимметричная загрузка групп ТЭД):

$$\frac{|I_{\text{я1,2}} - I_{\text{я3,4}}|}{I_{\text{я3,4}}} > I_{\text{я зад}} \% , \frac{|I_{\text{в1,2}} - I_{\text{в3,4}}|}{I_{\text{в3,4}}} > I_{\text{в зад}} \% ; \quad (3)$$

низкая корреляционная связь между токами якоря, возбуждения среди групп ТЭД (тележек):

$$r_l(i_{\text{я12}}, i_{\text{я34}}) = \frac{\sum_{i=1}^n (I_{\text{я12}i} - \bar{I}_{\text{я12}})(I_{\text{я34}i} - \bar{I}_{\text{я34}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (I_{\text{я12}i} - \bar{I}_{\text{я12}})^2 \sum_{j=1}^n (I_{\text{я34}j} - \bar{I}_{\text{я34}})^2}} \text{ и т.д.,} \quad (4)$$

$\bar{I}_{\text{я12}}$  – выборочное среднее (выборку для усреднения предлагается принимать в пределах одной позиции тяги длительностью около 2 ч).

Значения критериев:

$r_1 > 0,95$  – в цепи одного из ТЭД может быть отклонение в параметрах силовой цепи (например, резисторы ослабления поля);

$r_1 = 0,80 \div 0,95$  временные отключения ТЭД, боксование колесно-моторного блока, другие отклонения от нормальной работы;

$r_1 = 0,5 \div 0,8$  существенная неисправность ТЭД.

$r_1 < 0,50$  существенная неисправность ТЭД или датчиков.

низкая корреляция между напряжением на вводах ТЭД и током якоря, током возбуждения группы ТЭД.

$|r_1(i_{я12}, U_{тэд})| < 0,5$ ,  $|r_1(i_{в12}, U_{тэд})| < 0,5$  и т.п. по всем группам ТЭД в пределах одинаковой позиции тяги.

Выполнение (невыполнение) логических (алгоритмических) условий: сопоставление измеренных значений с прочими факторами (положение, контакторов, скорость движения, сопротивление изоляции и т.д.) на основе логической конъюнкции («И»), дизъюнкции («ИЛИ») типа: если выполняется условие 1 и условие 2 и условие 3, то наблюдается «аномалия» или путем определения принадлежности события к множеству, связанного с предотказным состоянием.

### Результаты

Превышение допустимых режимов эксплуатации электрооборудования электровоза серии 2ЭС6 по были обработаны данные в программе KNIME с регистраторов параметров движения электровоза серии 2ЭС6.

Как известно, наиболее распространенные методы анализа данных, в том числе для поиска аномалий, связаны с построением регрессионных моделей (линейные, логистические регрессии и пр.), классификационных моделей (деревья решений, ансамбли деревьев, метод опорных векторов, многослойный персептрон и пр.), кластеризации (метод k-средних, пространственная, иерархическая кластеризация и пр.), оценкой моделей (кросс-валидация, матрица несоответствия и пр.), применением глубокого обучения нейросетей и пр.

Кластеризация данных тока якоря методом k-среднего реализована в KNIME (рис.5).

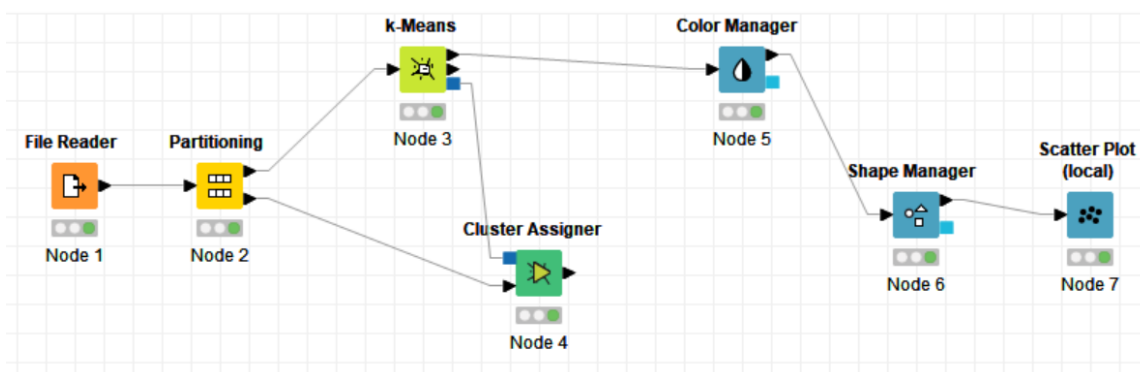


Рисунок 5 – Рабочая область KNIME

Основной решаемой задачей указанным методом кластеризации является поиск и изучения отклонений и выбросов экспериментальных измеренных данных относительно гипотез их взаимосвязи между собой (в виде электротяговых, электромеханических характеристик ТЭД и электровозов, характеристик, определяемых на основе законов Кирхгофа для электрической силовой цепи электровоза и пр.).

На рисунке 6 представлена зависимость токов якоря групп 1-2 ТЭД от токов якоря групп 3-4 и тока возбуждения от тока возбуждения уставки. Кластерный анализ позволяет выявить аномальные точки с выбросами – отклонениями от линейной зависимости или от типовых характеристик. Причиной указанных выбросов может быть некорректность исходных данных, которые необходимо дополнительно отфильтровать, либо неисправность эле-

ментов силовой цепи электровозов, приводящая, например, к недопустимому разбросу токов между ветвями 1-2 и 3-4.

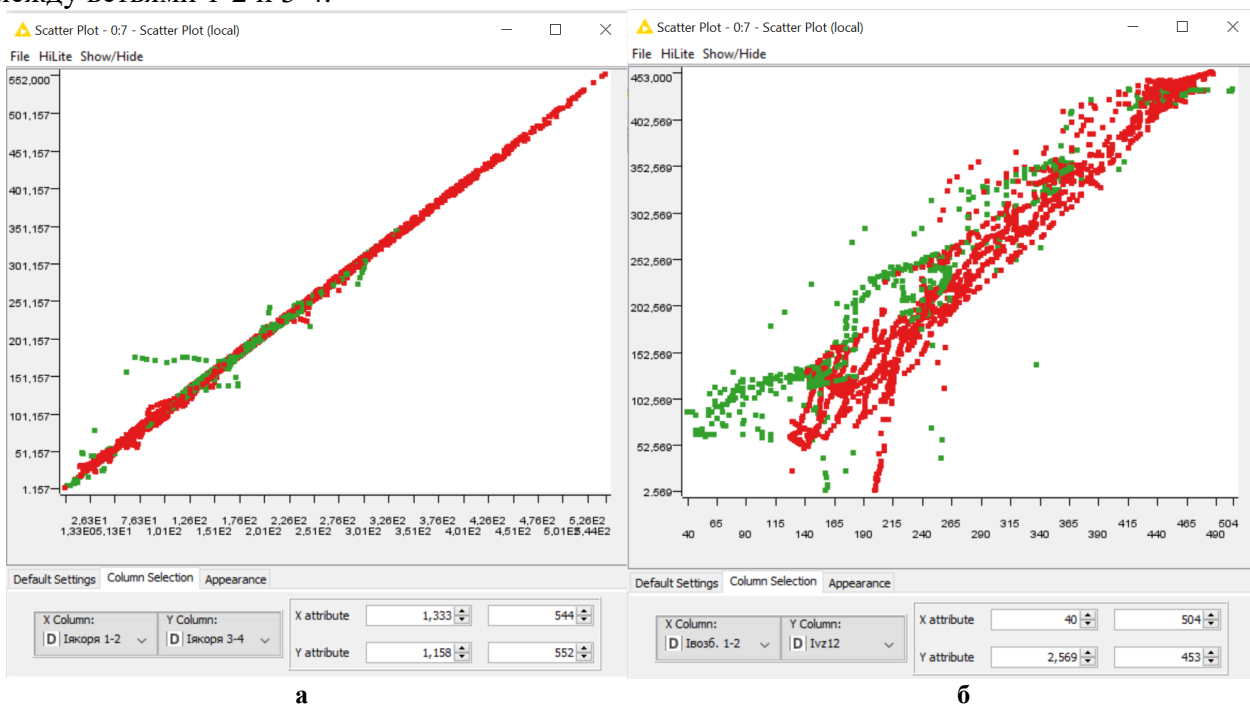


Рисунок 6 – Зависимость токов якоря групп 1-2 ТЭД от токов якоря групп 3-4 (а) и зависимость тока возбуждения от тока возбуждения уставки (б) с двумя кластерами

На рис.6 наблюдаются аномалии в токах якоря групп 1-2 и 3-4, связанные с неравенством тока в параллельных ветвях из-за асинхронизма включения силовых контакторов.

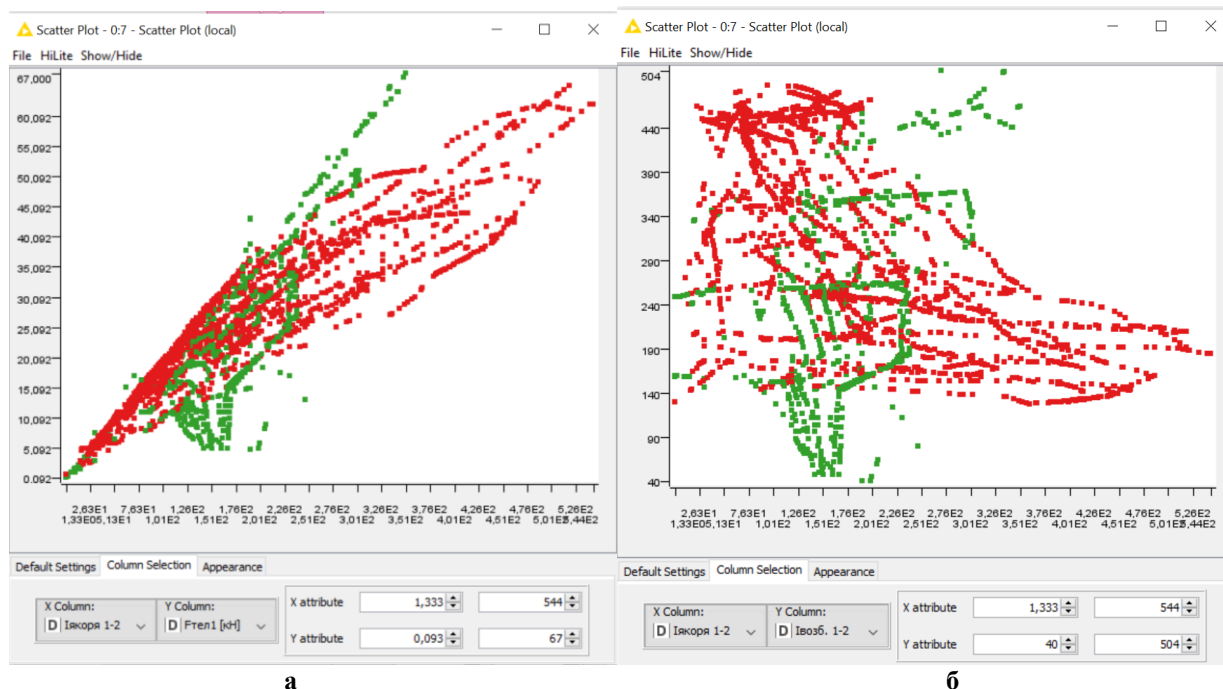


Рисунок 7 – Зависимость токов якоря групп 1-2 ТЭД от силы тяги (а) и зависимость тока якоря от тока возбуждения (б) с двумя кластерами

Из-за сложного закона управления током возбуждения (рис. 7, б) скоростная характеристика может быть представлена в виде двух кластеров.

Скоростная характеристика ТЭД по данным бортовых измерительных систем представлена на рис. 8 (один из кластеров соответствует мягкой характеристике, другой – жесткой).

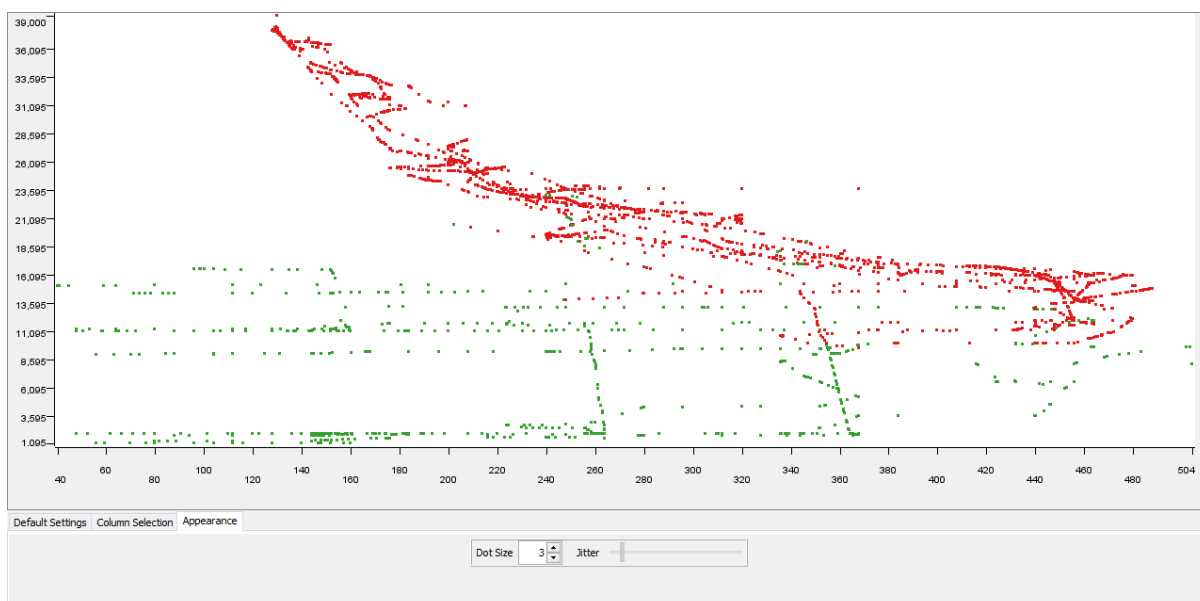


Рисунок 8 – Скоростная характеристика ТЭД с двумя кластерами

Таким образом, кластерный анализ позволяет определить присутствующие точки, соответствующие типовым характеристикам ТЭД и электровозу в целом, а также отклонения и выбросы. Получение однородных групп данных позволяет строить математические (цифровые) модели поведения электроподвижного состава для целей реализации концепции «умный локомотив».

В контексте решаемых задач корреляционный анализ позволяет выявить ненормальные состояния в электрической части электровоза серии 2ЭС6.

Для выполнения корреляционного анализа указанных связей в рабочем поле KNIME создан узел Linear Correlation. Полученная корреляционная матрица представлена на рис. 9.

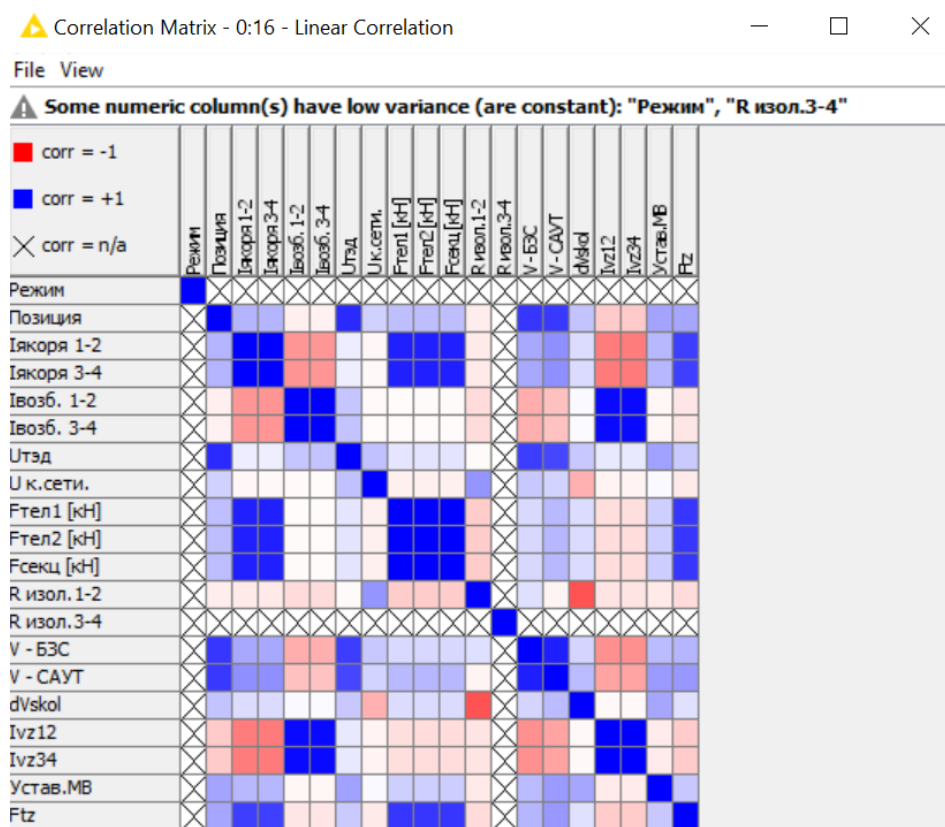


Рисунок 9 – Корреляционная матрица



Получение однородных групп данных позволяет строить математические (цифровые) модели поведения электроподвижного состава для целей реализации концепции «умный локомотив».

### **Выводы**

Представленные результаты эксплуатационной надежности электровозов серии 2ЭС6 приписки эксплуатационного локомотивного депо Омск Западно-Сибирской железной дороги за 2020 г. показали недостаточную надежность ТЭД.

Выполнен сравнительный анализ отечественных и зарубежных исследований в области бортовых систем технического диагностирования электроподвижного состава, обеспечивающих контроль и техническое состояние локомотивов в реальном времени, который имеет ряд недостатков, связанных с определением вероятности наступления отказа электрооборудования и отсутствием сценариев их предотвращения.

Представленные подходы к автоматизированному анализу измерительных данных с бортовых систем электровоза серии 2ЭС6 позволят усовершенствовать существующие системы технического диагностирования электровозов на основе представленных критериев: неравномерная загрузка ТЭД, различие их электромеханических характеристик; отклонения и выбросы (аномалии) измеренных значений электрических величин, связанных с нарушениями в режимах работы электрооборудования, отклонением параметров элементов силовой цепи электровозов от расчетных, в том числе на основе создания математической модели локомотива; превышения фактических эксплуатационных параметров электровозов над расчетными, установленными заводом-изготовителем; корреляционная связь между внешними возмущениями электрических величин и отклонениями в работе, отказами электрооборудования электровоза и пр.

При различных режимах работы электровоза (режим тяги, выбег, торможение, изменение силовой схемы, внешних сил и факторов) происходит динамическое изменение контролируемых МПСУиД параметров, в том числе случайным образом. Анализ данных с бортовых измерительных систем электроподвижного состава с помощью инструментального средства машинного обучения KNIME показали свою эффективность.

Важным этапом анализа данных с бортовых систем локомотива является прогнозирование событий и сценариев, снижающих ресурс электрооборудования или приводящих к отключению действиями защиты, и определение оптимальных воздействий на электровоз для повышения надежности его работы и недопущения создания неприемлемых условий работы и аварийных ситуаций на основе цифровых математических моделей объектов реального времени, что найдет отражение в следующих публикациях авторов.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Garramiola F, Poza J, Madina P, Del Olmo J, Almandoz G. A Review in Fault Diagnosis and Health Assessment for Railway Traction Drives. *Applied Sciences*. 2018; 8(12):2475. <https://doi.org/10.3390/app8122475>
2. Wang, H.; Chai, T.-Y.; Ding, J.-L.; Brown, M. Data Driven Fault Diagnosis and Fault Tolerant Control: Some Advances and Possible New Directions. *Acta Autom. Sin.* 2009, 35, 739–747.
3. Li, C.; Luo, S.; Cole, C.; Spiriyagin, M. An overview: Modern techniques for railway vehicle on-board health monitoring systems. *Veh. Syst. Dyn.* 2017, 55, 1045–1070.
4. Sa, J.; Choi, Y.; Chung, Y.; Kim, H.-Y.; Park, D.; Yoon, S. Replacement Condition Detection of Railway Point Machines Using an Electric Current Sensor. *Sensors* 2017, 17, 263.
5. P. Burgwinkel, F. Rensmann. *Glaser's Annalen*, 2003, № 3/4, pp. 132 – 138.
6. Худояров Д. Л., Тюшев И. А. Развитие систем бортовой диагностики локомотивов // *Инновационный транспорт*. 2018 №. 4. С. 43-48.
7. Розенберг Е.Н., Батраев В.В. О стратегии развития цифровой железной дороги. *Бюллетень ОУС ОАО «РЖД»*. М.: 2018 №1. С. 9 – 27.

8. КАДФЕМ Си-Ай-Эс: [сайт]. – Москва, 2022 - URL: <https://www.cadfem-cis.ru/service/digital-twin/#:~:> text. (дата обращения 15.01.2022). – Текст. Изображение: электронные.
9. Tadviser. Государство. Бизнес. Технологии. Проект «Цифровое депо»: [сайт]. – Москва, 2021 - URL: <https://www.tadviser.ru/index.php>. (дата обращения 12.12.2021). – Текст. Изображение: электронные.
10. Гудок.Ру: [сайт] / учредитель ОАО «Гудок.Ру». – Москва, 1917 – . – Обновляется в течение суток. – URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1348652>. (дата обращения: 12.12.2021). – Текст : электронный.
11. Capolino, G.-A.; Antonino-Daviu, J.A.; Riera-Guasp, M. Modern Diagnostics Techniques for Electrical Machines, Power Electronics, and Drives. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2015, 62, 1738–1745.
12. Головаш А. Н., Куршакова Н. Б., Тиссен Д. Э. Оценка стратегий и направлений по обеспечению безопасности и надежности железнодорожного транспорта //Проблемы современной экономики. 2010. №. 2. С. 378-382.
13. Михин Д. Н. Оценка инновационных методов диагностирования неисправностей электрических цепей локомотивов //Современная наука и молодые учёные. 2020. С. 39-42.
14. KNIME Analytics Platform: программная платформа анализа, интеграции данных и подготовки отчётности с открытым исходным кодом/ разработчик «KNIME». – Швейцария, Цюрих, 2017. – 1 CD-ROM. – (1С: Электронная дистрибуция). – Загл. с титул. экрана.– Электронная программа: электронная.
15. Электровоз грузовой постоянного тока 2ЭС6 с коллекторными тяговыми электродвигателями. Руководство по эксплуатации часть 3. Описание и работа системы управления и измерения 2ЭС6.00.000.000.РЭ2. Екатеринбург: «Уральские локомотивы», 2010. 123 с.

## REFERENCES

1. Garramiola F, Poza J, Madina P, Del Olmo J, Almandoz G. A Review in Fault Diagnosis and Health Assessment for Railway Traction Drives. *Applied Sciences*. 2018; 8(12):2475. <https://doi.org/10.3390/app8122475>
2. Wang, H.; Chai, T.-Y.; Ding, J.-L.; Brown, M. Data Driven Fault Diagnosis and Fault Tolerant Control: Some Advances and Possible New Directions. *Acta Autom. Sin.* 2009, 35, 739–747.
3. Li, C.; Luo, S.; Cole, C.; Spiriyagin, M. An overview: Modern techniques for railway vehicle on-board health monitoring systems. *Veh. Syst. Dyn.* 2017, 55, 1045–1070.
4. Sa, J.; Choi, Y.; Chung, Y.; Kim, H.-Y.; Park, D.; Yoon, S. Replacement Condition Detection of Railway Point Machines Using an Electric Current Sensor. *Sensors* 2017, 17, 263.
5. P. Burgwinkel, F. Rensmann. *Glaser's Annalen*, 2003, № 3/4, pp. 132 – 138.
6. Khudoyarov D. L., Tyushev I. A. Development of systems for on-board diagnostics of locomotives // *Innovative transport*. – 2018. – no. 4. - S. 43-48.
7. Rozenberg E.N., Batraev V.V. On the development strategy of the digital railway. *Bulletin of the OUS of Russian Railways*. - М.: 2018 - No. 1. - P. 9 - 27.
8. CADFEM CSI: [website]. - Moscow, 2022 - URL: <https://www.cadfem-cis.ru/service/digital-twin/#:~:> text. (accessed 15.01.2022). - Text. Image: electronic.
9. Tadviser. State. Business. Technology. Project "Digital Depot": [website]. - Moscow, 2021 - URL: <https://www.tadviser.ru/index.php>. (accessed 12.12.2021). - Text. Image: electronic.
10. Gudok.Ru: [website] / founder of Gudok.Ru OJSC. - Moscow, 1917 -. - Updated throughout the day. – URL: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1348652>. (date of access: 12/12/2021). – Text : electronic.
11. Capolino, G.-A.; Antonino-Daviu, J.A.; Riera-Guasp, M. Modern Diagnostics Techniques for Electrical Machines, Power Electronics, and Drives. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2015, 62, 1738–1745.

12. Golovash A. N., Kurshakova N. B., Thyssen D. E. Evaluation of strategies and directions for ensuring the safety and reliability of railway transport //Problems of the modern economy. 2010. No. 2. pp. 378-382.

13. Mikhin D. N. Evaluation of innovative methods for diagnosing malfunctions of electric circuits of locomotives //Modern science and young scientists. 2020. pp. 39-42.

14. KNIME Analytics Platform: open source software platform for analysis, data integration and reporting/ developer "KNIME". – Switzerland, Zurich, 2017. – 1 CD-ROM. – (1C: Electronic distribution). – Title. with title. the screen.– Electronic program: electronic.

15. Electric freight locomotive DC 2ES6 with collector traction electric motors. Operation manual part 3. Description and operation of the control and measurement system 2ES6.00.000.000.RE2. Yekaterinburg: Ural Locomotives, 2010. 123 p.

#### **Информация об авторах**

*Третьяков Евгений Александрович* – к. т. н., доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, e-mail: eugentr@mail.ru

*Соловьёв Дмитрий Николаевич* – аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, e-mail: dmitriy\_19.81@mail.ru.

#### **Information about the authors**

*Tretyakov Evgeny Alexandrovich* – candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Rolling stock electric railways», Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, e-mail: eugentr@mail.ru

*Solovyov Dmitry Nikolaevich* – Graduate student of the Department «Rolling stock electric railways», Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, e-mail: dmitriy\_19.81@mail.ru.