

Е. Ю. Дульский, П. Ю. Иванов, В. Н. Иванов, К. Е. Пронин

АРХИТЕКТУРА И АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПО ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМ ЦИКЛОГРАММАМ *

Аннотация. Предложены архитектура и алгоритм функционирования автоматизированной системы оценки остаточного ресурса изоляции тягового электродвигателя (ТЭД) НБ-514Е электровозов ЗЭС5К по эксплуатационным циклограммам нагружения. Необходимость разработки такой системы связана с тем, что применяемый на практике периодический контроль сопротивления изоляции и локальный контроль отдельных параметров не позволяют учитывать термическую историю работы двигателя и своевременно оценивать накопленный тепловой износ изоляции. В качестве вычислительного ядра системы используется цифровой двойник теплового состояния, обеспечивающий расчет перегрева в контролируемых и труднодоступных зонах, формирование виртуальных температурных оценок, сравнение расчетных и нормативных значений, а также прогноз остаточного ресурса. В структуру системы включены подсистема сбора эксплуатационных данных, модуль формирования циклограмм, блок сравнения данных и модуль принятия решений. Отличительной особенностью предложенного подхода является использование фактической токовой нагрузки электровоза для периодического уточнения теплового состояния ТЭД и последующего перехода от диагностики перегрева к прогнозной оценке износа изоляции. Результатом работы являются формализованные структура и алгоритм системы, ориентированные на применение в задачах мониторинга, диагностики и поддержки эксплуатационных решений.

Ключевые слова: автоматизированный мониторинг, тяговый электродвигатель, остаточный ресурс изоляции, цифровой двойник теплового состояния, циклограмма нагружения, тепловое старение, конечно-элементное моделирование, принятие управляющих решений, система поддержки эксплуатации.

Для цитирования: Архитектура и алгоритм функционирования автоматизированной системы оценки остаточного ресурса изоляции тягового электродвигателя по эксплуатационным циклограммам / Е. Ю. Дульский, П. Ю. Иванов, В. Н. Иванов, К. Е. Пронин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 96–104. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_96.

Введение

Надежность работы магистральных электровозов в значительной степени зависит от технического состояния ТЭД, прежде всего от состояния их изоляционных систем. Для ТЭД НБ-514Е электровозов серии ЗЭС5К на практике по-прежнему преобладают периодические осмотры, измерения сопротивления изоляции и локальный контроль отдельных параметров. Такой способ контроля позволяет выявлять уже сформировавшиеся отклонения, однако не дает возможности проследить термическую историю нагружения изоляции в межосмотровый период и, как следствие, затрудняет оценку фактического остаточного ресурса по данным реальной эксплуатации [1, 2].

Еще одним ограничением традиционных средств диагностики является то, что они в основном фиксируют превышение пороговых значений, но слабо используют накопленные эксплуатационные данные для анализа деградационных процессов. При таком подходе вне наблюдения остаются внутренние и труднодоступные зоны конструкции, в которых могут формироваться локальные перегревы, непосредственно влияющие на скорость старения изоляции и снижение ее электрической прочности [3, 4].

Развитие микропроцессорных систем управления и регистрации параметров работы электроподвижного состава создало основу для перехода от периодических диагностических процедур к непрерывному мониторингу состояния электрических машин по эксплуатационным данным. В этих условиях на первый план выходят методы, объединяющие измерительную информацию, расчетные модели

* Статья выполнена в рамках научно-исследовательской работы № 1025032600010-0-2.2.6;2.3.1.

и алгоритмы поддержки решений, позволяющие оценивать техническое состояние оборудования непосредственно в процессе эксплуатации [5, 6].

Современные методы мониторинга электрических машин ориентированы не только на выявление скрытых дефектов, но и на анализ тепловых режимов, напрямую связанных с деградацией изоляции. Важной тенденцией является переход от регистрации отдельных отклонений к оценке совокупного воздействия эксплуатационных факторов, определяющих развитие отказов и снижение ресурса машины [7, 8].

Эти тенденции согласуются с развитием цифровых двойников технических объектов, для которых характерно совместное использование сенсорных данных, расчетных моделей и вычислительных сервисов, поддерживающих эксплуатационные решения [9, 10]. Применительно к электрическим машинам наибольший интерес представляют цифровые двойники, позволяющие рассчитывать тепловое состояние, корректировать параметры модели по данным эксплуатации и использовать результаты расчета для задач прогнозного обслуживания и оценки остаточного ресурса [11, 12].

В этой связи актуальной становится разработка автоматизированной системы оценки остаточного ресурса изоляции ТЭД, в которой цифровой двойник теплового состояния используется как действующее вычислительное ядро, а не как статическая информационная схема. Это дает возможность перейти от фиксации отдельных фактов перегрева к оценке накопленного термического износа, вычислению температурных параметров в труднодоступных зонах и выработке решений по допустимым режимам эксплуатации.

Цель работы – разработка архитектуры и алгоритма функционирования автоматизированной системы оценки остаточного ресурса изоляции ТЭД НБ-514Е по эксплуатационным циклограммам нагружения.

Следует отметить, что предлагаемая архитектура и общий принцип алгоритмической организации системы не ограничиваются одним типом тягового электродвигателя и могут быть адаптированы к другим объектам тягового электропривода. В настоящей статье рассмотрение ограничено ТЭД НБ-514Е электровозов ЗЭС5К, поскольку именно для данного двигателя сформирован исходный массив эксплуатационных данных, разработан тепловой прототип и представляется возможной предметная постановка задачи оценки остаточного ресурса изоляции.

Постановка задачи мониторинга

В качестве объекта мониторинга рассматривается ТЭД НБ-514Е, функционирующий в условиях переменных тепловых нагрузок, определяемых режимами ведения поезда. Задача мониторинга состоит в построении автоматизированной системы оценки остаточного ресурса изоляции, работающей в режиме, близком к реальному времени, под которым в настоящей работе понимается обновление оценок теплового состояния и остаточного ресурса с малой вычислительной задержкой относительно поступающего потока эксплуатационных данных. При этом детализированный конечно-элементный расчет не выполняется на каждом временном шаге, а используется для периодического уточнения параметров теплового прототипа.

Вход системы образует поток эксплуатационных данных, формируемый бортовыми средствами регистрации электровоза. В дискретные моменты времени $k = 1, 2, \dots, N$ задается вектор измерений:

$$z_k = \{I_k, U_k, v_k, t_k, T_k^{\text{окр}}\}, \quad (1)$$

где I_k – ток ТЭД, А; U_k – напряжение, В; v_k – скорость движения, км/ч; t_k – метка времени; $T_k^{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, °С.

По последовательности векторов измерений (1) формируется ступенчатая циклограмма нагружения:

$$I(t) = \{(I_i, \Delta t_i)\}_{i=1}^M, \quad (2)$$

где I_i – уровень тока на i -м интервале; Δt_i – длительность интервала;

M – число интервалов в циклограмме.

Параметрическое состояние теплового прототипа двигателя описывается вектором:

$$p_k = \{T, \tau_{\infty}(I), \alpha_{\text{тп}}, R_{\text{ном}}, b_z\}, \quad (3)$$

где T – постоянная времени нагрева; $\tau_{\infty}(I)$ – установившийся перегрев при токе I ;

$\alpha_{\text{тп}}$ – коэффициент теплоотдачи; $R_{\text{ном}}$ – номинальный ресурс изоляции;

b_z – параметр модели старения.

Текущее термическое состояние изоляции задается вектором:

$$x_k = \{\tau_k, T_k^{\text{из}}, q_k\}, \quad (4)$$

где τ_k – поле перегревов в контролируемых зонах; $T_k^{\text{из}}$ – температура изоляции в лимитирующих точках; q_k – накопленный относительный износ ресурса.

На основе вектора измерений (1), сценария нагружения u_k и параметров модели p_{k-1} тепловой прототип формирует расчетное состояние:

$$x_k = F(u_k, p_{k-1}), \quad (5)$$

где F – оператор теплового расчета, включающий определение перегрева по циклограмме с учетом тепловой инерционности и вычисление накопленного износа в рамках принятой модели старения.

На следующем этапе формируется вектор виртуальных измерений температурных параметров:

$$y_k^v = H(x_k), \quad (6)$$

где H – оператор отображения расчетного состояния в пространство параметров, сопоставимых с нормативной оценкой по правилам тяговых расчетов (ПТР).

Параметры теплового прототипа корректируются по критерию наименьшего расхождения между нормативной и расчетной оценками температурного состояния. Для этого используется функционал рассогласования, заданный выражением (7):

$$J(p_k) = \|y_k^{\text{ПТР}} - y_k^{v, \text{ПТР}}\|_W^2 + \lambda \|p_k - p_{k-1}\|^2, \quad (7)$$

где $y_k^{\text{ПТР}}$ – нормативная оценка перегрева; $y_k^{v, \text{ПТР}}$ – виртуальная оценка в сопоставимых контрольных точках; W – матрица весовых коэффициентов; λ – параметр регуляризации, ограничивающий неустойчивость процедуры идентификации.

Степень отклонения текущего состояния от допустимого уровня дополнительно оценивается с помощью диагностического индекса, определяемого выражением:

$$D_k = \max_i \frac{|y_{i,k}^{\text{ПТР}} - y_{i,k}^{v, \text{ПТР}}|}{y_i^{\text{доп}}}, \quad (8)$$

где $y_i^{\text{доп}}$ – допустимое отклонение соответствующего контролируемого параметра.

По результатам расчетного цикла формируется интегральная оценка технического состояния объекта, представленная выражением:

$$S_k = C(D_k, x_k, y_k^v), \quad (9)$$

где S_k – класс состояния и режима эксплуатации объекта; в рамках принятой классификации ей сопоставляются состояния «штатный», «предупредительный», «опасный» и «аварийный».

Оценка остаточного ресурса определяется выражением (10), которое связывает текущее состояние модели с накопленной историей нагружения:

$$R_k^{\text{ост}} = \Psi(\{u_j\}_{j=1}^k, \{x_j\}_{j=1}^k, \{s_j\}_{j=1}^k), \quad (10)$$

где Ψ – оператор прогнозирования остаточного ресурса по текущему состоянию модели и истории нагружения.

Итоговое управляющее решение формируется на основе следующего правила:

$$Y_k = \begin{cases} 1, & R_k^{\text{ост}} \leq R_{\text{крит}} \text{ или } D_k > D_{\text{доп}}, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (11)$$

где $Y_k = 1$ соответствует необходимости ограничения режима эксплуатации или проведения внеочередного обследования объекта.

Архитектура автоматизированной системы мониторинга

Предлагаемая система мониторинга имеет модульную структуру и включает периферийный, облачный и вычислительный контуры, совместно образующие единый киберфизический комплекс. Исходные данные о режимах работы ТЭД поступают от бортовых систем регистрации электровоза ЗЭС5К, включая диагностический комплекс и систему управления движением, в виде потока значений

тока, напряжения, скорости, температуры окружающей среды и временных меток. На уровне микроконтроллерного блока выполняются первичная фильтрация, синхронизация измерительных каналов, нормализация данных и формирование ступенчатых циклограмм нагружения. После этого обработанная информация по беспроводному каналу связи передается на облачный сервер, где осуществляется ее накопление, структурирование и подготовка для расчетных и визуализационных модулей.

Ключевым элементом системы является вычислительное ядро, реализующее цифровой двойник теплового состояния ТЭД [11, 12]. Оно включает три взаимосвязанных компонента.

Первым элементом является цифровой двойник теплового состояния ТЭД, который представляет собой расчетную модель, в которой воспроизведены конструктивная схема двигателя, теплофизические характеристики материалов и граничные условия теплообмена. По данным циклограмм нагружения модель рассчитывает температурное поле и перегрев изоляции, а ее параметры затем корректируются по результатам сопоставления расчетных и нормативных оценок. Под цифровым двойником теплового состояния ТЭД в настоящей работе понимается совокупность двух взаимосвязанных моделей: детализированной конечно-элементной модели, используемой для предварительного расчета температурного поля и идентификации параметров, и редуцированного теплового прототипа, предназначенного для оперативного обновления температурных оценок по эксплуатационным циклограммам. Конечно-элементная модель реализуется в специализированной CAE-среде теплового анализа, при этом расчетная сетка формируется с локальным сгущением в термически напряженных зонах – в области пазовой изоляции, лобовых частей обмоток и прилегающих участков активных частей. Детализированный расчет используется не в непрерывном режиме, а как периодическая процедура уточнения параметров прототипа. Оперативный контур мониторинга работает на основе редуцированной модели, что позволяет обновлять оценки теплового состояния и остаточного ресурса в темпе поступления эксплуатационных данных.

Виртуальная система оценки температур представляет собой модельный слой, предназначенный для вычисления температурных параметров в выбранных точках конструкции, в том числе в зонах, где установка физических датчиков затруднена или невозможна, например, в пазовой изоляции якоря, лобовых частях обмоток и внутренних слоях изоляционных пакетов. Это позволяет расширить наблюдаемое пространство объекта без пропорционального наращивания числа измерительных каналов.

Модуль визуализации и поддержки принятия решений предназначен для представления результатов мониторинга в форме, пригодной для инженерной интерпретации. В нем отображаются температурные поля, временные тренды перегрева, распределения температуры по активным частям двигателя и интерфейсные представления, используемые оператором при анализе состояния объекта.

Блок сравнения данных (БСД) выполняет сопоставление виртуальных измерений, полученных от цифрового двойника, с нормативной оценкой перегрева по ПТР. Если выявленные отклонения превышают установленные пороги, система формирует диагностическое сообщение, указывающее на возможное изменение теплового состояния изоляции, нарушение условий охлаждения либо необходимость корректировки параметров модели.

Модуль принятия решений (МПР) объединяет информацию о текущем термическом состоянии, накопленном износе и прогнозе остаточного ресурса. На этой основе формируются выводы о классе технического состояния объекта, рекомендации по ограничению режима эксплуатации, а также решения о необходимости внеочередного технического обслуживания или перевода двигателя в особый режим наблюдения.

Предлагаемый принцип построения соответствует современному направлению развития гибридных систем мониторинга технических объектов, в которых первичная фильтрация и часть вычислений выполняются на периферии, тогда как функции накопления данных, расширенной аналитики и управления моделями переносятся в облачный контур [9, 10].

Для практической реализации предложенной архитектуры необходимо формализовать последовательность вычислительных процедур, связывающих поток эксплуатационных данных с диагностическими и управляющими выходами системы. Если структурная схема отражает состав модулей и связи между ними, то алгоритм определяет порядок преобразования измерений, справочной информации и модельных параметров в оценки теплового состояния, износа и остаточного ресурса изоляции (рис. 1).

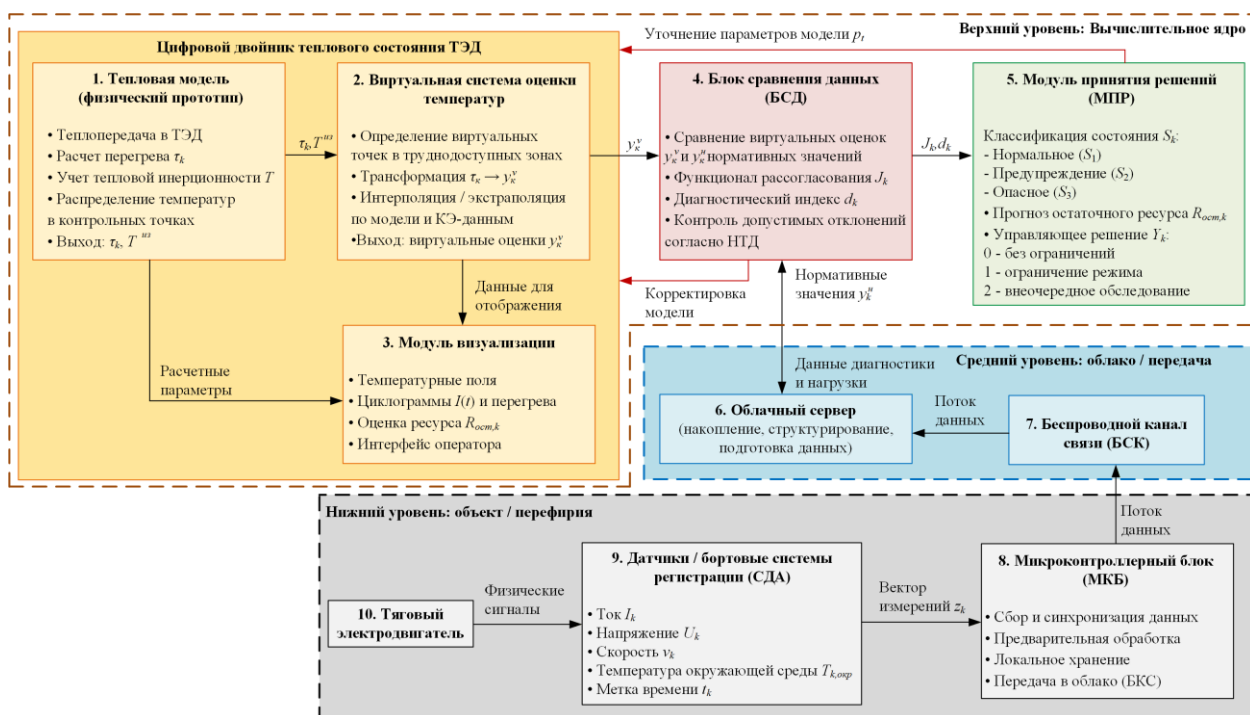


Рис. 1. Архитектура автоматизированной системы оценки остаточного ресурса изоляции ТЭД на основе цифрового двойника теплового состояния

Алгоритм функционирования автоматизированной системы

Работа системы организована как последовательность повторяющихся вычислительных шагов, на каждом из которых по текущим эксплуатационным данным уточняются оценки теплового состояния, диагностического индекса и остаточного ресурса изоляции. Упрощенная схема алгоритма приведена на рис. 2.

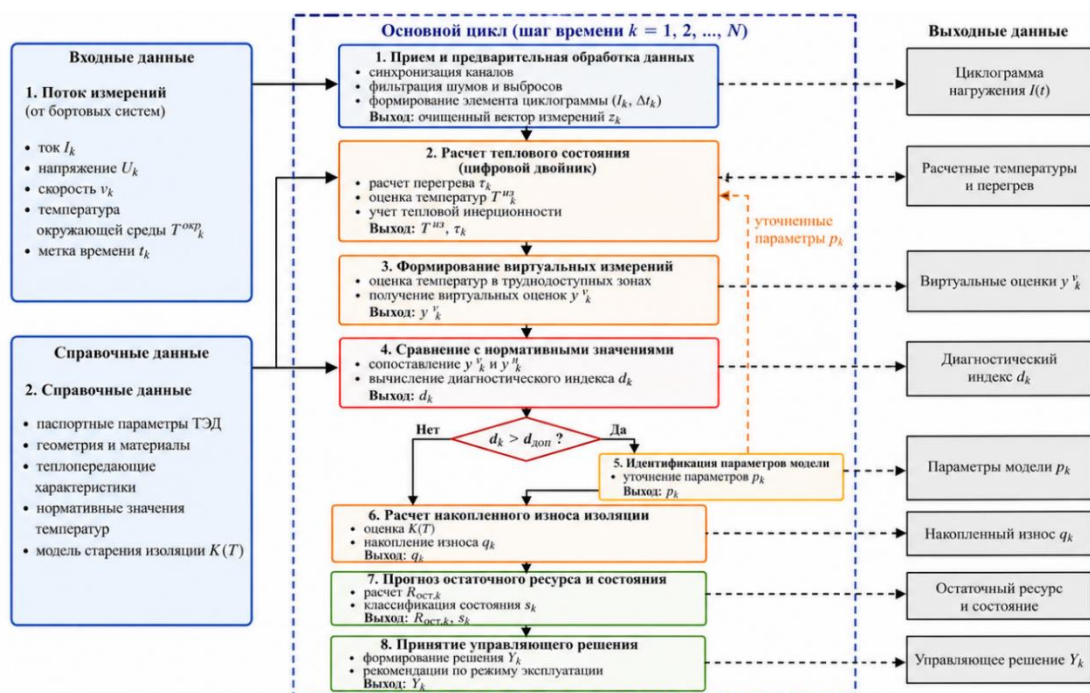


Рис. 2. Алгоритм функционирования автоматизированной системы оценки остаточного ресурса изоляции ТЭД по эксплуатационным циклограммам

На каждом шаге времени k выполняется последовательность взаимосвязанных процедур, в результате которых исходные эксплуатационные данные преобразуются в диагностические показатели, оценку остаточного ресурса и управляющее решение.

На первом этапе выполняются прием и предварительная обработка эксплуатационных данных z_k , включающие фильтрацию шумов, устранение выбросов и синхронизацию каналов измерений. По результатам обработки формируется текущий элемент циклограммы нагружения $(I_k, \Delta t_k)$, который включается в общую структуру сценария эксплуатации.

На втором этапе по обновленной циклограмме рассчитывается тепловое состояние двигателя с использованием оператора F . При этом учитывается тепловая инерционность системы, благодаря чему переход от мгновенных значений тока к оценке перегрева τ_k и температур $T_k^{\text{из}}$ в лимитирующих зонах выполняется без допущения об их мгновенном изменении. Расчет проводится в рамках цифровой двойника теплового состояния, параметры которого соответствуют текущей идентифицированной модели.

На третьем этапе из результатов теплового расчета формируется вектор виртуальных измерений y_k^v . В него включаются температурные оценки для контрольных точек, по которым можно сопоставить расчетное состояние двигателя с нормативной картиной нагрева. Такой подход позволяет использовать модель не только для расчета перегрева, но и для восстановления параметров в зонах, где прямое измерение затруднено.

На четвертом этапе расчетные значения сопоставляются с нормативными данными с помощью блока сравнения. По выражению (12) определяется функционал рассогласования

$$J_k = \sum_{i=1}^m w_i (y_{k,i}^v - y_{k,i}^h)^2, \quad (12)$$

после чего вычисляется диагностический индекс d_k , отражающий величину отклонения текущего состояния от допустимого режима работы. Если значение индекса выходит за установленный предел, система переходит к процедуре уточнения параметров модели.

На пятом этапе выполняется идентификация параметров теплового прототипа p_k . Ее назначение состоит в согласовании расчетной схемы с фактическими условиями эксплуатации, зафиксированными в текущем наборе измерений. Тем самым обеспечивается корректировка модели по реальным данным, а сам цифровой двойник сохраняет работоспособность при изменении режимов нагружения и условий теплоотвода.

На шестом этапе рассчитывается накопленный износ изоляции

$$q_k = q_{k-1} + K(T_k) \cdot \Delta t_k, \quad (13)$$

где q_k – накопленный относительный износ ресурса.

По текущей температуре определяется коэффициент ускорения старения $K(T)$, после чего по выражению (13) выполняется интегрирование износа по времени.

На седьмом этапе с использованием оператора Ψ , учитывающего текущую динамику нагружения и параметры модели, выполняется прогноз остаточного ресурса изоляции

$$R_k^{\text{ост}} = \Psi(T_k^{\text{из}}, q_k, p_k). \quad (14)$$

В результате по выражению (14) формируется оценка остаточного ресурса, после чего определяется класс технического состояния объекта S_k .

На заключительном этапе формируется управляющее решение Y_k , определяющее необходимость корректировки режима эксплуатации. В зависимости от значения диагностического индекса и остаточного ресурса система может рекомендовать ограничение токовой нагрузки, изменение режима ведения поезда либо проведение внеочередного технического обследования.

Таким образом, алгоритм функционирования системы реализует замкнутый цикл «измерение – моделирование – идентификация – прогноз – управление», в рамках которого цифровой двойник выступает не вспомогательной расчетной надстройкой, а центральным элементом автоматизированного мониторинга и поддержки эксплуатационных решений.

Выводы

Разработаны архитектура и алгоритм функционирования автоматизированной системы оценки остаточного ресурса изоляции ТЭД НБ-514Е электровазозов ЗЭС5К по эксплуатационным циклограммам нагружения.

Научная новизна состоит в том, что цифровой двойник теплового состояния ТЭД рассматривается не как автономная расчетная модель, а как адаптивное вычислительное ядро автоматизированной системы мониторинга, объединяющее расчет перегрева, формирование виртуальных температурных оценок, диагностику и прогноз остаточного ресурса изоляции.

Предложенный подход позволяет перейти от контроля отдельных параметров к непрерывной оценке теплового состояния изоляционной системы по данным реальной эксплуатации. В отличие от традиционных схем диагностики он опирается на эксплуатационные циклограммы, учет тепловой инерционности и расчет параметров в зонах, недоступных для прямого измерения.

Практическая значимость результатов связана с возможностью интеграции предложенной системы в существующие контуры регистрации и обработки данных электровозов, что создает основу для более раннего выявления неблагоприятных тепловых режимов, обоснованного ограничения нагрузки и перехода к прогнозируемому сопровождению технического состояния ТЭД.

Дальнейшее развитие работы целесообразно связывать с уточнением параметров модели по эксплуатационным данным, расширением состава учитываемых факторов деградации и разработкой бортовых средств реализации вычислительного контура в режиме, близком к реальному времени.

Список литературы

- 1 Система мониторинга состояния изоляции / Е. Ю. Дульский, П. Ю. Иванов, А. А. Хамнаева [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 2021. – № 3. – С. 50–52. – EDN EGIKNL.
- 2 **Иванов, П. Ю.** Состояние вопроса надёжности и долговечности изоляции асинхронных вспомогательных машин / П. Ю. Иванов, Е. Ю. Дульский, А. М. Худонов // Известия Транссиба. – 2015. – № 2(22). – С. 2–6. – EDN UDYIBX.
- 3 **Иванов, П. Ю.** Современные направления развития систем мониторинга состояния изоляции асинхронных электродвигателей / П. Ю. Иванов, Е. Ю. Дульский, А. М. Худонов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – Т. 20, № 12 (119). – С. 146–154. – DOI 10.21285/1814-3520-2016-12-146-154.
- 4 **Иванов, П. Ю.** Локальный перегрев изоляции асинхронных вспомогательных машин электровозов в переходных режимах работы / П. Ю. Иванов, Е. Ю. Дульский, А. М. Худонов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – Т. 20, № 11 (118). – С. 194–200. – DOI 10.21285/1814-3520-2016-11-194-200.
- 5 **Аболмасов, А. А.** Совершенствование методов диагностирования электрических машин локомотивов по данным микропроцессорных систем управления / А. А. Аболмасов, Д. О. Лисин, В. А. Мельников // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – № 3 (63). – С. 69–75. – DOI 10.26731/1813-9108.2019.3(63).69-75.
- 6 **Андрончев, И. К.** Совершенствование трактовки диагностической информации при оценке технического состояния тяговых двигателей электроподвижного состава / И. К. Андрончев, И. П. Гордеев, А. С. Тычков, П. В. Шепелин // Вестник транспорта Поволжья. – 2020. – № 3 (81). – С. 7–13.
- 7 **Завидей, В. И.** Современные методы мониторинга и технического диагностирования электрических машин / В. И. Завидей, И. В. Путилова, В. А. Старшинов // Экспозиция Нефть Газ.

References

- 1 Insulation condition monitoring system / E. Yu. Dulsky, P. Yu. Ivanov, A. A. Khamnaeva [et al.] // Railway transport. – 2021. – No. 3. – P. 50–52. – EDN EGIKNL.
- 2 **Ivanov, P. Yu.** State of the art of reliability and durability of insulation of asynchronous auxiliary machines / P. Yu. Ivanov, E. Yu. Dulsky, A. M. Khudonogov // Journal of Transsib Railway Studies. – 2015. – No. 2 (22). – P. 2–6. – EDN UDYIBX.
- 3 **Ivanov, P. Yu.** Modern directions of development of systems for monitoring the insulation condition of asynchronous electric motors / P. Yu. Ivanov, E. Yu. Dulsky, A. M. Khudonogov // Bulletin of Irkutsk State Technical University. – 2016. – Vol. 20, No. 12 (119). – P. 146–154. – DOI 10.21285/1814-3520-2016-12-146-154.
- 4 **Ivanov, P. Yu.** Local overheating of insulation of asynchronous auxiliary machines of electric locomotives in transient operating modes / P. Yu. Ivanov, E. Yu. Dulsky, A. M. Khudonogov // Bulletin of Irkutsk State Technical University. – 2016. – Vol. 20, No. 11 (118). – P. 194–200. – DOI 10.21285/1814-3520-2016-11-194-200.
- 5 **Abolmasov, A. A.** Improving the methods for diagnosing locomotive electric machines based on data from microprocessor control systems / A. A. Abolmasov, D. O. Lisin, V. A. Melnikov // Modern technologies. Systems analysis. Modeling. – 2019. – No. 3 (63). – P. 69–75. – DOI 10.26731/1813-9108.2019.3 (63). 69-75.
- 6 **Andronchev, I. K.** Improving the interpretation of diagnostic information when assessing the technical condition of traction motors of electric rolling stock / I. K. Andronchev, I. P. Gordeev, A. S. Tychkov, P. V. Shepelin // Vestnik transporta Povolzhya. – 2020. – No. 3 (81). – P. 7–13.
- 7 **Zavidey, V. I.** Modern methods of monitoring and technical diagnostics of electrical machines / V. I. Zavidey, I. V. Putilova, V. A. Starshinov //

– 2023. – № 4. – С. 38–44. – DOI 10.24412/2076-6785-2023-4-38-44.

8 **Харламов, В. В.** Тестирование межвитковой изоляции якорной обмотки тягового электродвигателя по методу волнового отклика / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, И. В. Шестаков // Известия Транссиба. – 2015. – № 2 (22). – С. 39–45.

9 Digital Twin in Industry : State-of-the-Art / F. Tao, H. Zhang, A. Liu, A. Y. C. Nee // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2019. – Vol. 15, No. 4. – P. 2405–2415. – DOI 10.1109/TII.2018.2873186.

10 Digital Twin : Enabling Technologies, Challenges and Open Research / A. Fuller, Z. Fan, C. Day, C. Barlow // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 108952–108971. – DOI 10.1109/ACCESS.2020.2998358.

11 **Falekas, G.** Digital Twin in Electrical Machine Control and Predictive Maintenance : State-of-the-Art and Future Prospects / G. Falekas, A. Karlis // Energies. – 2021. – Vol. 14, No. 18. – P. 5933. – DOI 10.3390/en14185933.

12 Condition Monitoring of Industrial Electric Machines : State of the Art and Future Challenges / S. B. Lee, G. C. Stone, J. Antonino-Daviu [et al.] // IEEE Industrial Electronics Magazine. – 2020. – Vol. 14, No. 4. – P. 158–167. – DOI 10.1109/MIE.2020.3016138.

Oil Gas Expo. – 2023. – No. 4. – P. 38–44. – DOI 10.24412/2076-6785-2023-4-38-44.

8 **Kharlamov, V. V.** Testing of interturn insulation of the armature winding of a traction electric motor using the wave response method / V. V. Kharlamov, P. K. Shkodun, I. V. Shestakov // Journal of Transsib Railway Studies. – 2015. – No. 2 (22). – P. 39–45.

9 Digital Twin in Industry : State-of-the-Art / F. Tao, H. Zhang, A. Liu, A. Y. C. Nee // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2019. – Vol. 15, No. 4. – P. 2405–2415. – DOI 10.1109/TII.2018.2873186.

10 Digital Twin : Enabling Technologies, Challenges and Open Research / A. Fuller, Z. Fan, C. Day, C. Barlow // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 108952–108971. – DOI 10.1109/ACCESS.2020.2998358.

11 **Falekas, G.** Digital Twin in Electrical Machine Control and Predictive Maintenance : State-of-the-Art and Future Prospects / G. Falekas, A. Karlis // Energies. – 2021. – Vol. 14, No. 18. – P. 5933. – DOI 10.3390/en14185933.

12 Condition Monitoring of Industrial Electric Machines : State of the Art and Future Challenges / S. B. Lee, G. C. Stone, J. Antonino-Daviu [et al.] // IEEE Industrial Electronics Magazine. – 2020. – Vol. 14, No. 4. – P. 158–167. – DOI 10.1109/MIE.2020.3016138.

E. Yu. Dulsky, P. Yu. Ivanov, V. N. Ivanov, K. E. Pronin

ARCHITECTURE AND FUNCTIONING ALGORITHM OF THE AUTOMATED SYSTEM FOR ASSESSING THE RESIDUAL RESOURCE OF TRACTION MOTOR INSULATION BASED ON OPERATIONAL CYCLOGRAMS

Abstract. This article proposes the architecture and operating algorithm of an automated system for assessing the residual life of NB-514E traction electric motor (TEM) insulation on 3ES5K electric locomotives using operational load cyclograms. The need for such a system arises from the fact that the periodic insulation resistance monitoring and local monitoring of individual parameters used in practice do not allow for the consideration of the motor's thermal history and the timely assessment of accumulated thermal deterioration of the insulation. The system's computing core utilizes a digital twin of the thermal state, enabling the calculation of overheating in controlled and hard-to-reach areas, the generation of virtual temperature estimates, the comparison of calculated and standard values, and the prediction of the remaining life. The system structure includes an operational data collection subsystem, a cyclogram generation module, a data comparison unit, and a decision-making module. A distinctive feature of the proposed approach is the use of the locomotive's actual current load to periodically update the TEM's thermal state and the subsequent transition from overheating diagnostics to a predictive assessment of insulation deterioration. The result of the work is a formalized structure and algorithm of the system, oriented towards application in tasks of monitoring, diagnostics and support of operational decisions.

Keywords: automated monitoring, traction electric motor, residual insulation life, digital twin of thermal state, load cyclogram, thermal aging, finite element modeling, control decision-making, operational support system.

For citation: Architecture and functioning algorithm of the automated system for assessing the residual life of traction motor insulation based on operational cyclograms / E. Yu. Dulsky,

P. Yu. Ivanov, V. N. Ivanov, K. E. Pronin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 2. – P. 96–104. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_2_96.

Сведения об авторах

Дульский Евгений Юрьевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС),
кафедра «Электроэнергетика»,
доктор технических наук, доцент,
e-mail: Dulskiy_eu@irgups.ru

Иванов Павел Юрьевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС),
кафедра «Транспортное машиностроение»,
доктор технических наук, доцент,
e-mail: Ivanov_PYU@irgups.ru

Иванов Владимир Николаевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС),
кафедра «Транспортное машиностроение»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: Ivanov_vn@irgups.ru

Пронин Константин Евгеньевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС),
кафедра «Транспортное машиностроение»,
аспирант,
e-mail: pronin_ke@irgups.ru

Information about the authors

Dulsky Evgeny Yuryevich

Irkutsk State Transport University (IrGUPS),
Chair “Electrical Power Engineering”,
Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: Dulskiy_eu@irgups.ru

Ivanov Pavel Yuryevich

Irkutsk State Transport University (IrGUPS),
Chair “Transport Engineering”,
Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: Ivanov_PYU@irgups.ru

Ivanov Vladimir Nikolaevich

Irkutsk State Transport University (IrGUPS),
Chair “Transport Engineering”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: Ivanov_vn@irgups.ru

Pronin Konstantin Evgenievich

Irkutsk State Transport University (IrGUPS),
Chair “Transport Engineering”,
Postgraduate Student,
e-mail: pronin_ke@irgups.ru