ТРАНСПОРТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.331 : 621.311.4 + 06 DOI 10.46973/0201–727X_2023_1_264

В. В. Доманский

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МЕТОД РАСЧЕТА РИСКА ОТКАЗА ПРИ ДРЕЙФЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЯГОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Аннотация. Предложен метод управления мониторингом и техническим обслуживанием устройств электроснабжения тяги поездов. Метод реализует комплексный подход к повышению эффективности эксплуатации устройств электроснабжения с возможностью прогноза вероятности состояния силового трансформатора (работоспособность или восстановление). Реализация метода позволит принимать обоснованные решения по использованию полного ресурса трансформатора без угрозы риска отказа или преждевременного вывода из эксплуатации.

Ключевые слова: эффективность эксплуатации, управление, техническое обслуживание, электрооборудование, мониторинг, марковский процесс, риск отказа.

Для цитирования: Доманский, В. В. Информационные технологии и метод расчета риска отказа при дрейфе технического состояния тягового трансформатора / В. В. Доманский // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1. – С. 264–273. – DOI 10.46973/0201–727X_2023_1_264.

Введение

В структуре затрат железнодорожного транспорта расходы на электроэнергию на тягу поездов занимают значительную часть. Наиболее удобным показателем с точки зрения учета и анализа расхода энергии и эффективности электрической тяги является удельный расход электроэнергии на тягу поездов. Важным представляется исследование факторов, влияющих на данный показатель, с целью поиска путей и средств их оптимизации. К таким факторам следует отнести технические показатели эксплуатационной работы, качественные характеристики использования подвижного состава, непроизводственные затраты, технологические потери, которые на сегодня в системе тягового электроснабжения составляют 107,3 кВтч на 10 тыс. ткм брутто. Не менее важным является также анализ устойчивости электроснабжения, где в качестве определяющего фактора можно выделить удельное время перерыва электроснабжения тяги поездов, среднегодовое значение которого, по данным исследований, составляет на 100 км развернутой длины 1,08 ч. Данные статистического учета числовых характеристик основных объектов системы электроснабжения тяги поездов приведены в табл. 1 [1].

Таблица 1

Количественные значения основных элементов системы электроснабжения

Показатель	Значение			
Общее число тяговых подстанций	1401			
Число тяговых подстанций переменного тока	463			
Количество понижающих и тяговых трансформаторов	4668			
Срок службы трансформаторов	> 40 лет	30–40 лет	20–30 лет	< 20 лет
	5,2 %	25,4 %	50,5 %	19,4 %

По нормативным документам срок службы трансформаторов составляет не менее 25 лет, а через 12 лет требуется капитальный ремонт. В среднем ежегодно происходит 15–20 повреждений тяговых трансформаторов. Большинство трансформаторов для подстанций переменного тока разрабатывались по общепромышленному ГОСТу и не обеспечивают необходимой динамической устойчивости в режиме работы тяговой сети (величина и количество коротких замыканий). Это является объективной причиной их повреждений на подстанциях близких к центрам генерирования мощности [2]. Управление устройствами тягового электроснабжения требует на современном этапе разработки информационных технологий, позволяющих контролировать множество факторов, основными категориями кото-

рых являются электрические (напряжение, мощность, токи), механические (вибрация, движение), физические (температура, давление жидкостей, состав газов) и др. Вместе с тем не установлено оптимальное взаимодействие между различными подсистемами управления технологическими процессами объектов тягового электроснабжения. В процессах сервисного обслуживания оборудования не в полном объеме используется статистическая информация о результатах проведения аварийных работ, отказах оборудования, дефектах и т.д. Как правило, оперативная информация о состоянии оборудования фиксируется. Однако нет системности при анализе возникновения неисправностей и качества выполнения ремонтов. Низкая оперативность принятия решений при изменениях рабочих параметров режимов тяги и отсутствие системного анализа выполненных работ на силовом оборудовании тягового электроснабжения требуют поиска новых технологических подходов, ориентированных на эффективную эксплуатацию электрооборудования и ресурсосбережение в условиях значительного износа его ресурса. В процессе перехода к перспективным способам обслуживания устройств электроснабжения тяги поездов по состоянию на базе комплексной диагностики электрооборудования необходимо использование информационных технологий. В настоящее время управление техническим состоянием электрооборудования дистанций электроснабжения железных дорог России выполняется в соответствии с нормативными документами [2]. Нормативная база определяет поддержание необходимого уровня надежности электрооборудования в процессе эксплуатации. Эксплуатация оборудования при использовании системы планово-предупредительных ремонтов без учета действительной потребности в их выполнении неэффективна и приводит к неоправданным затратам. Техническое состояние электрооборудования в момент проведения работ может и не требовать обслуживания и замены, если не достигнута критическая степень его износа. Вместе с тем старение устройств тягового электроснабжения требует оценки уровня риска его эксплуатации за пределами установленного срока службы. Рост повреждаемости после 30 лет эксплуатации свидетельствует о несовершенстве системы мониторинга, диагностики и технического обслуживания трансформаторов [1, 3].

Результаты обследований трансформаторов мощностью от 6,3 до 1000 МВт в разных странах и климатических зонах, показывают, что 70 % трансформаторов имеют наработку более 25 лет, а 30 % – требуют повышенного контроля [4]. Необходимость ресурсосбережения изменяет вектор развития технического обслуживания устройств электроснабжения (УЭ). Выполнение этого условия возможно при качественном управлении обслуживанием оборудования и комплексном применении информационных технологий и методов диагностики УЭ [5]. Многими компаниями используется японская система технического обслуживания оборудования Total Productive Maintenance, которая обеспечивает эффективность эксплуатации оборудования на протяжении всего жизненного цикла. Перспективны и системы технологий обслуживания и ремонта на основе стандартов серии ISO 9000.

Однако специфика работы железных дорог требует своих технологий эксплуатации на базе энерго- и ресурсосбережения с применением информационных систем управления технологическим процессом обслуживания устройств тягового электроснабжения [6]. Для повышения эффективности эксплуатации силового электрооборудования необходимо внедрение современных систем технического обслуживания по состоянию и решение следующих задач:

– модернизировать информационную систему управления с учетом комплекса организационных, технических и финансовых факторов;

– повысить эффективность эксплуатации силовых трансформаторов с учетом изменения основных параметров тяговой сети, в том числе нагрузки, требуемой мощности, графика движения, температуры окружающей среды и т. д.

Решение указанных задач способствует повышению надежности системы тягового электроснабжения, эффективности эксплуатации оборудования и снижению затрат на техническое обслуживание [3, 5, 7].

Для формализации задачи синтеза структуры сложных систем управления техническим обслуживанием силового оборудования тяговых подстанций рассмотрим множества: F – функционал системы (множество выполняемых операций), $f \subset F$; P – методы и алгоритмы управления, определяющие структуру системы, $p \subset P$; R – взаимосвязанная совокупность процессов (элементов) системы. Тогда получаем оптимизационную задачу, в которой ищется экстремум целевой функции S на пересечении указанных множеств:

$$S\{[f \subset F(p \subset P)]R[m \subset M]\} \rightarrow \text{extr}. \quad (1)$$

Подобными элементами сложных систем технического обслуживания (ТО) и ремонта (Р) силового электрооборудования могут быть средства информационных технологий и комплексного диагностирования для регистрации и обработки информации в аналитических центрах управления [5–7].

В результате решения указанных выше задач достигается повышение эффективности управления и работы автоматизированных рабочих мест энергодиспетчеров, осуществляются классификация, регистрация, хранение, обработка информации о техническом состоянии электрооборудования, производятся анализ причин отказов, оценка стоимости устранения и формирование графиков технического обслуживания и ремонтов, выполняются обоснование и учет планируемых расходов на ремонт и техническое обслуживание, а также формирование заказов на запасные части и материалы.

Задача оснащения электрооборудованием объектов тягового электроснабжения требует комплексного подхода, предполагающего взаимосвязанное подключение подсистем управления, слежения, диагностики и контроля с целью автоматизации объекта в целом. Это обеспечит минимизацию удельных расходов на один информационный сигнал, что обусловливает экономическую целесообразность подхода.

Целью исследования является разработка методов и способов повышения эффективности эксплуатации силового электрооборудования тяговых подстанций путем модернизации системы технического обслуживания и ремонта на базе информационных технологий.

Для достижения поставленной цели необходимо:

– разработать структуру системы управления техническим обслуживанием и ремонтом силового электрооборудования тягового электроснабжения на базе информационных технологий;

– разработать метод расчета риска отказа тягового трансформатора при дрейфе его технического состояния.

1 Структура системы управления ТО и Р силового электрооборудования тягового электроснабжения

На основании анализа существующих систем технического обслуживания и ремонта силового оборудования энергетических систем и электротяговых сетей железных дорог разработана структура управления мониторингом и техническим обслуживанием силового оборудования тягового электроснабжения (рис. 1).

Рис. 1. Схема управления ТО и Р электрооборудования

Предлагаемый подход к решению задачи повышения эффективности эксплуатации электрооборудования тяговых подстанций не рассматривался в нормативно-технической документации и инструкциях обслуживания трансформаторов, выключателей и другого силового электрооборудования [1, 2].

Информационная система управления процессами ТО и Р должна включать в себя комплекс организационных, технических и финансовых мероприятий, мониторинг и диагностику оборудования, и автоматизацию управления процессами эксплуатации. В качестве показателей управления ТО и Р электрооборудования тягового электроснабжения используются следующие параметры: интервалы времени между операциями ТО и Р, диагностирования, локализации и ликвидации отказов, а также оценка остаточного ресурса и погрешности измерения мощности, числа пусков и др. Пункты формирования выходных сигналов систем контроля и диагностики состояния элементов оборудования определим, как информационно-диагностические точки (ИДТ). Для нахождения показателей их надежности используется принцип функционирования восстанавливаемой сложной системы [7].

Структура устройства электрооборудования представляется в виде дерева, элементы которого являются функциональными подсистемами, рассматриваемыми во взаимосвязи и образующими множество S, $|S| = N$. Только работоспособность всех N подсистем одновременно обеспечивает нахождение электрооборудование в рабочем состоянии. Допустимое время исправной работы N-го составляющего элемента $T_{\text{Доп}N}$ распределено по закону $Z_N(t) = P(t < T_{\text{Доп}N})$ с интенсивностью λ_N, а время восстановления τ_N – по закону $B_N(t) = P(t < \tau_N)$ с интенсивностью μ_N. Количество ИДТ определяет размерность рассматриваемой функциональной модели.

Обозначим n – число диагностируемых по ИДТ составляющих элементов, $n < N$; суммарные интенсивности отказов:

- j-го элемента – λ_j, $\lambda_j = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i$, $j = \overline{1, N}$;
- электрооборудования – λ_0, $\lambda_0 = \sum_{j}^{N} \lambda_j$.

Тогда глубина диагностирования d определяется отношением:

$$d = \frac{\lambda_j}{\lambda_0}, \ j = \overline{1, N}. \tag{2}$$

Работоспособность электрооборудования определяется видами и степенью неисправностей и дефектов, входящих в него элементов. Дефекты по степени риска (СР) вероятности наступления отказа $\overline{P(t)} = 1 - Z_N(t)$ можно разделить на следующие категории: не опасные для функционирования электрооборудования (СР-1); дефекты относительной опасности (СР-2); опасные для функционирования (СР-3). Соответственно для каждого уровня опасности можно ввести вероятности P_i пребывания составляющего элемента в i-м состоянии, $i = 1, 2, 3$. Обозначив P_N – вероятность безотказной работы элемента N, получим формулу для определения коэффициента степени риска отказа:

$$K_{\text{СР}} = 1 - \frac{P_N}{P_i}. \tag{3}$$

Определяющие показатели (ОП), от которых зависит работоспособность электрооборудования, формируют вектор $\overline{X}(t)$, компонентами которого являются независимые составляющие частные ОП каждого элемента $X_d(t)$, $d = \overline{1,N}$. Принадлежность допустимому множеству изменения вектора ОП $G = \left\| \overline{G_1, G_d} \right\|$ задает условие работоспособности оборудования: $\overline{X}(t) \in \overline{G}$. Если хотя бы для одного компонента $X_d(t)$ вектора $\overline{X}(t)$ частного ОП выполняется условие $\overline{X_d}(t) \notin G_d$, то электрооборудование не считается работоспособным. Допустимое среднее значение ОП N-го составляющего элемента, $d \neq N$, определяет пороговое значение осуществления перехода работоспособного состояния в неработоспособное:

$$X_{d_{\text{доп}}} = X_0(1 + K), \tag{4}$$

при этом начальное состояние работоспособности электроснабжения характеризуется случайной величиной X_0, которая при небольших объемах выборки подчиняется нормальному распределению; допустимое значение нахождения ОП в пределах области N_d определяется коэффициентом *K*. Нахождение за пределами допустимой области N_d любого ОП является критерием отказа электрооборудования. Тогда соответственно вероятность пребывания ОП в N_d в момент времени t $(t > t_0)$ определяет вероятность безотказной работы каждого элемента из множества *N*. При этом должны соблюдаться условия работоспособности элемента в начальный момент времени t_0 и равенства начального состояния работоспособности ОП значению X_0. Следует отметить, что компоненты вектора ОП $X_d(t)$, представляющие процессы постепенных отказов, характеризующихся интенсивностью перехода электрооборудования из одного состояния в другое, удовлетворяют условиям стационарности и монотонности. Проведенные исследования позволили считать этот процесс марковским [8, 9].

2 Метод расчета риска отказа тягового трансформатора при дрейфе его технического состояния

Рассмотрим граф состояний процесса перехода силового трансформатора из области работоспособного O_1 в область неработоспособного состояния O_2 (рис. 2).

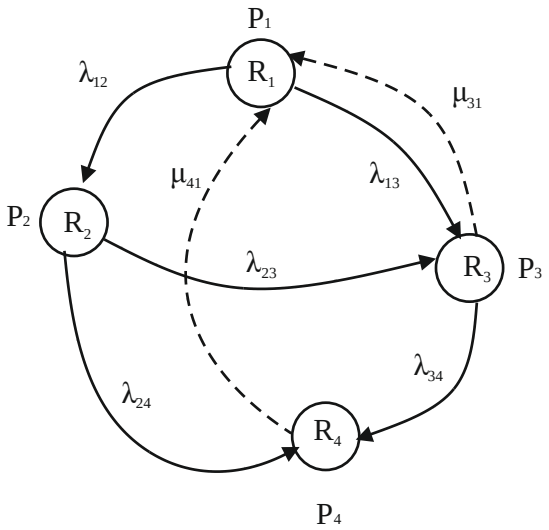

Рис. 2. Граф состояний и переходов трансформатора:

R_1 – трансформатор исправен и находится в работе; R_2 – трансформатор в состоянии скрытого отказа (СР-1); R_3 – трансформатор находится в состоянии восстановления или назначается плановое техническое обслуживание (СР-2); R_4 – трансформатор находится в состоянии аварийного ремонта (СР-3); дуги орграфа λ_{12}, λ_{13}, λ_{23}, λ_{24}, λ_{34} означают интенсивность переходов при изменении технического состояния; дуги μ_{31}, μ_{41} – интенсивность восстановления

Для рассматриваемого на рис. 2 процесса перехода трансформатора в различные состояния система дифференциальных уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dP_1(t)}{dt} = -(\lambda_{12} + \lambda_{13})P_1(t) + \mu_{31}P_3(t) + \mu_{41}P_4(t), \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_{12}P_1(t) - (\lambda_{23} + \lambda_{24})P_2(t), \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_{13}P_1(t) + \lambda_{23}P_2(t) - (\lambda_{34} + \mu_{31})P_3(t), \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = \lambda_{24}P_2(t) + \lambda_{34}P_3(t) - \mu_{41}P_4(t). \end{cases} \quad (5)$$

Систему (5) можно дополнить условием нормировки состояния трансформатора:

$$P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) = 1. \quad (6)$$

Для расчета перехода трансформатора из O_1 в O_2 и обратно выбраны статистические данные эксплуатации трансформатора: λ_{12} = 0,015; λ_{13} = 0,03; λ_{23} = 0,04; λ_{24} = 0,05; λ_{34} = 0,035; μ_{31} = 0,05; μ_{41} = 0,004. Результаты расчета вероятности изменения состояния трансформатора представлены в

табл. 2 и на рис. 3, вероятность восстановления работоспособного состояния приведена на рис. 4, и вероятность работоспособного состояния – на рис. 5. Результаты расчетов, отображенные в табл. 2 и на рис. 3–5, позволяют оценить вероятность изменения состояния электрооборудования в условиях эксплуатации при переходе из O_1 в O_2 при соответствующих показателях интенсивности отказа и интенсивности восстановления.

Таблица 2

Результаты расчета вероятности изменения состояния трансформатора

t, год	$P_1(t)$	$P_2(t)$	$P_3(t)$	$P_4(t)$
1	1	0	0	0
3,4	0,898	0,032	0,109	$2{,}389\cdot10^{-3}$
5,8	0,806	0,058	0,197	$4{,}754\cdot10^{-3}$
8,2	0,723	0,079	0,269	$7{,}097\cdot10^{-3}$
10,6	0,649	0,096	0,328	$9{,}418\cdot10^{-3}$
13	0,583	0,11	0,376	0,012
15,4	0,523	0,121	0,415	0,014
17,8	0,47	0,13	0,447	0,016
20,2	0,421	0,137	0,473	0,018
22,6	0,378	0,143	0,494	0,021
25	0,34	0,147	0,512	0,023

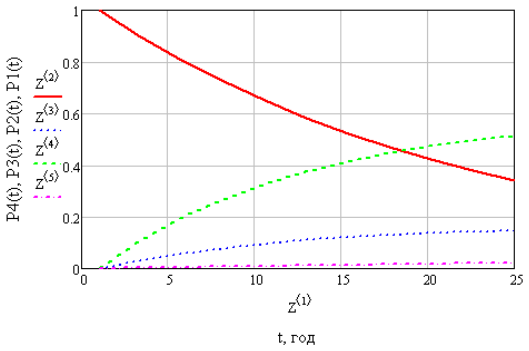

Рис. 3. Вероятность изменения состояния силового трансформатора тяговой подстанции: $Z^{<1>}$ – время перехода объектов системы из работоспособного состояния в другие виды состояний,а также интенсивности их восстановления; $Z^{<2>}$ – вероятность $P_1(t)$ (трансформатор исправен и находится в работе); $Z^{<3>}$ – вероятность $P_2(t)$ (трансформатор находится в состоянии скрытого отказа); $Z^{<4>}$ – вероятность $P_3(t)$ (трансформатор находится в состоянии восстановления или назначается плановое техническое обслуживание); $Z^{<5>}$ – вероятность $P_4(t)$ (трансформатор находится в состоянии ремонта)

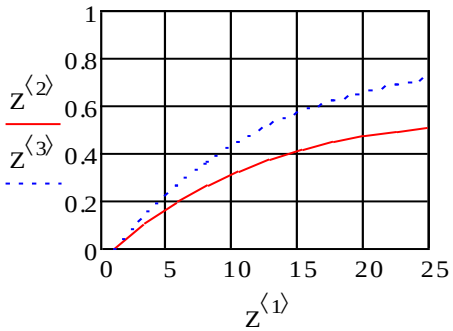

Рис. 4. Вероятность восстановления работоспособного состояния – $P_в(t)$: $Z^{<2>}$ – вероятность $P_в(t)$ при интенсивности восстановления μ = 0,05; $Z^{<3>}$ – вероятность $P_в(t)$

при интенсивности восстановления μ = 0,07

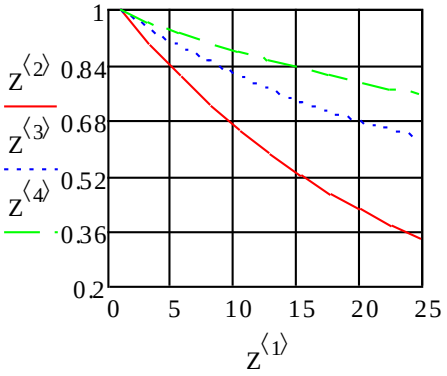

Рис. 5. Вероятность работоспособного состояния:
$Z^{<2>}$ – вероятность $P(t)$ – трансформатор находится в состоянии скрытого отказа (λ = 0,045); $Z^{<3>}$ – вероятность $P(t)$ – при уменьшении времени восстановления (μ = 0,02); $Z^{<4>}$ – вероятность $P(t)$ при уменьшении интенсивности отказа (λ = 0,035) и времени восстановления (μ = 0,02)

Результаты расчета степени риска наступления отказа – $К_{СР}$, согласно выражению (3) следующие: нахождение трансформатора в состоянии скрытого отказа $К_{СР}(P_2) = 4$; в состоянии необходимости восстановления или планового технического обслуживания $К_{СР}(P_3) = 2,5$; в состоянии необходимости ремонта $К_{СР}(P_4) = 46$. Предложенный метод расчета позволяет определить степень риска использования оборудования с учетом интенсивности его отказов и интенсивности восстановления с целью прогнозирования и предупреждения выхода из строя, а также обеспечения своевременного обслуживания и ремонта.

Обеспечение надежности и бесперебойной работы УЭ требует оказания мер, реализуемых комплексно системами изготовления, эксплуатации, службы поддержки и проведения технического обслуживания [10]. Фактические значения показателей контроля безопасности, предоставляемые службами управления надежностью предприятия-изготовителя, а также данные о технической разработке, монтаже и вводе в эксплуатацию участка УЭ обеспечивают обратную связь в системе диагностики и контроля надежности, сопоставление требуемой и фактической схем которой представлено на рис. 6.

Рис. 6. Схемы процессов управления надежностью и экономичностью устройств электроснабжения:
а – фактическая; *б* – требуемая

Сравнительный анализ схем показал, что требуемый уровень управления подразумевает осуществление совокупных мер по обеспечению надежности трехуровневой системой взаимодействия изготовителя, эксплуатирующей ЭЧ (дистанцией электроснабжения) и сервисной службы технического обслуживания.

3 Обсуждение результатов исследования

Информационные технологии составляют неотъемлемую основу всех процессов технического диагностирования. Развитие данного исследования позволяет совершенствовать ТО и Р. В данном случае использование экспертных систем (ЭС) является подходящим инструментарием для выбора и осуществления ресурсосберегающих технологий эксплуатации систем тягового электроснабжения с целью минимизации затрат на протяжении всех этапов УЭ. База для разрабатываемых ЭС формируется из исходных данных работы механизма синтеза эвристик. Например, удавшиеся случаи минимизации затрат на восстановление при эксплуатации силового оборудования фиксируются в базе методом ретроспекции. Продукция хранится в базе в виде иерархических структур или просто представляет некоторую совокупность. На рис. 7 показана диаграмма взаимодействия элементов ЭС для реализации ресурсосберегающих технологий эксплуатации и ремонта УЭ. Однако подобные алгоритмы и методы сбора и хранения данных ЭС требуют совершенствования систем управления устройствами тягового электроснабжения путем создания интегрированных систем, например, таких как российский продукт АСТМУ. В будущем такие ЭС будут необходимым инструментом аналитических центров.

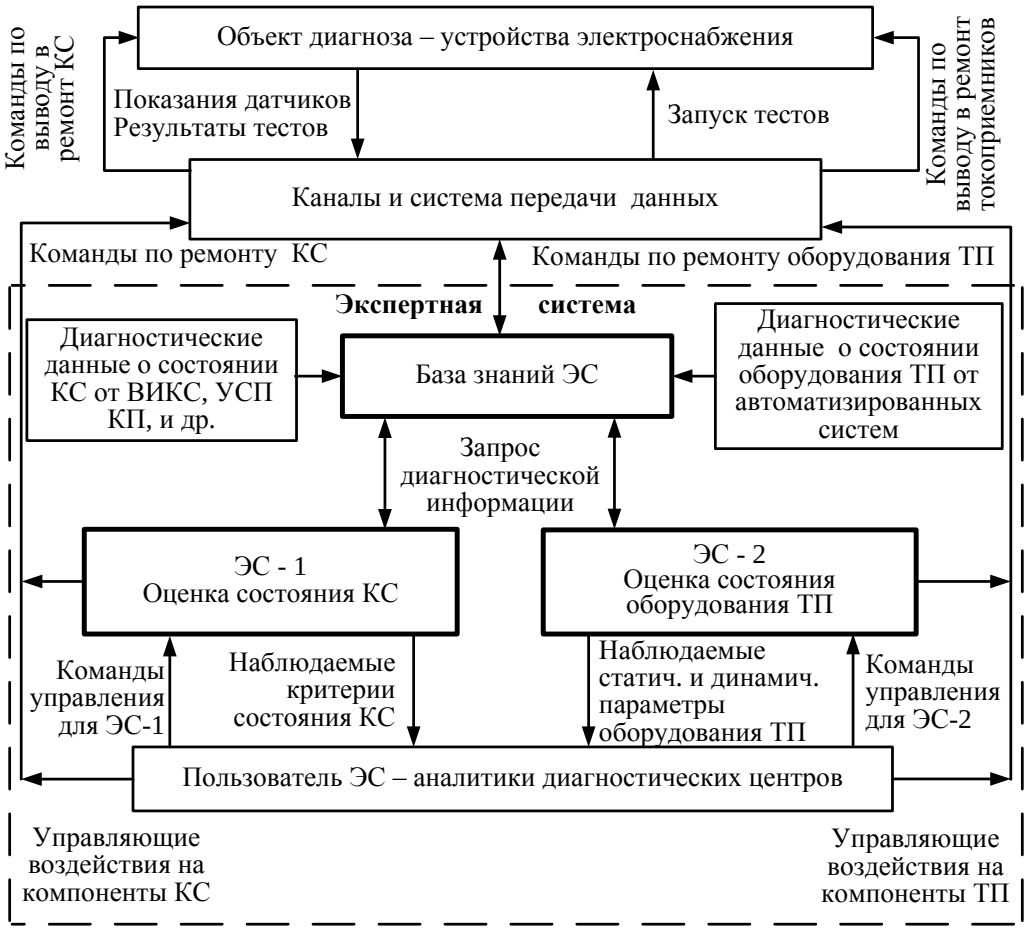

Рис. 7. Диаграмма ЭС центров диагностики

Выводы

1 Разработаны научно обоснованные принципы построения перспективной системы эксплуатации устройств электроснабжения по состоянию и минимуму затрат в процессе их жизненного цикла

на базе комплексной диагностики параметров с анализом критериев состояния и упреждающей регулировкой или ремонтом оборудования.

2 Предложены информационные технологии оценки состояния устройств электроснабжения в процессе их эксплуатации на базе синтеза двух источников информации: диагностики в режиме реального времени и имитационного моделирования. Разработана обобщенная схема экспертной системы для анализа состояния устройств электроснабжения и выработки управляющих воздействий в аналитических центрах систем управления.

3 Показано, что эффективность работы системы технического обслуживания определяется такими факторами, как надежность силовых трансформаторов тяговых подстанций, продолжительность поиска отказов и ремонтных работ.

4 Установлено, что реализация ТО и Р с использованием информационных технологий управления технологическими процессами повышает эффективность эксплуатации силового электрооборудования тяговых подстанций.

Список литературы

1 Анализ работы Трансэнерго по итогам 2017 года / ОАО «Российские железные дороги» ; Трансэнерго – филиал ОАО «РЖД». – Москва, 2018. – 148 с.

2 **ГОСТ Р 57659-2017.** Методы испытаний объектов железнодорожного транспорта в целях продления назначенного срока службы. Часть 1. Силовые трансформаторы и автотрансформаторы тяговых подстанций, трансформаторных подстанций и линейных устройств тягового электроснабжения железной дороги. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 12 с.

3 **Ефимов, А. В.** Надежность и диагностика систем электроснабжения железных дорог / А. В. Ефимов, А. Г. Галкин. – Москва : УМК МПС России, 2000. – 512 с. – ISBN 5-89035-022-6.

4 **Луковенко, А. С.** Повышение надежности оборудования электрических подстанций тягового электроснабжения при работе в критических режимах / А. С. Луковенко, Р. М. Христинич // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2016. – № 2. – С. 36–40. – ISSN 1995-5685.

5 **Костюков, А. В.** Экспериментальные исследования акустических характеристик трансформатора / А. В. Костюков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 12. – С. 127–132. – DOI 10.24412/2071-6168-2021-12-127-133.

6 **Доманский, В. Т.** Повышение энергетической эффективности систем электроснабжения тяги и питающих линий энергосистем / В. Т. Доманский, В. В. Доманский, И. В. Доманский // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2013. – № 3. – С. 114–117. – ISSN 0201-727X.

7 **Доманский, В. В.** Информационные технологии режимов работы тягового электроснабжения и питающих их энергосистем / В. В. Доманский,

References

1 Analysis of the work of Transenergo at the end of 2017 / JSC “Russian Railways”; Transenergo – a Branch of JSC “Russian Railways”. – Moscow, 2018. – 148 p.

2 **GOST R 57659-2017.** Methods of testing railway transport facilities in order to extend the designated service life. Part 1. Power transformers and autotransformers of traction substations, transformer substations and linear traction power supply devices of the railway. – Moscow : Standartinform, 2017. – 12 p.

3 **Efimov, A. V.** Reliability and diagnostics of railway power supply systems / A. V. Efimov, A. G. Galkin. – Moscow : UMK MPS of Russia, 2000. – 512 p. – ISBN 5-89035-022-6.

4 **Lukovenko, A. S.** Improving the reliability of the equipment of electric substations of traction power supply when operating in critical modes / A. S. Lukovenko, R. M. Hristinich // ELECTRO. Electrical engineering, electric power industry, electrical industry. – 2016. – No. 2. – P. 36–40. – ISSN 1995-5685.

5 **Kostyukov, A. V.** Experimental studies of the acoustic characteristics of the transformer / A. V. Kostyukov // Bulletin of the Tula State University. Technical science. – 2021. – No. 12. – P. 127–132. – DOI 10.24412/2071-6168-2021-12-127-133.

6 **Domansky, V. T.** Improving the energy efficiency of traction power supply systems and power supply lines / V. T. Domansky, V. V. Domansky, I. V. Domansky // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2013. – No. 3. – P. 114–117. – ISSN 0201-727X.

7 **Domansky, V. V.** Information technologies of modes of operation of traction power supply and power systems feeding them / V. V. Domansky, G. A. Domanskaya, V. A. Vasenko // Vestnik

Г. А. Доманская, В. А. Васенко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 3(79). – С. 154–165. – DOI 10.46973/0201-727X_2020_3_154.
8 Analysis and optimization of the reactive power compensation modes in a power supply system / V. Yagup, K. Yagup, Yu. Kovalova [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Iss. 3/5 (99). – P. 13–22. – DOI 10.15587/1729-4061.2019.168584.
9 **Sun, H.-Ch.** Fault Diagnosis of Power Transformers Using Computational Intelligence : A Review / Huo-Ching Sun, Yann-Chang Huang, Chao-Ming Huang // Energy Procedia. – 2012. – No. 14. – P. 1226–1231. – DOI 10.1016/j.egypro.2011.12.1080.
10 **Попова, Н. А.** Применение современных информационных технологий в процессе подготовки персонала для управления объектами системы электроснабжения / Н. А. Попова, П. А. Бодров, И. Г. Акперов // Труды Международной научно-практической конференции «Транспорт : наука, образование, производство», («Транспорт-2021»). Т. 3. : Гуманитарные науки. – Ростов-на-Дону, 2021. – С. 230–234. – ISBN 978-5-907295-42-1

Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2020. – No. 3(79). – P. 154–165. – DOI 10.46973/0201-727X_2020_3_154.
8 Analysis and optimization of the reactive power compensation modes in a power supply system / V. Yagup, K. Yagup, Yu. Kovalova [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Iss. 3/5 (99). – P. 13–22. – DOI 10.15587/1729-4061.2019.168584.
9 **Sun, H.-Ch.** Fault Diagnosis of Power Transformers Using Computational Intelligence : A Review / Huo-Ching Sun, Yann-Chang Huang, Chao-Ming Huang // Energy Procedia. – 2012. – No. 14. – P. 1226–1231. – DOI 10.1016/j.egypro.2011.12.1080.
10 **Popova, N. A.** Application of modern information technologies in the process of personnel training for the management of power supply system facilities / N. A. Popova, P. A. Bodrov, I. G. Akperov // Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Transport : science, education, production”, (“Transport-2021”). Vol. 3. : Humanities. – Rostov-on-Don, 2021. – P. 230–234. – ISBN 978-5-907295-42-1

V. V. Domansky

INFORMATION TECHNOLOGIES AND METHOD OF CALCULATING THE RISK OF FAILURE IN CASE OF DRIFT OF THE TECHNICAL CONDITION OF THE TRACTION TRANSFORMER

Abstract. The paper proposes a method for controlling the monitoring and maintenance of train traction power supply devices. The method implements an integrated approach to improving the efficiency of operation of power supply devices with the possibility of predicting the probability of the power transformer state (operability or restoration). The implementation of the method will make it possible to make an informed decision on the use of the transformer circle life without the failure risk or premature decommissioning.

Keywords: operational efficiency, management, maintenance, electrical equipment, monitoring, Markov process, failure risk.

For citation: Domansky, V. V. Information technologies and method of calculating the risk of failure case of drift of the technical condition of the traction transformer / V. V. Domansky // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 1. – P. 264–273. – DOI 10.46973/0201–727X_2023_1_264.

Сведения об авторах

Доманский Василий Валерьевич
Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Информатика»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: domansk2015@mail.ru

Information about the authors

Domansky Vasily Valerievich
Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Computer Science»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: domansk2015@mail.ru