

УДК 625.1:656.2

В. В. БУРЧЕНКОВ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, А. В. КОЛЕНЧИКОВ, П. А. КРОТ, Белорусская железная дорога, г. Минск

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРЕДИКТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ТЕПЛОВЗОВ

Рассмотрены принципы аналитического построения информационно-измерительных систем и разработана технология предиктивной диагностики и прогнозирования технического состояния ответственных механизмов и устройств энергетической цепи тепловозов. Оценка остаточного ресурса работоспособности выполнена на основе многофакторных диагностических критериев. Исследованы деградационные процессы в ответственных механизмах и устройствах тепловозов в процессе эксплуатации.

Иntenсивное развитие комплексов автоматического дистанционного управления движением поездов и увеличение зон действия систем диспетчерской централизации сокращают возможности визуального наблюдения за техническим состоянием ходовой части подвижного состава в пути следования.

Стратегией развития Белорусской железной дороги до 2030 года в качестве одного из ключевых элементов повышения эффективности работы выделена необходимость цифровизации систем управления и диагностики локомотивов для совершенствования безопасности перевозочного процесса. Анализ материалов, определяющих перспективные направления развития предиктивной диагностики подвижного состава, показал, что при прочих равных условиях ключевой тенденцией является создание безлюдной технологии ранней идентификации неисправностей ответственных деталей и узлов подвижных единиц.

В настоящее время в области эксплуатации и ремонта локомотивов Белорусской железной дороги на уровне производственных участков сложилась ситуация, связанная с несвоевременностью получения достоверной информации о техническом состоянии, прогнозируемых неисправностях и остаточном ресурсе ответственных механизмов и составных частей тепловозов при их постановке на плановое техническое обслуживание и ремонт. Это объясняется тем, что основным средством для обеспечения безопасности движения поездов являются локальные локомотивные диагностические устройства [2].

Как правило, новые системы диагностики не решали задачи прогнозирования возможного технического состояния контролируемых устройств в будущем. В связи с вышесказанным особое значение приобретает многофакторный сбор информации о техническом состоянии подвижного состава, дефекты которого в последующие периоды эксплуатации могут привести к отказам локомотивных систем управления и диагностики, изломам узлов и деталей ходовой части.

Основная цель предиктивной диагностики заключается в сборе и обработке данных о техническом состоянии подвижного состава на ранней стадии развития дефектов, а также прогнозировании выхода из строя критически важных узлов. К критичному оборудованию тепловозов отнесены: дизель-генераторная установка, элек-

троборудование силовых и вспомогательных цепей; узлы экипажной части и механическое оборудование; тяговые электродвигатели; тормозное и пневматическое оборудование; электронное оборудование.

Оценка работоспособности ответственных механизмов и устройств на ранней стадии развития дефектов, а также в будущем, может осуществляться по нескольким известным алгоритмам, основные из которых – алгоритмы экстраполяции и статистической классификации [3, 4].

При использовании алгоритмов экстраполяции состояние контролируемых устройств может быть представлено в виде многомерной векторной функции

$$F = Q(X, t),$$

где $\bar{X}(t_0) = \{x_1(t), \dots, x_i(t), \dots, x_n(t)\}$ – дискретная или непрерывная функция в период времени $(t_0, \dots, t_n)$ известной области $T_{изв}$.

В этом случае можно определить значения функции

$$\bar{X}(t_0) = \{x_1(t), \dots, x_i(t), \dots, x_n(t)\}$$

$$\bar{X}(t_0), \bar{X}(t_1), \dots, \bar{X}(t_i), \dots, \bar{X}(t_n)$$

соответственно, в моменты времени $t_0, t_1, \dots, t_i, \dots, t_n$.

Затем с помощью модели прогнозирования $W(\bar{X}, t)$ по известным значениям $(\bar{X}, t_i)$ определяют значения функции $\bar{X}(t_{n+1}), \dots, \bar{X}(t_{n+j}), \dots, \bar{X}(t_{n+m})$ в будущие моменты времени $t_{n+1}, \dots, t_{n+j}, \dots, t_{n+m}$.

Приведенная модель прогнозирования иллюстрируется представленными на рисунке 1 статистическими характеристиками:

- интервалов времени штатной эксплуатации устройств;
- периодов времени предотказного состояния диагностируемых устройств;
- моментов времени отказа устройств;
- состояния контролируемых устройств в будущие периоды эксплуатации устройств.

Оценка состояния диагностируемых устройств в будущие периоды времени по заранее известному критерию опасности Q позволяет определить категорию возможного отказа – опасный или неопасный, а затем наметить своевременные мероприятия для его исключения.

Затем, используя модель прогнозирования $W(\bar{X}, t_0)$, по совокупности параметров $\{x_s\}$, $s = \overline{1, E}$ и координат вектора $\bar{X}(t_0)$, определяют, в каком из известных заранее классе состояний S находится система в данный момент времени: $S_1, S_2, \dots, S_m, S_k$. Путем их анализа в любой момент времени определяется предотказное состояние и время его возможного возникновения. При этом не представляет особой сложности и определение момента времени возникновения отказа t_n и его категории [5].

По характеру протекания процессов деградации их можно разделить на две группы. К первой относятся процессы, вызывающие внезапное или катастрофическое изменение технического состояния устройств и систем вследствие резкого изменения физических параметров. В результате наступает неисправность или отказ устройств по причине резкого скачкообразного изменения их характеристик за пределы допустимых; ко второй – процессы, приводящие к постепенному изменению физических параметров устройств и систем.

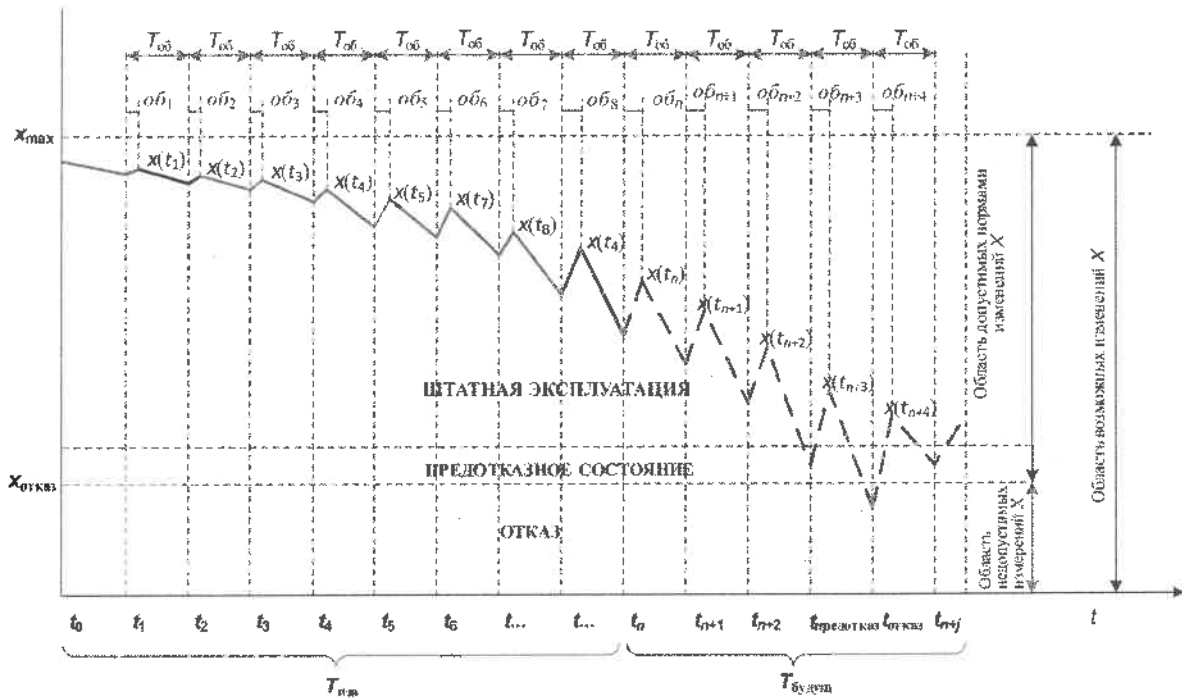


Рисунок 1 – Зависимость многомерной функции состояний контролируемых устройств и систем от прошлого и будущего периодов эксплуатации

Постепенные деградационные процессы параметров устройств с течением времени накапливаются и приводят к потере их работоспособности. В общем случае процесс изменения состояния устройств и систем диагностики локомотивов можно представить в виде модели детерминированных изменений

$$\bar{X}(t) = \bar{\xi}(t) + \bar{\eta}(t) + \bar{\varepsilon}(t),$$

где $\bar{\xi}(t) + \bar{\eta}(t)$ – векторные составляющие, характеризующие соответственно необратимые и обратимые процессы; $\bar{\varepsilon}(t)$ – векторная погрешность измерительных цепей.

Составляющая $\bar{\xi}(t)$ определяет закономерность изменения процесса и в большей мере детерминированную его часть, а $\bar{\xi}(t)$ и $\bar{\eta}(t)$ характеризуют его стохастическую часть. Последние составляющие в большинстве случаев имеют «сезонные» колебания. Для предиктивного диагностирования допустимо объединение составляющих $\bar{\xi}(t)$ и $\bar{\eta}(t)$:

$$\bar{\xi}(t) + \bar{\eta}(t) = \bar{k}(t).$$

Тогда процесс состояния устройств и систем можно представить в виде

$$\bar{X}(t) = \bar{k}(t) + \bar{\varepsilon}(t).$$

Процессом постепенного изменения технического состояния устройств и систем можно в общем случае считать процесс, у которого выполняется условие

$$\|\xi(t + \Delta t) - \xi(t)\| \gg \|k(t + \Delta t) - k(t)\|,$$

где $\|\xi(t + \Delta t) - \xi(t)\|$, $\|k(t + \Delta t) - k(t)\|$ – норма вектора; $\Delta t > 0$ – период времени.

Очевидно, что чем больше указанное неравенство, тем ближе процесс изменения $\bar{X}(t)$ приближается к детерминированному, характеризующему постепенно возрастающие деградационные процессы.

Многомерный детерминированный процесс при известных критериях показателей контролируемого процесса определяется следующей моделью:

$$\bar{X}(t) = \bar{W}\{\beta(x), t\} + \bar{E},$$

где $\bar{X} = \|x_1 \dots x_n\|$ – вектор показателей контролируемого процесса; $\bar{W}\{\beta(x), t\} = \|\bar{W}\{\beta^1(x), t\}, \dots, \bar{W}\{\beta^k(x), t\}\|$ –

вектор функций времени t и коэффициентов β ; $\vec{E} = \|\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n\|$ – вектор ошибок, возникающих из-за существования случайной составляющей.

Приведенная модель значительно облегчает прогнозирование состояния сложных ответственных устройств и систем, к которым относятся системы управления и диагностики тепловозов, и получение результатов прогноза с высокой точностью.

При разработке методики предиктивной диагностики решены следующие задачи: на основании анализа полученных результатов измерений определяется техническое состояние или уровень износа механических узлов, а также получение прогнозных оценок скорости изменения во времени (численных значений градиента) развивающихся деградиационных процессов в механических узлах. Это позволило классифицировать состояние объектов контроля по классам неисправностей: годен, условно годен и не годен, рассчитать остаточный технический ресурс диагностируемых узлов, разработать методологию повышения надежности конструктивных узлов и оптимизировать сроки и объемы проведения технического обслуживания и текущего ремонта локомотивов [6, 7].

Большинство деградиационных процессов, которые развиваются в механических узлах подвижного состава, являются тепловыми, т. е. изменение скорости деградации напрямую зависит от температуры устройства. В основе комплекса параметров системы диагностирования использованы температурные исследования деградиационных процессов, проведенные на математической модели и на реальных механических устройствах тепловозов. При дополнении электрических схем тепловоза соответствующими средствами измерения, на стационарных автоматизированных рабочих местах АРМ ТЧ появятся банки данных для принятия решений по организации ремонта по состоянию. На первом этапе для этих целей использованы программные возможности комплексного локомотивного устройства безопасности КЛУБ с соответствующим программным дополнением.

Отказы конструктивных устройств локомотивных систем управления и диагностики моделировались путем приравливания коэффициентов цифровой модели энергетической цепи тепловоза значениям от нуля (выход из строя) до номинальных, соответствующих паспортным значениям и максимально допустимых. Промежуточные величины коэффициентов модели определялись для оценки степени деградации ответственных узлов энергетической цепи тепловоза, таких как дизель, тяговый синхронный генератор, выпрямительная установка, тяговые электродвигатели, электронное оборудование. Исправность силовых и вспомогательных цепей энергетической цепи тепловоза проверялась путем имитации выхода из строя автоматических выключателей, предохранителей, отказов поездных силовых контакторов и промежуточных реле. Для контроля сопротивления изоляции электрооборудования силовых цепей предусмотрены режимы однократных и периодических измерений, переход к автоматическому режиму измерений сопровождался определением периода повторных проверок.

Тепловой контроль (ТК) электрических цепей тепловозов проводится с помощью встроенных и носимых тепловизоров в дополнение к проведению типовых испытаний узлов и оборудования. Для тепловизионного контроля разработана методика и схема проведения ТК, а также определены браковочные критерии. В таблице 1 представлены допустимые и браковочные уровни нагрева электрических цепей тепловозов по классам неисправностей.

Таблица 1 – Распределение цифровых показателей дефектов электротехнических деталей и узлов тепловозов по классам неисправностей из-за нагрева токоведущих частей

Электротехнические детали и узлы тепловозов	Цифровые показатели, °C		
	Разрешена эксплуатация тепловозов	Условно допустимая работа тепловозов	Немедленное исключение из эксплуатации
1 Токоведущие изолированные или соприкасающиеся с изоляционными материалами части	Менее 60	60–80	Свыше 80
2 Токоведущие неизолированные металлические части, не соприкасающиеся с изоляционными материалами	Менее 60	60–120	Свыше 120
3 Болтовые контактные соединения из меди, алюминия и их сплавов	Менее 50	50–100	Свыше 100
4 Контакты (в воздушной среде)	Менее 60	60–75	Свыше 75
5 Контакты на основе серебра	Менее 50	50–90	Свыше 90
6 Предохранители на напряжение ниже 3 кВ	Менее 50	50–70	Свыше 70

На основании таблицы 1 разработано графическое распределение цифровых параметров допустимых уровней нагрева электрических цепей локомотива, приведенное на рисунке 2.

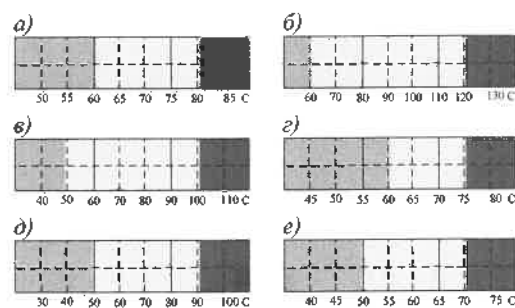


Рисунок 2 – Графическое распределение цифровых параметров уровней нагрева электрических цепей локомотива по классам неисправностей:

а – токоведущие изолированные части; б – токоведущие неизолированные металлические части; в – болтовые контактные соединения из меди, алюминия и их сплавов; г – контакты (в воздушной среде); д – контакты на основе серебра; е – предохранители на напряжении ниже 3 кВ

В колонках отражены уровни дефектов нагрева электрических цепей локомотивов по классам неисправностей: в зеленой колонке – уровни дефектов, имеющие допустимое значение для тепловозов, пригодных к эксплуатации; в желтой – уровни дефектов для тепловозов, условно пригодных к эксплуатации, а в красной – уровни дефектов, отражающих параметры аварийного состояния, требующего немедленного исключения тепловозов из эксплуатации. Цветовая гамма проверяемых механизмов обладает большей информативностью и оперативностью для принятия решений о ремонте.

Характерные отказы дизелей тепловозов связаны с нарушениями в работе топливной системы, в частности топливных насосов высокого давления (ТНВД). Проявлением неравномерной производительности секций ТНВД будет разная температура корпусов секций ТНВД и корпусов выхлопных патрубков цилиндров. Термограмма корпусов секций ТНВД представлена на рисунке 3.

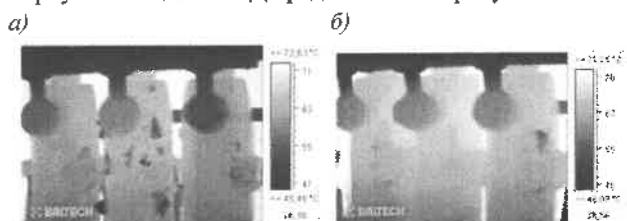


Рисунок 3 – Термограмма корпусов секций ТНВД
а – требуется проверка производительности секций ТНВД;
б – равномерная производительность секций ТНВД

Динамика температурного нагрева компрессоров, турбовоздухоуловков, зубчатых передач колесно-моторных блоков, тормозного оборудования, водяных и масляных охлаждающих секций дизеля контролировалась дополнительными специальными измерительными преобразователями. Сбор информации о результатах работы этих преобразователей способствовал повышению достоверности оценки деградационных процессов.

Получено 04.03.2025

V. V. Burchenkov, A. V. Kolenchikov, P. A. Krot. Improving predictive diagnostics technology energy chain of diesel locomotives.

The principles of analytical construction of information-measuring systems are considered and the method of predictive diagnostics and forecasting of technical condition of responsible mechanisms and devices of energy chain of diesel locomotives is developed. The assessment of residual resource of operability is performed on the basis of predictive diagnostic criteria. Degradation processes in responsible mechanisms and devices of diesel locomotives during operation are investigated.

Заключение. Разработана технология предиктивной диагностики и прогнозирования технического состояния тепловозов.

Оценка остаточного ресурса работоспособности выполнена на основе тепловых диагностических критериев. Исследованы деградационные процессы в ответственных механизмах и устройствах тепловозов в процессе эксплуатации.

Список литературы

- 1 Розенберг, Е. Н. О направлениях развития цифровой железной дороги / Е. Н. Розенберг, Ю. Н. Дзюба, В. В. Батраев // Автоматика, связь, информатика. – 2018. – № 1. – С. 9–12.
- 2 Бурченков, В. В. Интеграция систем и устройств мониторинга технического контроля и диагностики подвижного состава / В. В. Бурченков // Наука и техника транспорта. – 2020. – № 3. – С. 11–19.
- 3 Микропроцессорная система управления нового поколения для локомотивов / Ю. И. Клименко, К. С. Перфильев, В. Ю. Евсеев [и др.] // Локомотив. – 2018. – № 4. – С. 40–41.
- 4 Синельников, И. А. Бортовой комплекс предиктивной диагностики локомотивов АО «Трансмашхолдинг» / И. А. Синельников // Техника железных дорог. – 2024. – № 1 (65). – С. 4–9.
- 5 Баранов, Л. А. Аналого-цифровые преобразователи устройств автоматики и телемеханики электрифицированных железных дорог / Л. А. Баранов, Е. Е. Бакеев. – М.: Транспорт, 1979. – 207 с.
- 6 Диагностирование устройств железнодорожной автоматики и агрегатов подвижных единиц / А. Б. Бойник, Г. И. Загарий, С. В. Кошевой [и др.]. – Харьков: Новое слово, 2008. – 302 с.
- 7 Боряк, К. Ф. Перспективы внедрения температурного мониторинга для диагностики технического состояния механических узлов подвижного тягового железнодорожного состава / К. Ф. Боряк, С. Л. Волков, Е. С. Шпат // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2014. – № 2. – С. 50–53.