

УДК 629.4.027

*В. В. БУРЧЕНКОВ, А. А. МАРКАВЦОВ*

*Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь*

## **ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ДИАГНОСТИКИ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

Приведены сведения о системах контроля технического состояния локомотивов и вагонов, рассмотрены условия эксплуатации и мониторинга содержания ответственных узлов подвижного состава. Сформулирована методика оценки состояния локомотивов и вагонов по градиенту нарастания деградационных процессов. Рассмотрены принципы расчета необходимого количества диагностических устройств для контроля технического состояния подвижного состава.

**Ключевые слова:** локомотивная диагностика, тепловой мониторинг, деградационные процессы, технический контроль, прогнозные оценки состояния.

Обеспечение безопасности движения поездов – главное условие эксплуатации при перевозке пассажиров и грузов во всем мире. Современный этап развития железнодорожного транспорта характеризуется ростом скоростей движения на железных дорогах при постепенном износе подвижного состава, что вызывает необходимость постоянного контроля технического состояния его деталей и узлов. Одним из путей повышения эксплуатационной надёжности локомотивов и вагонов является применение бортовых диагностических устройств, позволяющих оценить техническое состояние основных механических узлов в эксплуатации на основе статистических данных непрерывного мониторинга.

К настоящему времени созданы разнообразные внешние и встроенные, универсальные и специализированные средства технического диагностирования подвижного состава и накоплен большой опыт их применения. Внедрены системы автоматического управления тормозами САУТ-ЦМ, комплексы локомотивных устройств безопасности КЛУБ-У, автоматические системы локомотивной сигнализации АЛСН-ЕН и т. д. Однако достижения в этой области не в полной мере соответствуют практическим потребностям [1–3].

При использовании сложных деталей и узлов, содержащих электронные и микропроцессорные устройства, традиционное понятие их износа теряет смысл, а работоспособность невозможно определить визуально. Фактическое техническое состояние можно определить только с помощью специальных средств контроля и диагностики. Прямое измерение параметров и определение состояния сложных механических и электронных систем во многих случаях затруднено, поэтому применяют методы косвенного определения

износа отдельных узлов и агрегатов с использованием бортовых и стационарных средств диагностики [4].

На зарубежном подвижном составе бортовая диагностика развивается по двум основным направлениям. Первое – контроль состояния и предоставление обслуживающему персоналу информации о возникающих неисправностях и ограничительных мерах. Второе – регистрация, накопление, классификация неисправностей, оперативная передача информации в депо для организации замены неисправной детали или узла, а также для анализа отказов. Такие информационные системы, например, DIANA (Германия) или TORNAD (Франция), позволяют получать информацию о состоянии оборудования подвижного состава и обеспечивать снижение его простоя при техническом обслуживании и ремонте [5].

Осуществление диагностики предполагает решение следующих задач: определение технического состояния или уровня износа механических узлов на основании анализа полученных результатов измерений, а также получение прогнозных оценок скорости изменения во времени (численных значений градиентов) развивающихся деградиционных процессов в механических узлах. Это позволит рассчитать остаточный технический ресурс диагностируемых узлов, разработать методологию его повышения, а также оптимизировать сроки и объемы проведения технического обслуживания и текущего ремонта локомотивов и вагонов [6–8].

Деградиционные процессы, развивающиеся в элементах конструкций подвижного состава, в большинстве случаев являются тепловыми, т. е. изменение скорости деградации напрямую зависит от температуры. Поэтому анализ таких процессов требует организации температурного мониторинга в процессе эксплуатации. Допускаемые критические значения температур отдельных механических узлов локомотивов и вагонов имеются в технической документации, поэтому требуется только дополнить электрические схемы подвижных единиц соответствующими средствами измерения, обработки, хранения, передачи результатов на расстояние, удобного представления информации для визуализации, анализа и принятия решения, т. е. разработать соответствующую систему мониторинга.

Например, допускаемая температура охлаждающей жидкости (воды) в системе охлаждения дизельного двигателя любого тепловоза должна быть меньше температуры кипения и составлять 80–90 °С. Аналогична допускаемая температура и для системы смазки. Фиксация установленными в кабине машиниста тепловоза измерительными приборами перегрева масла и охлаждающей жидкости свидетельствует о неисправности и необходимости остановки дизеля. Однако для определения предаварийного состояния надо регистрировать не только значения температуры в текущий момент, но и скорости нарастания (градиента). Каждому типу тепловоза соответствуют

некоторые критические значения такого градиента, при которых наступают предельные состояния нагрева масла и охлаждающей жидкости [7–9]. Поэтому, осуществляя непрерывный мониторинг температуры, можно прогнозировать дату и время захода тепловоза на техническое обслуживание или текущий ремонт по техническому состоянию. Аналогичный контроль может осуществляться для буксовых узлов колесных пар локомотивов и вагонов, предельно допустимая температура масла в которых составляет 82–85 °С.

Перегрев букс также характеризуется неустановившимся режимом теплообмена и повышением температуры шейки оси и корпуса буксы в процессе движения поезда [10]. По данным российских железных дорог, наиболее высокая скорость увеличения температур шеек осей наблюдается при разрушении подшипника или сколе борта. Так, для букс с роликовыми подшипниками темп возрастания температуры шейки оси составляет от 2 до 15 °С/мин при температурах до 300 °С и до 18–20 °С/мин при 800 °С (примерная температура излома шейки оси). Отметим, что, по данным Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ), пробег вагона до излома шейки оси составляет не более 45–50 км [5]. Практикой длительной эксплуатации подвижного состава в различных условиях и экспериментами установлено, что для буксового узла с подшипником качения предельно допустимая температура шейки оси составляет примерно 90–100 °С. Критическая температура, при которой начинается разрушение поверхностей катания и происходит перекашивание сепараторов подшипников, соответствует значению 140 °С. С учетом этого повышение в процессе движения поезда температуры корпуса буксы до 70–75 °С в летний период или до 40–50 °С в зимний период является признаком неисправности.

При тепловом мониторинге тепловозов в первую очередь следует анализировать состояние дизель-генераторной установки и тяговых электродвигателей (ТЭД) с приводом на колесные пары. Аварийные ситуации можно предупредить, фиксируя нагрев радиаторных секций охлаждения дизеля. Для этого на них устанавливаются температурные датчики-регистраторы [11, 12]. Крутизна получаемых зависимостей от времени позволяет оперативно определить предаварийное техническое состояние (работоспособность) каждой радиаторной секции. Также целесообразно оценивать степень загрязнённости фильтрующих агрегатов масляной и топливной систем дизеля, износ коренных, шатунных подшипников и соответствующих шеек коленчатого вала дизеля, качество рабочего процесса в цилиндрах дизеля, состояние турбокомпрессора и неисправности в регуляторе частоты вращения коленчатого вала дизеля. Кроме того, рекомендуется температурный мониторинг тягового и вспомогательного генераторов, силовой выпрямительной установки, компрессора, турбовоздуховки.

Применительно к электровозам необходима организация контроля за работой пантографа, высоковольтного трансформатора и других электротехнических узлов. Также требуется осуществлять температурный мониторинг тяговых электродвигателей, редукторных приводов, буксовых узлов, а также ободов колес, которые могут перегреваться от неравномерности распределения тормозного усилия по тормозным колодкам колеса и т. п.

Для пассажирских вагонов следует мониторить узлы ходовой тележечной части вагона, генераторы, редукторы. При этом контролю подлежат следующие параметры [12]: температура букс колесных пар вагона; температура подшипников генератора; температура и уровень масла редуктора; напряжение аккумулятора; напряжение генератора; напряжение в бортовой сети; ток заряда и разряда аккумулятора; выходной ток генератора.

Рассмотрим порядок расчета потребности в бортовых средствах диагностики. Предположим, подвижной состав содержит  $K$  единиц крупных узлов, причем отказы каждого узла не зависят от состояния других. Если вероятность отказа  $i$ -й единицы за время  $t$  описывается зависимостью  $P_i(t)$ , то общая вероятность отказа  $P_n(t)$  при последовательном соединении единиц определится выражением

$$P_n(t) = 1 - \prod_{i=1}^K (1 - P_i(t)). \quad (1)$$

Если подвижной состав следует по перегону за время  $T_n$ , то вероятность хотя бы одного отказа  $P_o$  определится как

$$P_o = 1 - \int_0^{T_n} \left( \prod_{i=1}^K \frac{dP_i}{dt} \right) dt. \quad (2)$$

Существует некоторый норматив безотказной работы подвижного состава, определяющий допустимую норму отказа  $P_{доп}$ . Это означает, что

$$P_o < P_{доп}. \quad (3)$$

Для того чтобы условие (3) выполнялось при заданном времени безотказной работы, необходимо вводить промежуточный контроль через интервалы  $T_k < T_n$ . Определим  $T_k$  исходя из условий  $P_i(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ ,  $i = 1, \dots, k$ :

$$1 - \int_0^{T_k} \left( \prod_{i=1}^K \frac{dP_i}{dt} \right) dt < P_{доп}. \quad (4)$$

Используя статистические данные, можно вычислить  $T_k$ , разлагая в последнем неравенстве экспоненту в ряд Тейлора и отбрасывая члены второго порядка малости при  $T_k \rightarrow 0$ . Отсюда получаем

$$\frac{1}{K} e^{-k\lambda T_k} < P_{\text{доп}}, \quad (5)$$

или

$$T_k < \frac{\ln \left[ \frac{1}{KP_{\text{доп}}} \right]}{k\lambda}. \quad (6)$$

Имея значение  $T_k$ , можно оценить интервалы между осмотрами подвижного состава. Нормативной документацией предусмотрены три вида работ: технические осмотры (ТО), текущие ремонты (ТР) и капитальные ремонты (КР). При этом на время проведения ТР или КР подвижная единица изымается из оборота, а ТО выполняется в пределах графика движения во время стоянок или при формировании поездов. Исходя из графика движения необходимо производить ТО в соответствии с выражением (1), но не реже пунктов остановок. Если время поезда в пути равно  $T_d$ , то число пунктов контроля за время его движения  $N_{\text{пк}}$  определится формулой

$$N_{\text{пк}} = \frac{T_d}{T_k}. \quad (7)$$

Теперь можно определить минимальное количество средств технического контроля и диагностики  $N_{\text{тдк}}$ , необходимых для обеспечения технологии обслуживания подвижного состава

$$N_{\text{тдк}} > SN_{\text{пк}}, \quad (8)$$

где  $S$  – минимально необходимый комплект контрольно-диагностического оборудования на пункте осмотра, гарантированно обеспечивающий безопасное следования подвижного состава на закрепленном участке.

Выражения (4) и (8) не учитывают топологии путей следования поездов, значительно влияющей на динамику движения подвижного состава и его техническое состояние. Для учета существующих разветвлений железных дорог целесообразно использовать метод узловых точек, которыми можно считать узловые станции, на которых разветвляются железнодорожные линии. Очевидно, что каждая узловая станция должна иметь минимальный комплект в составе  $S$  единиц контрольно-диагностического оборудования. Если же по контуру ответвления время движения превышает значение  $T_k$ , то необходимо вводить дополнительные пункты контроля.

Реальное оснащение подвижного состава контрольно-диагностическим оборудованием по количеству диагностируемых узлов и видам локомотивов и вагонов приведено в таблицах 1 и 2 [8]. Из представленного материала видно, что потребное количество средств диагностики намного больше их действительного количества [9].

**Таблица 1 – Анализ применения средств технического контроля и диагностирования подвижного состава**

Группы узлов	Диагностируемое оборудование	Количество измеряемых параметров, предусмотренных требованиями правил ремонта и технологических инструкций	Количество узлов и элементов, подлежащих диагностированию	Количество диагностируемых узлов с применением существующих средств технической диагностики	Возможное число применения средств технической диагностики
1	Механическая часть	64	19	9	11
1.1	Кузова и тележки	8	5	3	4
1.2	Связи кузова с тележками	5	2	0	1
1.3	Колесные пары	16	3	1	1
1.4	Буксовые узлы	4	1	1	1
1.5	Подшипниковые узлы	9	2	2	2
1.6	Редукторы	8	2	2	2
1.7	Рессорное подвешивание	14	3	0	1
1.8	Ударно-тяговые устройства	8	1	0	1
2	Дизельные установки	146	35	12	23
2.1	Блок и рама дизеля	2	2	0	1
2.2	Цилиндровая группа	14	1	0	1
2.3	Коленчатые валы	22	2	0	1
2.4	Шатунно-поршневая группа	15	1	0	1
2.5	Регуляторы частоты вращения коленчатых валов дизелей	7	1	1	1
2.6	Система управления дизель-генераторной установки	–	7	2	4
2.7	Системы наддува воздуха	16	4	2	3
2.8	Топливная аппаратура	27	4	3	4
2.9	Масляная система	–	3	1	2

**Таблица 2 – Оснащение средствами технического контроля и диагностирования основных видов подвижного состава**

Виды подвижного состава	Количество основных серий	Количество унифицированных узлов подлежащих диагностированию	Количество диагностируемых узлов	Количество узлов, для которых возможно применение средств диагностики	Оснащения средствами диагностирования, %
Тепловозы	16	39	23	11	59,0
Дизель-поезда	6	42	4	25	59,5
Вагоны пассажирские	15	35	5	17	14,2
Платформы, полувагоны, крытые вагоны	10	20	5	8	20,0
Цистерны	6	25	6	11	24,0
Вагоны рефрижераторные	3	25	5	4	20,0

Отметим, что в состав диагностического комплекса для оценки деградиционных процессов в деталях и узлах подвижного состава должны входить следующие компоненты:

- средства измерительной техники (датчики-регистраторы) с заданными режимами работы: онлайн или в режиме записи на флеш-носитель;
- телекоммуникационные средства связи для передачи данных результатов измерений получателю информации;
- автоматизированные средства обработки полученной информации и представление информации в удобном формате для анализа;
- средства для архивации и ведения статистических наблюдений.

При проектировании автоматических систем технической диагностики подвижного состава следует конкретизировать числовые значения параметров, определяющих момент наступления предельного технического состояния, реализовать необходимый уровень погрешности проводимых измерений. Также важно разработать методику получения прогнозных оценок развития деградиационных процессов на основе мониторинга статистической информации и расчета остаточного технического ресурса [7].

**Выводы.** Бортовые диагностические установки обеспечивают накопление, хранение и передачу информации в стационарные деповские средства диагностики для прогнозирования остаточного ресурса. Это позволит перейти от планово-предупредительного технического обслуживания к обслуживанию по «техническому состоянию». При этом значительно сократится общий объем трудоемких операций по демонтажу ремонтируемых узлов.

Дальнейшее развитие и оптимизация бортовых диагностических устройств для контроля технического состояния узлов локомотивов и вагонов позволит повысить безопасность и экономическую эффективность эксплуатации железнодорожного подвижного состава.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 **Шухина, Е. Е.** Локомотивные системы обеспечения безопасности / Е. Е. Шухина // Автоматика, связь, информатика. – 2013. – № 2. – С. 2–4.
- 2 **Волков, А. М.** Оценка надежности локомотивных устройств безопасности / А. М. Волков, М. Ю. Дутов // Локомотив. – 2018. – № 4. – С. 17–18.
- 3 **Розенберг, Е. Н.** Комплексные локомотивные системы безопасности / Е. Н. Розенберг, Е. Е. Шухина, Г. К. Кисельгоф // Автоматика, связь, информатика. – 2014. – С. 2–4.
- 4 **Зорин, В. И.** Микропроцессорные локомотивные системы обеспечения безопасности движения поездов нового поколения / В. И. Зорин, Е. Е. Шухина, П. В. Титов // Железные дороги мира. – 2003. – № 7. – С. 25–30.
- 5 **Наговицын, В. С.** Системы диагностики железнодорожного подвижного состава на основе информационных технологий / В. С. Наговицын. – М. : ВИНТИ РАН, 2004. – 248 с.
- 6 **Бурченков, В. В.** Автоматизация контроля технического состояния подвижного состава : учеб.-метод. пособие / В. В. Бурченков. – Гомель : БелГУТ, 2008. – 235 с.
- 7 **Неумоин, В. А.** Учет комплектации грузового вагона средствами комплексной информационной системы вагонного хозяйства / В. А. Неумоин // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2016. – № 4 (48). – С. 2–4.
- 8 **Борjak, К. Ф.** Перспективы внедрения температурного мониторинга для диагностики технического состояния механических узлов подвижного тягового железнодорожного состава / К. Ф. Борjak, С. Л. Волков, Е. С. Шпат // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2014. – № 2. – С. 50–53.
- 9 **Мишин, И. М.** Цифровые технологии для бортового оборудования / И. М. Мишин // Локомотив. – 2018. – № 2. – С. 42–43.
- 10 **Vaičiūnas, G.** Rail vehicle axle-box bearing damage detection considering the intensity of heating alteration / G. Vaičiūnas, G. Bureika, Š. Steišūnas // Maintenance and Reliability. – 2020. – Vol. 22, No. 4. – P. 724–729.
- 11 **Сухорослов, А. С.** Мониторинг нагрева букс / А. С. Сухорослов // Автоматика, связь, информатика. – 2008. – № 6. – С. 47–49.
- 12 **Иванова, Т. В.** Оценка предотказных состояний буксового узла грузового вагона / Т. В. Иванова, Д. Г. Налабордин // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2017. – № 1(49). – С. 46–47.

*V. V. BURCHENKOV, A. A. MARKAVTSOV*  
*Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus*

### ASSESSMENT OF CONDITION AND PROSPECTS OF DIAGNOSTICS IMPROVEMENT OF ROLLING STOCK PARTS AND UNITS

There is given the information about systems for monitoring the technical condition of locomotive and car mechanical devices, the operation conditions and maintenance monitoring of rolling stock critical components are considered. A methodology for assessing the condition of locomotives and cars based on the gradient of increasing degradation processes is formulated. The principles of calculating the required number of diagnostic devices for monitoring the technical condition of rolling stock are considered.

**Keywords:** locomotive diagnostics, thermal monitoring, degradation processes, technical control, predictive assessments of the state.

Получено 03.06.2020