

Бортовой комплекс предиктивной диагностики локомотивов АО «Трансмашхолдинг»



И.А. Синельников,
руководитель проектов
ООО «ТМХ Интеллектуальные Системы»

С 2021 года компания «ТМХ Интеллектуальные Системы» по заказу «Трансмашхолдинга» ведет разработку Бортового комплекса предиктивной диагностики магистральных локомотивов – БКПД. Работы выполняются совместно с ключевыми компаниями холдинга, обладающими опытом и компетенциями в направлении диагностики подвижного состава: «ТМХ Инжиниринг», «ЛокоТех», ВЭЛНИИ и НИИТКД. Для оснащения комплексом БКПД были выбраны локомотивы с микропроцессорными системами управления и наибольшим остаточным сроком службы, выпускаемые заводами «Трансмашхолдинга» и обслуживаемые в рамках контракта жизненного цикла.

Цель работы

Основная цель комплекса БКПД – не только сбор и передача данных о техническом состоянии подвижного состава, но и прогнозирование выхода из строя критически важных узлов. Главными предпосылками создания БКПД являются необходимость повышения надежности локомотивов и улучшение их качественных показателей, таких как коэффициент готовности к эксплуатации, суммарное время пребывания локомотивов в ра-

ботоспособном состоянии, суммарное время пребывания локомотивов в неработоспособном состоянии в связи с их плановыми техническим обслуживанием и ремонтом. Для конечного заказчика в лице ОАО «РЖД» комплекс должен способствовать обеспечению бесперебойности перевозочного процесса, что должно сократить издержки, связанные с возникновением отказов оборудования локомотива в эксплуатации.

Этапы разработки

На первом этапе был проанализирован список узлов и агрегатов, отказ которых приводит к остановкам на линии или оказывает влияние на безопасность. Затем было выполнено ранжирование, основанное на их влиянии на показатели надежности локомотива. В ТОП-5 критичного оборудования электровозов вошли: электрооборудование силовых цепей; узлы экипажной части и механическое оборудование; тяговые электродвигатели; тормозное и пневматическое оборудование; электронное оборудование. В случае тепловозного парка к ним добавляется дизель-генераторная установка.

Вторым этапом для разработки и внедрения нового технического решения является оценка потенциальных экономических эффектов. Чтобы проанализировать влияние БКПД на показатели надежности парка локомотивов, «ТМХ Интеллектуальные Системы» совместно с сервисной организацией ведут подготовку изменений в существующие бизнес-процессы. Для разработки технико-экономического обоснования применения БКПД и оценки его влияния на стоимость жизненного цикла локомотива необходимо оцифровать непроизводительные издержки от отказов

технических средств. Для этих целей компания «ЛокоТех» разработала специальную методику для оценки потерь, связанных с простоем локомотивов на ремонте. Эти потери включают в себя выплаты штрафов собственникам подвижного состава, затраты на устранение отказов и неисправностей оборудования, когда локомотив направляется на неплановый ремонт или на выполнение дополнительных работ.

В соответствии с утвержденной методикой расчета экономических эффектов от конструктивных решений, реализуемых при проектировании новых локомотивов и направленных на достижение абсолютной безотказности локомотивов в эксплуата-

ции, ОАО «РЖД» терпит издержки по причине нарушения сроков доставки грузов, необходимости содержания дополнительных локомотивных бригад, штрафов за опоздание пассажирских поездов и пр. Оценку величины эффектов от применения БКПД для всех участников перевозочного процесса планируется завершить в первой половине 2024 года.

Третьим этапом создания БКПД стала научно-исследовательская работа, результаты которой позволили определить наиболее перспективные методы предиктивной диагностики различных групп оборудования локомотивов, очертить будущий технический облик комплекса.

Установка системы и проведение испытаний на электровозе 2ЭС5К № 405

На полигоне Октябрьской железной дороги в условиях Крайнего Севера проведены испытания решения по диагностике колесно-моторных блоков на электровозе 2ЭС5К № 405. На буксовые узлы и на щиты моторно-якорных подшипников установлено 32 датчика виброускорения, а также 8 датчиков тока для измерения токов тяговых электродвигателей с высокой частотой дискретизации.

Преследовалось несколько основных целей:

- подтверждение отсутствия ложных срабатываний комплекса;
- подтверждение корректности работы заявленных алгоритмов;

- апробация в условиях реальной эксплуатации и сурового климата.

Ключевым технологическим нововведением является применение методов вибродиагностики и диагностики по тяговому току в онлайн-режиме, которое позволяет выявлять на ранних стадиях самые разные дефекты, в том числе некорректную работу подшипников качения, шестерней, неисправности электромагнитной системы тяговых электродвигателей. В области вибродиагностики техническое состояние контролируемых узлов определяется на основе трех групп вибраций, которые различаются по своему происхождению. Это периодические вибрации, вызванные износом и пере-



Рис. 1. Установка датчиков виброускорения



Рис. 2. Дефекты дорожки качения наружного кольца

косами в подшипниковом узле, случайные вибрации, возникающие из-за сил трения в результате нарушения масляного слоя на поверхностях трения, а также импульсные вибрации, вызванные ударами в подшипнике при возникновении износа металла на его рабочих поверхностях.

Разделение вибрации на составляющие производится в онлайн-режиме с использованием специально разработанных алгоритмов. В этих алгоритмах учитывается ряд особенностей формирования вибрации колесных пар в точках контакта с рельсом: периодической и ударной – при неровностях бандажа и движении в кривых, случайной и импульсной – при неровностях рельсов и на их стыках.

“ Для подтверждения работоспособности алгоритмов в экипажную часть электровоза были внесены искусственные неисправности на основании утвержденной всеми участниками перевозочного процесса программы и методики испытаний.

Общий пробег электровоза с установленной системой предиктивной диагностики на данный момент превышает 200 тысяч километров, за это время не удалось выявить естественно развитых значительных дефектов, которые потребовали бы принятия мер для вывода локомотива из эксплуатации. Выявлены только незначительные вмятины на внутреннем кольце и риски на наружном

кольце подшипника, следы неравномерного износа на внутреннем и наружном кольцах наружного подшипника. Эти дефекты были подтверждены на ранней стадии развития в ходе проверки и не угрожали безопасности движения, их устранили при очередном техническом обслуживании.

Для подтверждения работоспособности алгоритмов в экипажную часть электровоза были внесены искусственные неисправности на основании утвержденной всеми участниками перевозочного процесса программы и методики испытаний:

- дефект буксового подшипника (установка наружного кольца с естественным дефектом в виде раковин и выкрашивания металла на поверхности качения);
- дефект смазки буксового подшипника (запрессовка обводненной смазки);
- дефект смазки зубчатой передачи (отсутствие смазки).

Дефект буксового подшипника имитирован путем замены исправного наружного кольца подшипника на наружное кольцо с естественным дефектом, как показано на рисунке 2.

Данный буксовый подшипник был осмотрен и признан непригодным для дальнейшей эксплуатации. Дефектное наружное кольцо установлено на наружный подшипник буксового узла второй колесной пары, подкаченной под секцию № 1 локомотива 2ЭС5К № 405.

С целью имитирования дефекта смазки буксового подшипника приготовлена дефектная смазка «Буксол», к которой в пропорции три к одному была добавлена вода. Согласно требованиям инструкции 01.ДК.421457.001, в пластинчатой смазке «Буксол», допускается массовая доля воды не более 1%. Для определения массовой доли содержания воды в приготовленной дефектной смазке был отобран и передан в Октябрьскую химико-технологическую лабораторию ОАО «РЖД» образец. Согласно заключению, массовая доля содержания воды составила в ней 5,2%. Полученная «дефектная смазка» была запрессована в левый буксовый узел 3-й колесной пары секции № 2 локомотива 2ЭС5К № 405.

Для имитирования дефекта смазки зубчатой передачи в ее кожуе был произведен

слив масла ОС-3 через заправочную горловину с правого кожуха 2-го колесно-моторного блока секции № 2 локомотива 2ЭС5К № 405.

Перед проведением опытной поездки специалисты компаний «ЛокоТех-Сервис» и «Ассоциация ВАСТ» в условиях депо провели вибрационную диагностику колесно-моторных блоков электровоза 2ЭС5К № 405 диагностическими комплексами «Вектор-2000 вибронализатор СД-23 №039» и ОМСД. По результатам выявлен сильный дефект наружного кольца буксового подшипника.

Дополнительно перед началом испытаний представители «ЛокоТех-Сервиса» провели замер диаметра бандажей колес электровоза. Данная работа проводилась для оценки корректности работы программного обеспечения, которое позволяет рассчитывать диаметр бандажей колесных пар под секцией локомотива, а также определять разницу диаметров бандажей колесных пар относительно первой колесной пары.

Опытная поездка резервом (без вагонов) с дефектами колесно-моторных блоков протяженностью 184 км была произведена по маршруту Кандалакша – Апатиты – Кандалакша. С целью недопущения критического развития дефектов буксовых узлов осуществлялся температурный контроль подшипниковых узлов колесно-моторных блоков, измерение проводилось тепловизором. Превышения допустимых пороговых значений температуры дефектных буксовых узлов за время опытной поездки не выявлено, температура не превышала 30 оС. После окончания испытательной поездки колесно-моторные блоки локомотива были восстановлены до исходного технического состояния, устранены внесенные дефекты, что подтверждено

результатами стационарной вибрационной диагностики.

По итогам анализа результатов опытной поездки средствами бортового комплекса предиктивной диагностики в ходе опытной поездки выявлены средние дефекты смазки зубчатой передачи и буксового узла, а также сильный дефект поверхности подшипника. Для подтверждения корректности работы программного обеспечения по определению диаметров бандажей колесных пар и разницы диаметров бандажей колесных пар относительно первой колесной пары комиссия приняла решение о необходимости проведения дополнительных испытаний.

Одновременно с этим на электровозе 2ЭС5К № 405 проведена работа по сбору данных и апробации решения по диагности-

“ **Опытная поездка резервом (без вагонов) с дефектами колесно-моторных блоков протяженностью 184 км была произведена по маршруту Кандалакша – Апатиты – Кандалакша.**

ке работы аккумуляторной батареи (АКБ) электровоза по показаниям тока, напряжения и температуры. На основе регистрируемых данных делается заключение об ошибках при заряде, включая перегрев, ошибках в токоограничении, терморазгоне, возникновении короткого замыкания при разряде, включая глубокий разряд, отрицательном балансе энергии, перегреве, а также изменении фактической емкости АКБ.

Испытания подсистемы диагностики тягового электродвигателя НБ-514Е

В связи с невозможностью испытаний с внесением дефектов в тяговый электродвигатель НБ-514Е (ТЭД) в условиях реальной эксплуатации было принято решение о проведении натурных экспериментов на испытательной базе ВЭЛНИИ. В ходе разработки программы и методики стендовых испытаний специалистами «ТМХ Интеллек-

туальные Системы» совместно с разработчиками ТЭД проанализирована статистика отказов тяговых электродвигателей электровозов 2ЭС5К, 3ЭС5К, 4ЭС5К, выявлены основные неисправности, в том числе перебросы электрической дуги, неисправности коллекторно-щеточного аппарата, нарушения, допущенные при монтаже, термические

повреждения и снижение сопротивления изоляции. Имитация некоторых неисправностей, таких как подгар пластин коллектора, задиры коллекторных пластин, понижение или пробой сопротивления изоляции водой и межламельное замыкание, приводят к необходимости значительных материальных затрат для восстановления ТЭД, поэтому они были исключены из программы испытаний.

Учитывая риски материальных потерь, в программе испытаний предусмотрены только те неисправности, которые могут быть устранены без значительных затрат, в том числе:

- увеличение усилия нажатия пальцев щеткодержателя на щетки;
- уменьшение усилия нажатия пальцев щеткодержателя на щетки;
- смещение траверсы относительно нейтрали;
- работа тягового электродвигателя с дефектными электрографитными щетками (сколы, высота щетки менее 25 мм);
- ослабление главного полюса;
- ослабление дополнительного полюса.

Для осуществления испытаний ТЭД НБ-514Е был оборудован датчиками вибрации,

тока и оборотов. Работа измерительного оборудования в режиме непосредственной нагрузки на постоянном токе по схеме взаимной нагрузки при напряжении 1 000 В, $\beta = 48\%$ с постепенным изменением силы тока в диапазоне от 260 до 870 А.

Испытания подсистемы диагностики ТЭД проводились в трех режимах работы – 30, 50 и 100% от максимальной нагрузки.

Успешно подтверждена возможность выявления следующих неисправностей:

- увеличение усилия нажатия пальцев щеткодержателя на щетки (с 16,2 до 20,35 Н);
- уменьшение усилия нажатия пальцев щеткодержателя на щетки (с 16 до 7 Н);
- смещение траверсы относительно нейтрали по и против часовой стрелки на 3/5 коллекторных деления;
- ТЭД с дефектными электрографитными щетками (без притирки);
- ослабление главного полюса на 0,5/1 оборота;
- ослабление дополнительного полюса на 0,5/1/1,5 оборота болта крепления.

По определенным имитируемым дефектам подсистема предиктивной диагностики однозначно не определяла конкретную неисправность, а выдавала информацию об общей неисправности ТЭД без конкретизации дефекта. Для повышения точности постановки диагноза в реальных условиях при эксплуатации локомотива в БКПД будут применяться алгоритмы статистического анализа данных, которые должны исключить ложные срабатывания системы и повысить достоверность диагностики.

“**Учитывая риски материальных потерь, в программе испытаний предусмотрены только те неисправности, которые могут быть устранены без значительных затрат.**”

Испытания подсистемы диагностики токоприемника электровоза ЭП2К

В рамках выполнения работы проведено исследование принципов построения подсистемы диагностики токоприемника в целях мониторинга и прогнозирования его технического состояния, разработаны технические требования к оборудованию. Решение о диагностике токоприемника основано на применении в автоматическом режиме технологии машинного зрения.

Изготовленный макет подсистемы диагностики токоприемника (ПДТ) был уста-

новлен на локомотив ЭП2К № 431 для осуществления сбора данных в «теневом режиме» для последующего обучения нейронных сетей. Осуществлен сбор данных при различных погодных условиях и параметрах освещенности со скоростью 10 кадров в секунду разрешением 3840×2160 пикселей. В процессе эксплуатации имели место факты ухудшения качества изображений ввиду загрязнения объективов камер продуктами истирания графитовой встав-

ки токоприемника при ее взаимодействии с контактной сетью, на этом основании сформированы требования к дополнительному технологическому процессу очистки камер при техническом обслуживании электровоза.

После завершения обучения нейронных сетей были проведены испытания для подтверждения возможности определения следующих параметров токоприемника с использованием технологии машинного зрения:

- толщина вставки с абсолютной погрешностью не более 1 мм;
- выход токоприемника за габарит;
- механические повреждения рамы, каретки, полоза, угольной вставки, опорных изоляторов;

Результаты и планы

На основании результатов описанных работ сформированы технические требования к диагностике критических узлов локомотивов. В реализацию опытно-конструкторских работ для магистральных грузовых электровозов 2ЭС5К, 3ЭС5К, 4ЭС5К включены только успешно апробированные решения по предиктивной диагностике колесно-моторных блоков, аккумуляторных батарей. Встраивание в конструкцию серийно производимого электровоза предполагает интеграцию с микропроцессорной системой управления МСУД и системой автоведения ИСАВП-РТ.

В рамках опытно-конструкторской работы планируется доработать программное обеспечение модуля «Ковчег-М» для передачи результатов работы БКПД по беспроводному защищенному каналу с использованием Системы технологической ремонтно-оперативной радиосвязи ОАО «РЖД» на базе сетей подвижной связи стандарта GSM (POPC GSM). Также необходимо доработать вычислительные мощности ОАО «РЖД», включая сервера Главного вычислительного центра, отвечающие за прием и передачу данных с локомотивов, для использования данных БКПД в Автоматизированной системе управления надежностью локомотивов на базе информацион-

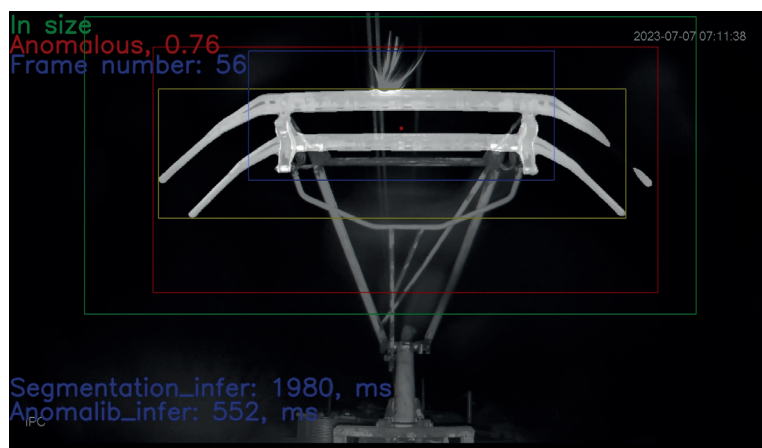


Рис. 3. Фиксация факта нарушения контакта токоприемника в ночное время

- регистрация фактов нарушения контактирования вставки с контактным проводом в движении.

ных систем АСУ СГ. Результаты работы БКПД предназначены для включения в диагностические карты АСУ СГ и использования для назначения работ при плановом и внеплановом техническом обслуживании. Опытно-конструкторские работы для электровозов 2ЭС5К, 3ЭС5К, 4ЭС5К планируется завершить до конца 2024 года.

Параллельно с реализацией опытно-конструкторских работ в «Трансмашхолдинге» инициируется проект по развитию функционала БКПД на все критические узлы локомотивов, в первую очередь силовых цепей, вспомогательных машин, дизель-генераторной установки и тормозного и пневматического оборудования.

Важным аспектом развития направления бортовых систем предиктивной диагностики является стратегия максимальной импортонезависимости с максимальной локализацией компонентов. Для этих целей разработаны макеты полностью отечественных датчиков тока и виброускорения, в перспективе планируется довести адвалорную долю до 80%.

В соответствии со стратегией «Трансмашхолдинга» к серийному оснащению локомотивов Бортовым комплексом предиктивной диагностики планируется приступить с 2025 года. (S)