

КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ПРЕДИКТИВНОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Д.В. ПРОСТОСЕРДОВ,
ООО «ТМХ Интеллектуальные Системы»,
инженер по диагностике

А.В. СКЛЯР,
ОАО «Научно-исследовательский институт технологии,
контроля и диагностики железнодорожного транспорта»
(ОАО «НИИТКД»), начальник отдела разработки
электронных систем,
кандидат технических наук

В СВЯЗИ с постоянно растущими объемами перевозок по Восточному полигону повышаются требования к надежности работы тягового подвижного состава (ТПС). Она напрямую зависит от качества его технического обслуживания и ремонта, во время которых выполняется, в частности, диагностика технического состояния локомотивов. Сейчас этот процесс носит плано-предупредительный характер.

Очевидно, что такой подход не позволяет заранее оценивать остаточный ресурс узлов и агрегатов ТПС и планировать объем дополнительных работ при ремонте. В целях устранения этой проблемы все более широкое применение получают бортовые системы диагностики, способные непрерывно контролировать состояние узлов и агрегатов в процессе эксплуатации локомотива.

Одним из профильных направлений деятельности АО «Трансмашхолдинг» является проектирование, внедрение и развитие бортовых систем диагностики, которые применяются на подвижном составе собственного производства. В текущем году приступи-

ли к оснащению первыми образцами бортового комплекса предиктивной диагностики (БКПД) 10 электровозов серии ЗЭС5К «Ермак».

БКПД позволяет оценивать функционирование вращающихся деталей и узлов экипажной части, коллекторных тяговых электродвигателей (ТЭД) и аккумуляторных батарей, а также рассчитывать производительность компрессора и др. Все это выполняется с применением математических алгоритмов обработки исходной информации, получаемой от сенсоров подсистемы вибро- и токового мониторинга БКПД, а также от микропроцессорной системы управления и диагностики (МСУД) электровоза.

На текущий момент основной функционал БКПД состоит в выполнении вибро- и токовой диагностики. Однако его можно расширить, добавив мониторинг состояния изоляции обмоток тяговых электродвигателей.

В целях решения этой задачи специалистами ОАО «НИИТКД» и ООО «ТМХ Интеллектуальные Системы» разрабатывается комплексный метод бортовой диагностики и мониторинга технического состояния коллекторных тяговых электродвигателей постоянного тока, адаптированный для применения в процессе эксплуатации локомотива. Для определения их остаточного ресурса выделены два основных подхода к анализу диагностических признаков — статистический и спектральный.

Статистический подход подразумевает создание модели деградации узла электродвигателя и накопление диагностических признаков по определенным критериям.

Спектральный подход, являющийся базовым, основыва-



Проверка программного обеспечения БКПД перед запуском

ется на поиске особых спектральных составляющих в токе якоря ТЭД, возникающих при той или иной неисправности. Наличие спектральных компонент неисправностей, их уровень в амплитудном спектре, а также глубина модуляции сигнала могут свидетельствовать о развитии дефекта в конкретный момент времени. Преимуществом этого подхода является возможность получения детальной информации о типе и степени развития неисправности в текущий момент. Однако он применим только при оптимальном скоростном режиме движения локомотива и оптимальном режиме нагружения его электродвигателей.

В комплексном методе рассмотрены три способа диагностики: вибродиагностирование механической системы тягового электродвигателя, спектр-токовая диагностика его электромагнитной системы и мониторинг состояния изоляции его обмоток.

Вибродиагностирование. По результатам предварительных исследований сигналов вибрации, зафиксированных при вибродиагностировании механической системы тягового электродвигателя в процессе движения электровоза 2(3)ЭС5К, специалисты ОАО «НИИТКД» пришли к выводам о необходимости использования алгоритмов и методик расчета усредненных трендовых значений параметров вибрации за длительный период наблюдения, а также признаков, характеризующих отклонения всех однотипных параметров от их средних значений.

Было установлено, что наиболее целесообразно применять спектральный анализ сигналов виброускорения, позволяющий находить неисправности контролируемых деталей узлов. При этом разработанные алгоритмы дают возможность отфильтровывать влияние внешних воздействий.

Для адаптации классического метода спектрального анализа вибрации, который выполняется в стационарных условиях сервисного локомотивного депо, к использованию в условиях движения локомотива потребовалось разработать ряд алгоритмов, самыми сложными из которых являются алгоритмы проверки применимости данных для анализа сигналов вибрации и фильтрации сигнала с учетом процесса взаимодействия в системе колесо — рельс.

Рассмотрим более подробно суть разработанных алгоритмов. Значительные аномалии данных в регистрируемом сигнале изменительного канала могут быть вызваны, в частности, воздействием внешней среды, в первую очередь, при взаимодействии колесной пары и рельсовой колеи, особенно в момент прохождения рельсовых стыков. Определение событий, связанных с взаимодействием в зоне контакта колеса и рельса, является наиболее сложной задачей. Для ее решения был разработан специальный метод фильтрации аномальных сигналов вибрации контролируемых узлов.

Для фиксации подобных событий необходимо проанализировать сигнал виброускорения по трем параметрам. Первый

из них — превышение установленного порога расчетными значениями эксцесса¹, определяется по формуле

$$\frac{\mu_4}{\sigma_4} - 3 > E_{kp},$$

где μ_4 — четвертый центральный момент²; σ_4 — дисперсия случайной величины; E_{kp} — пороговый уровень эксцесса.

Второй параметр — превышение параметром «пик-пик»³ выборки сигнала виброускорения порогового уровня:

$$A_{\max} - A_{\min} > A_p,$$

где $A_{\max}$ и $A_{\min}$ — максимальная и минимальная амплитуды сигнала; A_p — пороговый уровень.

Третьим параметром является превышение амплитудой гармоники спектра выборки сигнала виброускорения на частоте 1 Гц ($B_{1\text{Гц}}$) установленного порога гармоники B_p :

$$B_{1\text{Гц}} > B_p.$$

Пороговые уровни параметров в этих формулах определяются экспериментально или статистически.

Спектр-токовая диагностика ТЭД. Особенностью применения этого способа является необходимость разработки алгоритмов фильтрации гармоник питающего напряжения, учета индуктивности цепи питания тягового электродвигателя и выбора оптимальных режимов его нагружения. Для верификации способа была создана имитационная модель двигателя НБ-514 электровоза серии 2(3)ЭС5К «Ер-

¹ Эксцесс — это характеристика отклонения плотности вероятности от нормального распределения, позволяющая оценивать неслучайные колебания в подшипнике, возникающие из-за дефектов.

² Четвертый центральный момент — это статистическая характеристика, описывающая «крутость» (островершинность или плосковершинность) распределения данных. Проще говоря, она показывает, насколько резко или полого поднимается пик гистограммы по сравнению с нормальным распределением.

³ Параметр «пик-пик» — это разница между максимальным (положительным) и минимальным (отрицательным) значениями амплитуды сигнала.

мак», позволяющая имитировать в лабораторных условиях совместное функционирование выпрямительно-инверторной установки локомотива и якорной цепи ТЭД, а также учитывать массо-инерционные свойства состава. Она дала возможность проверить достоверность алгоритмов диагностирования по потребляемому току в различных режимах движения состава — разгон, выбег, торможение.

Входными данными модели являются задаваемый уровень развития дефектов в двигателе и алгоритмы из программ управления локомотивом, а выходными — выборка сигнала тока якоря с заданными в алгоритме дефектами двигателя и сигнал частоты вращения колесной пары от датчика пути и скорости.

Нужно принимать во внимание тот факт, что диагностика ТЭД невозможна по ряду причин в режимах рекуперации и выбега. В частности, при переходе ТЭД в генераторный режим спектральная картина тока якоря изменяется и не отражает его техническое состояние, поскольку в таком режиме спектр тока якорной цепи определяется характером нагрузки потребителя напряжения, вырабатываемого электродвигателем.

Мониторинг состояния изоляции обмоток ТЭД. Следует отметить, что весьма эффективная во многих вопросах спектр-токовая диагностика не позволяет осуществлять такой вид мониторинга, поскольку состояние изоляции обмоток напрямую не влияет на гармонический состав тока. Для решения этой задачи специалисты ОАО «НИИТКД» рассматривают перспективы применения дифференциальных датчиков тока, которые широко используются для контроля его утечек в обмотках асинхронных электродвигателей.

Суть такого подхода заключается в контроле соотношения значе-

ний тока на входе и выходе якорной обмотки. При отсутствии его утечек на корпус двигателя оно будет равно единице, а в противном случае — уменьшится, что может быть зафиксировано специальными дифференциальными датчиками тока.

Подводя предварительный итог, нужно отметить, что помимо диагностики текущего состояния тяговых электродвигателей требуется оценивать еще и их остаточный ресурс, для чего необходимо анализировать влияние окружающей среды (температуру, определяющую тепловой режим работы ТЭД, влажность воздуха, влияющую на ресурс изоляции, особенности инфраструктуры, приводящие к сверхнормативной вибрации двигателя, и др.), а также режимов ведения поезда, от которых зависит скорость износа узлов ТЭД. И это далеко не полный список влияющих факторов.

Для практической реализации представленного комплексного метода следует иметь возможность получения системой диагностирования достаточного объема необходимых данных. Частично их могут предоставить уже имеющиеся бортовые системы управления и диагностики, но для получения некоторых параметров потребуется реализовать дополнительные каналы измерений. Преимуществом системы БКПД является наличие универсальной шины передачи данных, выстроенной на основе Ethernet-протокола, что позволяет без существенных доработок дооснащать комплекс модулями контроля температуры, давления, дискретных сигналов и др.

В целях верификации комплексного метода диагностирования тяговых электродвигателей запланирован ряд опытных поездов на электропоездах 2(3)ЭС5К «Ермак». По результатам проведенной работы планируется со-

здать базу диагностических данных о работе подконтрольных узлов этих электропоездов при различных режимах эксплуатации.

Главенствующую роль в развитии систем предиктивной диагностики будет играть процесс накопления информации в течение всего жизненного цикла тягового подвижного состава. Критически важно приступить к его реализации как можно скорее и на значительном числе локомотивов, что даст возможность в кратчайшие сроки накопить библиотеки данных и сформировать базу знаний о работе подконтрольных узлов. Полученные сведения позволят совершенствовать диагностические и прогнозные модели алгоритмов работы бортовых систем диагностики. Сейчас эта задача может решаться с помощью БКПД, который находится в опытной эксплуатации на электропоездах 3ЭС5К. В дальнейшем планируется начать его внедрение и на других перспективных сериях тягового подвижного состава.

Широкое внедрение бортовых систем предиктивной диагностики на локомотивах будет способствовать существенному сокращению числа неплановых ремонтов и замен дорогостоящего оборудования благодаря обнаружению проблем на начальных стадиях их возникновения. Кроме того, оно приведет к снижению эксплуатационных расходов депо за счет выполнения части функций диагностики, контроля и выявления недостатков уже не в ручном режиме, а в автоматическом, реализуемом на борту локомотива. К тому же применение указанных технических средств в перспективе обеспечит переход от планово-предупредительного метода обслуживания локомотивов к их обслуживанию по состоянию, значительно повысив эффективность этого процесса.