

DOI: 10.25728/avtprom.2020.10.07

МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

А.И. Александров, Н.Г. Кварацхелия (ООО «Центр 2М»)

Описана система предиктивной диагностики технического состояния электродвигателей, приведены ее состав и структура, проведен анализ факторов, влияющих на точность прогнозов, формируемых системой, представлены результаты испытаний системы на данных, полученных от реальных объектов. Предложены организационно-технические мероприятия, позволяющие промышленным предприятиям повысить безопасность эксплуатации и эффективность использования сложного оборудования, в состав которого входят электродвигатели.

Ключевые слова: предиктивное обслуживание, обслуживание по состоянию, система технического обслуживания и ремонта, анализ данных, большие данные, физико-математическое моделирование, наука о данных.

Интеллектуальная система предиктивной аналитики «Агат»

В промышленных отраслях России и мира в последние годы востребованы интеллектуальные системы, относящиеся к классу предиктивной аналитики. Предиктивная аналитика — научная дисциплина, которая изучает методы и способы составления прогнозов. Используя данные о прошлом и текущем состоянии технического объекта, системы предиктивной аналитики могут достаточно точно рассчитать характеристики этого объекта в будущем. Точные прогнозы будущих событий позволяют предотвратить значительное число аварий и отказов, снизить тяжесть последствий аварий, перейти от планово-предупредительного ремонта к ремонту «по состоянию» и в итоге повысить безопасность технических объектов и снизить стоимость их поддержания в исправном состоянии.

Компания «Центр 2М» спроектировала и разработала прототип интеллектуальной системы (ИС) предиктивной аналитики для решения задач мониторинга и прогноза технического состояния электродвигателей (ЭД), входящих в состав сложных комплексов оборудования. Работоспособность таких комплексов во многом зависит от технического состояния электродвигателей, а их диагностика в составе комплексов зачастую бывает затруднена и требует демонтажа двигателей. Система предиктивной аналитики позволяет проводить оценку и строить прогнозы технического состояния двигателей без их останова и демонтажа, используя данные измерительных устройств и информацию об эксплуатации комплексов.

Разработанная система получила название «Агат».

В состав ИС «Агат» входят следующие модули (рис. 1): подготовка данных, электронные формуляры,



Рис. 1. Структурная схема ИС «Агат»

цифровые портреты, статистика, предиктивная аналитика.

Кроме того, ИС «Агат» интегрируется с внешней измерительной аппаратурой, регистрирующей параметры состояния ЭД во время их работы, и с внешними информационными системами класса ЕАМ/ТОиР.

Модуль «Подготовка данных» выполняет первичную обработку данных, поступающих с измерительной аппаратуры, и передает эти данные в модули «Статистика» и «Предиктивная аналитика».

Модуль «Электронные формуляры» служит для сбора и регистрации данных о текущем техническом состоянии двигателей, обнаруженных неисправностях, выполненных работах по техническому обслуживанию и ремонту, заменах и текущей комплектации. Формуляры содержат исторические и актуальные данные на протяжении всего жизненного цикла ЭД. Информация в формуляры должна поступать автоматически из внешних информационных систем класса ЕАМ/ТОиР.

В модуле «Цифровые портреты» регистрируются данные о работе исправного двигателя в различных режимах по результатам стендовых испытаний и в составе комплекса. На основании этих данных формируются и актуализируются динамические модели работы исправного электродвигателя. Динамические модели носят индивидуальный характер и составляются для каждого экземпляра электродвигателя.

В модуле «Статистика» собираются исторические и актуальные данные из электронных формуляров и с измерительной аппаратуры. Собранные данные используются для статистического и параметрического анализа отказов. На их основе формируются эмпирические модели развития предотказных состояний и деградации двигателей. Эти модели передаются в модуль «Предиктивная аналитика».

В основе модуля «Предиктивная аналитика» лежат различные методы машинного обучения и нейронных сетей, которые проводят анализ текущих данных, поступающих с измерительной аппаратуры комплексов, сопоставляют их с цифровыми моделями работы исправного двигателя и эмпирическими моделями развития отказов и формируют прогноз отказов и оценку их рисков.

Прогноз отказов, автоматически сформированный ИС «Агат», передается экспертам для дополнительного анализа и принятия решения о дальнейших действиях, необходимых для предотвращения аварии.

Точность прогнозов ИС «Агат»

Точность и своевременность прогнозов, формируемых ИС «Агат», определяют следующие факторы:

- качество данных измерительной аппаратуры;
- информативность и диагностическая пригодность измеряемых параметров;
- возможность передачи данных измерительной системы в ИС «Агат» в режиме реального времени или во время технического обслуживания;

- объем накопленных статистических данных;
- полнота данных, регистрируемых в электронных формулярах;
- полнота и качество цифровых портретов электродвигателей.

Под качеством данных измерительной аппаратуры и информативностью измеряемых параметров подразумевается наличие достаточного числа независимых измерительных устройств, снимающих текущие параметры состояния ЭД, и точность этих измерений. Чем больше информативных параметров и чем точнее измерения, тем точнее можно оценить текущее техническое состояние двигателя, «поймать» ранние признаки развития предотказных состояний и выявить тренды деградации.

Своевременность прогноза зависит от того, насколько оперативно измеренные значения параметров передаются в ИС «Агат». Чем быстрее поступают эти данные, тем больше времени остается на их анализ и принятие решений, тем больше возможностей для предотвращения отказов. В том случае, если технически возможна передача измерений в режиме реального времени, ИС «Агат» способна проводить их анализ и строить прогноз в течение короткого времени, близкого к реальному.

Объем накопленных статистических данных определяет качество и адекватность эмпирических моделей развития отказов. Эти модели используются для машинного обучения нейронных сетей, поэтому прямо влияют на качество прогнозов. В свою очередь, качество статистических данных зависит от информации, регистрируемой в рамках электронных формуляров ЭД. Чем полнее эти данные, тем точнее статистические модели отказов.

И наконец, большую роль играет математическое ядро ИС «Агат», содержащее «цифровые портреты» исправных электродвигателей при работе в различных режимах. Для создания таких портретов необходимо собрать достаточную статистику о работе ЭД и накопить измерения параметров работы этого двигателя в различных режимах, с разной нагрузкой, в разных условиях эксплуатации. Чем полнее такие портреты, тем лучше обучается нейронная сеть, тем точнее ее прогнозы.

Результаты предварительных испытаний

ИС «Агат» прошла предварительные испытания на реальных данных, полученных в процессе эксплуатации электровозов, в состав которых входили тяговые ЭД. Отметим, что основные подходы и методы, описанные в статье, можно использовать для различных электродвигателей. Основное отличие возникнет на уровне физико-математических моделей, разрабатываемых для конкретных моделей ЭД.

В ходе работы были проанализированы все доступные данные о выявленных неисправностях и ремонтах, заносимые инженерами в используемую информационную систему. Для разработки физи-

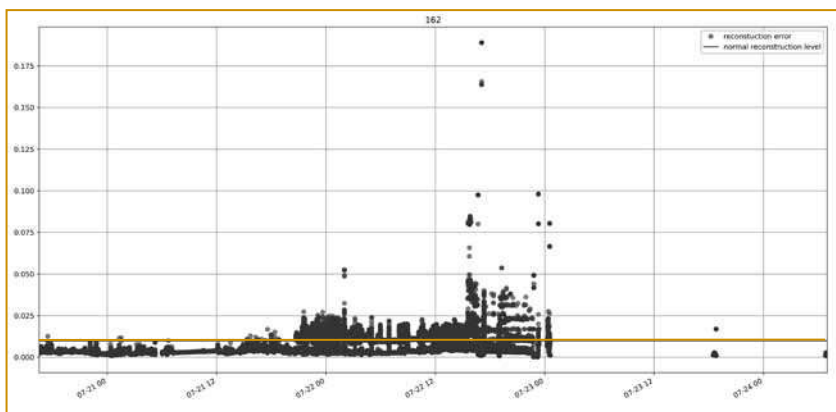


Рис. 2. График оценки исправности наблюдаемого ТЭД №162

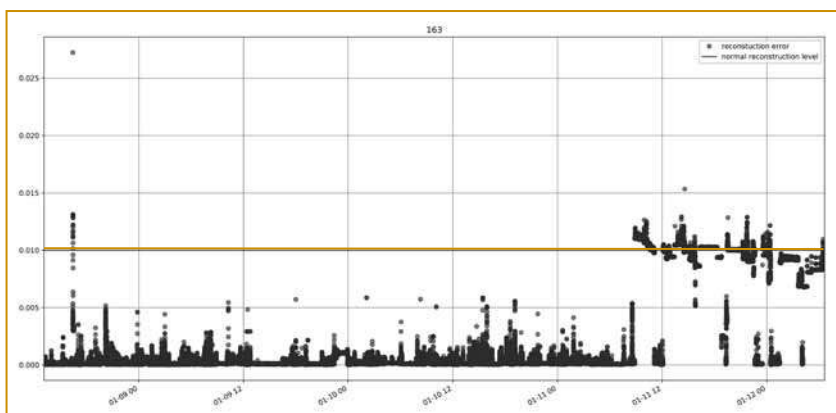


Рис. 3. График оценки исправности наблюдаемого тягового ЭД №163

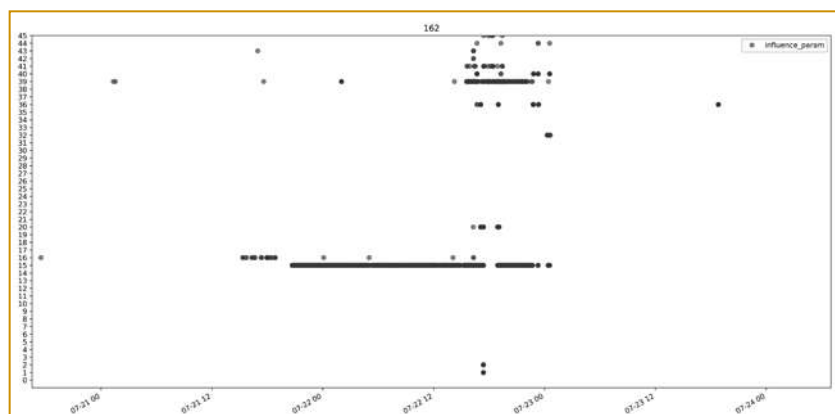


Рис. 4. Восстановление параметров неисправного тягового ЭД №162

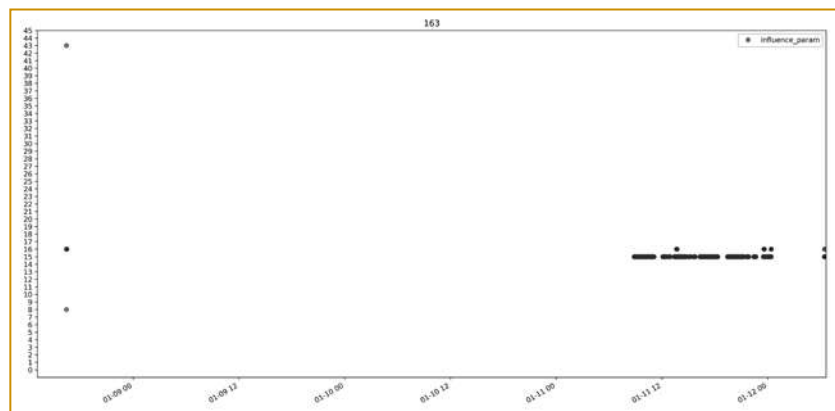


Рис. 5. Восстановление параметров неисправного ТЭД №163

ко-математических и эмпирических моделей работы ТЭД в различных режимах движения локомотивов был проведен анализ реальных данных измерительной аппаратуры, в которые входили 330 сигналов, из них:

- 54 сигнала представляли собой измерения физических параметров состояния электродвигателей и вспомогательного оборудования, таких как токи, напряжения, сопротивление изоляции, температура, параметры работы охлаждающих устройств и т. п.;
- 276 сигналов представляли собой информацию о срабатывании устройств автоматического управления комплексом, таких как переключение режимов работы двигателей и вспомогательного оборудования, включение/выключение вентиляторов, срабатывание защиты и т. п.

Для разработки моделей по выявлению неисправных тяговых ЭД были использованы данные о работе 300 электровозов.

В ходе анализа данных специалистами «Центр 2М» было установлено, что использование инженерных записей возможно только после детального разбора каждого случая обнаружения неисправности объекта, разработки соответствующих классификаторов и установления связей между классификатором неисправностей с конкретными узлами и деталями объекта [1–2]. Поэтому для разработки основных математических моделей были взяты данные из системы мониторинга объектов. С использованием указанных данных был проведен предварительный анализ сигналов измерительной аппаратуры, выявлено влияние параметров друг на друга, построены эмпирические модели развития отказов и проведено обучение нейронной сети. При построении эмпирических моделей были использованы особенности диагностики ТЭД, приведенные в работах [2–4].

В рамках предварительных испытаний нейронная сеть в составе ИС «Агат» была обучена на оценку исправности ТЭД и выявление неисправных объектов в режиме реального времени. На рис. 2 и 3 приведены графики оценки текущего состояния реальных тяговых ЭД, устанавливаемых на электровоз. По вертикальной оси представлена суперпозиция рас-

смаатриваемых параметров, зафиксированных измерительной аппаратурой, на горизонтальной оси изображена временная шкала вида «ММ-ДД ЧЧ». Если оценка состояния двигателя превышает пороговое значение (горизонтальная линия на уровне 0.010), такой двигатель система отмечает как неисправный.

На рисунках 2–5 представлены два различных примера для 162 и 163 объектов соответственно, номера объектов указаны над графиками. Так, объект 162 вышел за предельную зону аномальности и постепенно вышел на отказ в течение 4-х дней, демонстрируя аномалии сразу по многим параметрам. Объект 163 имеет единичный скачок аномалий в районе 01–0900, после чего началось развитие аномалий преимущественно по одному параметру. Оба графика демонстрируют различный характер развития аномалий, однако в обоих случаях имеется достаточное время для реагирования на неисправный режим работы.

После обнаружения неисправного ТЭД производится восстановление ошибки с фиксацией параметров, которые внесли наибольший вклад в обнаруженное неисправное состояние наблюдаемого двигателя. На рис. 3 и 4 приведены графики, где по вертикали отмечены измеряемые параметры, по горизонтальной оси — время фиксации неисправности.

По выявленным неисправным ТЭД в системе формируется автоматический отчет (с детальным графическим и текстовым описанием), в котором приведены все параметры, включая их значения и время, когда двигатель был отмечен системой как неисправный.

В настоящее время ИС «Агат» способна выявлять предотказные состояния ТЭД, связанные со снижением сопротивления якорной цепи, нарушением коммутации, снижением сопротивления обмоток возбуждения за несколько часов, а в ряде случаев за несколько дней до полного отказа двигателя. Интервал прогноза зависит от вида отказа и скорости деградации двигателя. В рамках предварительных испытаний точность выявления предотказных состояний тяговых электродвигателей составила 87%, а длительность работы объекта от момента выявления неисправности предиктивной системой до отметки об отказе в журналах обслуживающих подразделений составила от 2-х до 14 дней.

Служба мониторинга и прогноза технического состояния комплексов

Анализ факторов, определяющих точность прогнозов ИС «Агат», говорит о целесообразности создания в составе эксплуатирующих организаций специализированных подразделений, отвечающих за мониторинг и прогноз технического состояния парка ЭД.

Цель создания таких подразделений — повышение безопасности эксплуатации и снижение стоимости поддержания парка ЭД в исправном состоянии.

Функции подразделения должны включать:

- мониторинг и прогноз технического состояния ЭД и других технических объектов в составе комплексов;
- разработку и совершенствование интеллектуальных систем предиктивной аналитики;
- формирование и актуализацию «цифровых портретов» работы исправных ЭД и другого оборудования в различных режимах эксплуатации;
- создание и контроль действующей системы регистрации данных в рамках электронных формуляров ТЭД;
- накопление статистических данных по отказам и неисправностям;
- разработку и совершенствование методов статистического и параметрического анализа данных;
- разработку и совершенствование физико-математических и эмпирических моделей процессов развития отказов;
- формирование требований к измерительной системе ЭД и другого оборудования;
- внедрение, развитие и формализацию экспертных методов принятия решений.

В состав такого подразделения должны входить:

- специалисты по эксплуатации, техническому обслуживанию и ремонту ЭД и других технических объектов;
- инженеры-математики, специализирующиеся на статистическом анализе, динамическом моделировании и нейронных сетях;
- ИТ-специалисты в области промышленного Internet вещей и SCADA-систем;
- инженеры-программисты для разработки и развития специализированного программного обеспечения;
- эксперты, принимающие управленческие решения на основании автоматических прогнозов и оценок технического состояния ЭД.

Создание таких подразделений и внедрение интеллектуальных систем предиктивной аналитики позволит решить основные задачи инженерных служб и сервисных организаций, обслуживающих комплексы, в состав которых входят электродвигатели, а именно:

- обеспечит контроль текущего состояния ЭД за счет дистанционной автоматизированной диагностики и построения прогнозов;
- позволит проводить ремонтные работы комплексов не по нормативному графику, а по факту износа оборудования;
- снизит стоимость обслуживания комплексов;
- повысит коэффициент технической готовности комплексов за счет увеличения межремонтного периода и снижения внеплановых простоев.

Выводы

По мере развития технических средств сбора, передачи и обработки больших объемов данных интерес к системам предиктивной диагностики возрастает из-за неоспоримых преимуществ, которые даст переход от классической планово-предупредитель-

ной системы ТОиР к обслуживанию «по состоянию». Разработанная система удаленной диагностики электродвигателей позволяет с достаточной точностью определять неисправные объекты при использовании данных с имеющейся измерительной аппаратуры. Точность выявления предиктивной системой неисправных электрических двигателей во время испытаний составила 87%, а время от выявления неисправности системой до полного или частичного отказа составило от 2-х до 14 дней.

Результаты испытаний подтвердили возможность и необходимость применения разработанной предиктивной системы в задачах оценки рисков эксплуатации технических объектов. Внедряя системы предиктивной аналитики в свои бизнес-процессы, эксплуатирующие и обслуживающие организации могут удаленно от объекта принимать решения, основываясь на оценке его состояния в ходе эксплуатации, и свести к минимуму случаи отказов и поломок, кото-

рые могут повлечь за собой аварии или другие производственные и финансовые потери.

Список литературы

1. *Богданов Е.Л.* Основы технической диагностики нефтегазового оборудования: Учеб. пособие для вузов. /Е. А. Богданов/ — : Высш. шк., 2006. — 279 с: ил.
2. *Галкин В.Г.* Надежность тягового подвижного состава. Учеб. Пособие для вузов ж.-д. трансп. /В.Г. Галкин, В.П. Парамзин, В.А. Четвергов / М.: Транспорт, 1981, 184 с.
3. *Ефанов Д.В.* Контроль параметров стрелочных электроприводов / Ефанов Д. В., Богданов Н.А. // Проблемы безопасности и надежности микропроцессорных комплексов. 2015. С. 118-128.
4. *Костюков В.Н.* Диагностика и мониторинг как основа управления эксплуатацией объектов производственно-транспортного комплекса/Костюков В.Н., Костюков А.В., Казарин Д.В.//Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства: материалы 7-й международной научно-технической конференции. — Омск: Изд-во ОмГТУ, 2017. — С. 181-182.

Александров Артем Игоревич — руководитель департамента ООО «Центр 2М»,
Кварацхелия Нина Георгиевна — канд. техн. наук, ведущий аналитик ООО «Центр 2М», доцент Московского физико-технического института.
 Контактный телефон (966)325-38-24.
 E-mail: aleksandrov.artiom.i@gmail.com kvara_ng@mail.ru

DOI: 10.25728/avtprom.2020.10.08

К ВОПРОСУ О НАДЕЖНОСТНО-ОРИЕНТИРОВАННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ ОБСЛУЖИВАНИИ

И.Н. Антоненко (ООО «НПП «СпецТек»)

В нормативно-технических документах существуют разночтения относительно того, что такое RCM (Reliability-Centered Maintenance) или надежно-ориентированное техническое обслуживание. Это создает предпосылки для заблуждений и мифов об RCM. Представлены основные принципы RCM. В основной части статьи рассматриваются и подвергаются критике заблуждения и мифы об RCM, известные из практики консультационных услуг.

Ключевые слова: надежно-ориентированное техническое обслуживание, управление отказами, система ТОиР.

В 2018 г. исполнилось 40 лет с тех пор, как Стэнли Ноулан и Говард Хип в своем исследовании [1] представили методологию RCM (Reliability-Centered Maintenance). Их основная идея состояла в том, что правила обслуживания оборудования должны определяться последствиями отказа, а не только характеристиками самого отказа. Затем существенный вклад в развитие и популяризацию RCM внес Джон Маубрей [2]. В работе [3] подробно описаны этапы становления и развития RCM.

За прошедшие годы практика применения RCM необычайно расширилась. В России имеются примеры применения RCM в энергетике, нефтепереработке и нефтехимии, в металлургии и других отраслях [4–8]. Большой потенциал имеет RCM в обрабатывающей промышленности. Это связано с потребностью производства, основанного на применении поточных

линий, обеспечить максимальные показатели эффективности использования оборудования (OEE, Overall Equipment Effectiveness).

Отказы технологического оборудования приводят к внеплановым простоям, и как следствие — к снижению OEE и потерям производства. Профилактическое обслуживание позволяет предупредить отказы, но чем чаще оно проводится, и чем больше его объем, тем больше плановые простои, ниже доступность оборудования и меньше эффективный фонд времени работы оборудования. Таким образом, недостаток технического обслуживания, как и его избыток, являются нежелательными. Кроме того, не всегда профилактические работы эффективны, их проведение может не приводить к снижению интенсивности и/или последствий отказов. Отсюда вытекает оптимизационная задача, которая решается в рамках RCM.