

УДК 621.313.3

EDN: UHPLGC

ПРЕДИКТИВНАЯ ДИАГНОСТИКА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Н.А. КирьяновORCID: 0009-0007-9534-5368 e-mail: nikitakiryenov1999@mail.ruРоссийский государственный университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина
*Москва, Россия***А.Н. Комков**ORCID: 0000-0002-1010-6971 e-mail: komkov.a@gubkin.ruРоссийский государственный университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина
Москва, Россия

Приведены результаты исследования в области разработки подхода к реализации предиктивной диагностики (ПД) высоковольтных электродвигателей (ЭД). Применение системы ПД позволяет идентифицировать отклонения параметров ЭД от нормального режима эксплуатации на ранней стадии развития дефектов, тем самым позволяя своевременно и эффективно управлять техническим обслуживанием электродвигателя, что, в свою очередь, повышает надежность оборудования. Проанализирована статистика возникновения отказов на ЭД и рекомендованный перечень по объему технологических измерений. На основании изученных данных сделан вывод, что порядка 85 % дефектов ЭД представляется возможным определить на раннем этапе их развития, тем самым минимизировав вероятность возникновения функционального отказа ЭД. На основе проведенного анализа предложена диагностическая модель ЭД для системы ПД, которая включает в себя электротехнические и механические параметры, что позволяет охватить широкий список дефектов, которые система может идентифицировать. Предложен метод определения отклонений показаний ЭД от нормального режима работы за счет применения методов машинного обучения, основанный на сравнении фактических показаний с датчиков ЭД и расчетных показаний системы ПД, позволяющий заблаговременно и с необходимой точностью проинформировать пользователя о начале развития дефекта. Определены расчетные выражения внутренних уставок системы ПД, ее диагностические правила, являющиеся для пользователя исходной информацией, проанализировав которую, можно проводить превентивные мероприятия по снижению вероятности возникновения отказа, а также заблаговременно планировать техническое обслуживание и ремонт агрегата, не доводя ситуацию до аварийного останова.

Ключевые слова: предиктивная диагностика, система раннего оповещения, высоковольтный электродвигатель, техническое состояние оборудования, повышенные надежности.

Для цитирования: Кирьянов Н.А., Комков А.Н. Предиктивная диагностика высоковольтных электродвигателей // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 2. С. 53-68. EDN: UHPLGC

HIGH-VOLTAGE ELECTRICAL MOTORS PREDICTIVE DIAGNOSTICS

N.A. Kiryanov

ORCID: 0009-0007-9534-5368 e-mail: nikitakiryanov1999@mail.ru

National University of Oil and Gas «Gubkin University»

Moscow, Russia

A.N. Komkov

ORCID: 0000-0002-1010-6971 e-mail: komkov.a@gubkin.ru

National University of Oil and Gas «Gubkin University»

Moscow, Russia

Abstract. The paper presents the research in the field of development of approach to realization of predictive diagnostics (PD) of electrotechnical equipment, namely high-voltage electric motors (EM). The application of the PD system allows to identify the deviations of EM parameters from the normal operation mode at the early stage of defects development, thus allowing effectively manage the electric motor maintenance in due time, which increases the equipment reliability. In the work, the statistics of occurrence of failures in EM and the recommended list on the volume of technological measurements were analyzed. On the basis of the studied data, it is possible to draw a conclusion that about 85% of defects of the EM is possible to determine at an early stage of their development, thereby minimizing the probability of functional failure of the EM. Based on the analysis, a diagnostic model that includes electrical and mechanical parameters of the EM for the PD system is proposed, which allows to cover a wide list of defects that the system can identify. The method for determining deviations of EM readings from normal operation through the use of machine learning methods based on comparison of actual readings from EM sensors and calculated readings of the PD system is defined, which allows to inform the user about the beginning of defect development in advance and with necessary accuracy. The calculated expressions of PD system internal settings and diagnostic rules of the PD system are defined, which is initial information for a user of the system. It is possible to carry out preventive measures to reduce the probability of failure, and also to plan in advance the maintenance and repair of the unit, without bringing the situation to the emergency stop of the unit.

Keywords: predictive diagnostics, early warning system, high-voltage electrical motor, technical condition of the equipment, increasing the reliability.

For citation: N.A. Kiryanov and A.N. Komkov, “High-voltage electrical motors predictive diagnostics”, *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 53-68, 2024. EDN: UHPLGC

1. Введение

В 2016 г. Министерство энергетики Российской Федерации утвердило «Прогноз научно-технологического развития топливно-энергетического комплекса России на период до 2035 года» [1]. В данном документе дана оценка текущего технического состояния топливно-энергетической отрасли и описаны вероятные и оптимальные пути его развития. Для электро-энергетического комплекса определены следующие векторы развития:

- совершенствование комплексов газовой и угольной генерации;
- развитие атомной энергетики;
- развитие гидроэнергетики;
- переход на энергосистему с распределенной генерацией как на основе органических топлив, так и возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ);
- модернизация электрических и тепловых сетей;
- внедрение интеллектуальных систем.

Одним из наиболее перспективных направлений развития топливно-энергетической отрасли является внедрение и применение интеллектуальных систем, в число которых входит система предиктивной диагностики (ПД), позволяющая заблаговременно определять потенциальные проблемы в работе оборудования, тем самым предотвращая отказы или аварии, что, в свою очередь, экономит ресурсы и сокращает время простоя промышленных предприятий.

Анализ работ других авторов позволяет погрузиться в проблематику существующего подхода к эксплуатации и ремонту электротехнического оборудования. В [2] объясняется необходимость перехода от концепции планово-предупредительного ремонта к концепции ремонта по техническому состоянию. В [3] предлагается применять методы машинного обучения для ПД электродвигателей (ЭД). Также в [4] предлагается рассматривать набор электротехнических параметров для проведения диагностики ЭД. Данные исследования подчеркивают актуальность изучения подхода к реализации ПД для высоковольтных ЭД, поскольку для современных промышленных предприятий важно прорабатывать методы повышения надежности данного электротехнического оборудования путем определения потенциальных дефектов на ранней стадии их развития. Однако в данных работах не был предложен универсальный подход к реализации ПД электротехнического оборудования, не был определен необходимый и достаточный объем измеряемых параметров (электротехнических и механических) для построения диагностической модели ЭД, а также отсутствует описание работы математического аппарата поиска отклонений и взаимосвязи изменяющихся параметров диагностической модели ЭД и будущих отказов.

II. Предиктивная диагностика

ПД – набор методов и инструментов, направленных на раннее обнаружение, анализ и прогнозирование отказов оборудования, а также на оценку критичности и вероятности возникновения спрогнозированных отказов. На рис. 1 представлена функциональная схема жизненного цикла оборудования, на которой отмечено место ПД в данном цикле.



Рис. 1. Место ПД в жизненном цикле оборудования (P-F кривая)

Fig. 1. Place of predictive diagnostics in the equipment life cycle (P-F curve)

На рис. 2 представлены типы отказов оборудования в зависимости от интенсивности отказов и срока эксплуатации оборудования.

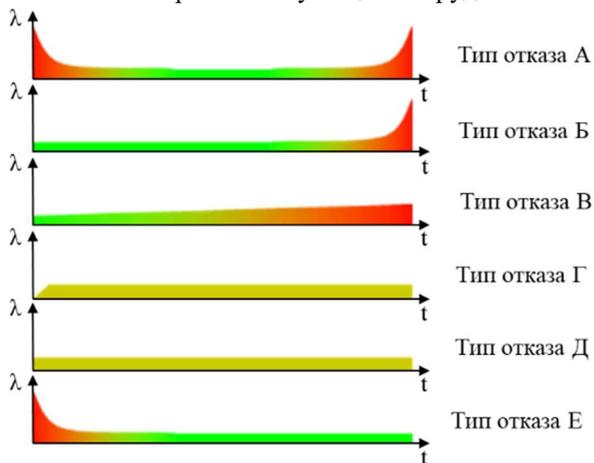


Рис. 2. Типы отказов оборудования в зависимости от интенсивности отказов и срока эксплуатации оборудования

Fig. 2. Types of failures depending on the failure rate and equipment service life

На рис. 2 отображено шесть основных типов отказа. Для каждого из них по оси λ отображается интенсивность отказов, по оси t — срок эксплуатации агрегата. В табл. 1 представлена статистика отказов оборудования в зависимости от типа отказа. Исходя из нее, видим, что лишь 11 % отказов связано с большим сроком эксплуатации оборудования и может быть предотвращено только плановой заменой (типы отказов А, Б, В). Остальные 89 % отказов имеют случайную природу, однако их конкретные проявления могут быть отслежены на раннем этапе [5].

Таблица 1.

Статистика отказов оборудования в зависимости от типа отказа

Table 1.

Statistics of equipment failures depending on the type of failure

Тип отказа	Статистика по типу отказа, %
А	4
Б	2
В	5
Г	7
Д	14
Е	68

Проанализировав статистику отказов в зависимости от возраста оборудования, можно сделать вывод, что концепция планово-предупредительного ремонта (ППР) не обеспечивает должный уровень надежности оборудования, поскольку отказ может случиться в любой момент эксплуатации оборудования [2]. Именно поэтому системы ПД являются востребованными и актуальными: они позволяют не просто осуществлять мониторинг состояния, но и на основе внутренних вычислений прогнозировать будущие отказы оборудования на ранних стадиях развития дефекта, тем самым [6]:

- снижая риски наступления аварийного случая путем перевода большинства отказов из категории внезапных в разряд прогнозируемых;
- снижая затраты на сервисное обслуживание;
- сокращая продолжительность простоев оборудования.

Рассмотрим один из наиболее важных узлов электропривода — ЭД. Крупные ЭД представляют собой капиталоемкий актив нефтегазовой отрасли, выход из строя которого несет за собой большие убытки в совокупности из-за ремонта ЭД и технологического простоя. Исходя из этого, важно держать под постоянным наблюдением данный актив нефтегазовых компаний с целью экономии средств на обслуживание, ремонт, а также для снижения количества внеплановых остановов и потери экономического эффекта производства. Большие наработки в изучении показателей дефектов

ЭД приведены в [7]. На рис. 3 представлена статистика дефектов ЭД от компании ABB.

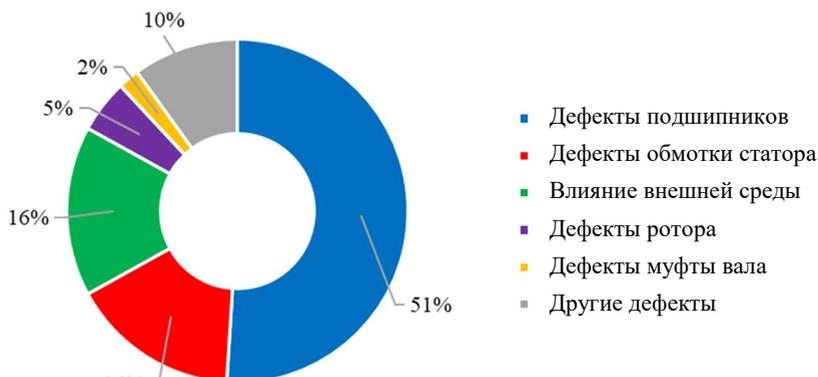


Рис. 3. Статистика дефектов ЭД от компании ABB

Fig. 3. Statistics of EM defects from ABB company

Исходя из предложенной статистики, видим, что 51 % отказов ЭД составляет нарушение функционирования подшипников ЭД (проблемы со смазкой, перегрузки, перегрев, износ подшипников и т.д.), также около 2 % составляют аналогичные отказы в других узлах двигателя. Порядка 16 % отказов работы ЭД вызвано перегревом и перегрузкой по току статора, другие 16 % вызваны влиянием окружающей среды (влажность, температура воздуха, загрязнение). Суммарный процент перечисленных отказов составляет 85 %. Они легко прогнозируются и отслеживаются уже имеющимися системами ПД. В условиях санкционной политики важно заниматься разработкой собственных подходов и программного обеспечения, которое позволит реализовать ПД для отечественных предприятий.

III. Реализация предиктивной диагностики для электродвигателя

ПД ЭД предлагается реализовать на основе отслеживания отклонений параметров от репрезентативных значений, сравнивая прогнозные (расчетные) и фактические значения (вычитание расчетного значения из фактического). На рис. 4 представлена реализация системы ПД ЭД на основе поиска отклонений параметра от репрезентативных значений. Отклонение от нормального режима работы предлагается рассматривать как потенциальный дефект оборудования.

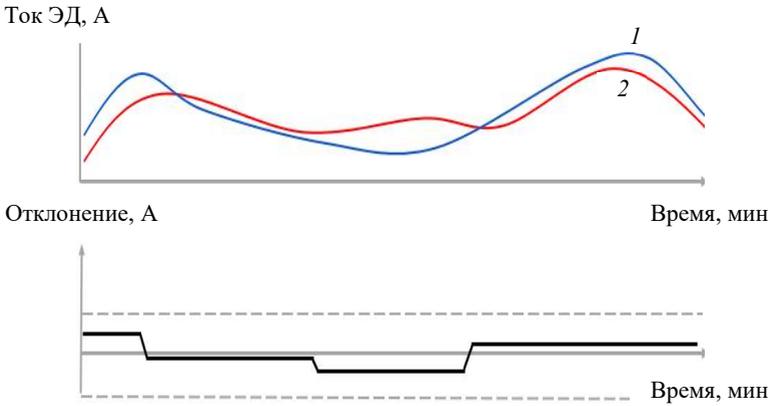


Рис.4 Реализация ПД ЭД:

1 – фактическое значение; 2 – «расчетное» значение

Fig.3 Realization of PD of EM

1 – actual value; 2 – «calculated» value

Система ПД определяет прогнозное (расчетное) значение, основываясь на исторических данных агрегата (векторах), которые являются репрезентативными с точки зрения нормальной эксплуатации оборудования (все параметры находятся в пределах уставок и на оборудовании нет развивающегося дефекта). Под «вектором» подразумевается набор значений датчиков агрегата в определенный момент времени. Применяя машинное обучение, цифровая модель агрегата обучается на репрезентативных векторах, и в дальнейшем, исходя из этих данных, модель рассчитывает прогнозное значение. В табл. 2 представлен пример неотфильтрованных исходных исторических данных ЭД за один час работы с систематизацией по векторам.

Исходя из табл. 2, видим, что за один час работы ЭД датчики показывают разные с точки зрения репрезентативности значения. Например, векторы *A B E F* являются показательными, поскольку все параметры двигателя находятся в пределах номинальных значений, в то время как вектор *C* наглядно показывает, что в это время двигатель работал не в нормальном режиме (работа при пониженном напряжении и повышенном токе ЭД, высокая температура обмоток статора, высокая температура и вибрация в подшипнике). Поэтому модель данного ЭД можно обучить на векторах *A B E F*, чтобы по этим данным система выстраивала прогнозное значение и сравнивала его с фактическими данными. Однако в инженерной практике встречаются примеры, когда показания части датчиков на одном и том же оборудовании являются нормальными с точки зрения эксплуатации, а показания

другой части датчиков – нет. Примером этого служат векторы D и G . Вектор D можно использовать для обучения модели по току ЭД, напряжения ЭД и температуре обмотки ЭД (при недостаточности итоговой выборки исторических данных), однако для обучения механических параметров (температура и вибрация подшипника) этот вектор не подходит, поскольку показатели находятся за пределами номинальных значений.

Таблица 2.
Неотфильтрованные исторические данные ЭД за один час

Table 2.
Unfiltered historical data of EM for one hour

Вектор	Дата/время	Т воздуха, °С	Ток ЭД, А	Напряжение ЭД, В	Температура обмотки А, °С	Температура подшипника, °С	Вибрация подшипника, мкм
A	20.10.22 12:00	5	15	10000	90	70	11
B	20.10.22 12:10	5	15	10000	90	70	12
C	20.10.22 12:20	78	25	9000	150	130	24
D	20.10.22 12:30	4	15	10000	90	130	20
E	20.10.22 12:40	3	15	10000	90	70	12
F	20.10.22 12:50	3	15	10000	90	70	12
G	20.10.22 13:00	NAN	25	9000	90	70	12
Номинальные значения		-	15	10000	70-100	50-80	5-15

Для последующего обучения цифровой модели необходимо отфильтровать исходные исторические данные, чтобы в выборке остались только репрезентативные данные [8]. В табл. 3 представлены отфильтрованные исторические данные ЭД с систематизацией по векторам (обучающая выборка), на основе которых можно обучить цифровую модель ЭД.

Поскольку ЭД – это комплекс электрических и механических систем, которые взаимосвязаны и в равной мере влияют на работоспособность ЭД, предлагается рассматривать все эти системы в модели ПД ЭД, однако выделить их отдельно для удобства диагностирования технического состояния агрегата и удобства обучения модели (векторы, которые имеют разный набор показаний, пример векторов D и G). Проанализировав перечень рекомендуемых технологических измерений [9] и статистику дефектов ЭД, модель ЭД будет состоять из следующих подсистем и сигналов, указанных в табл. 4.

Таблица 3.
Отфильтрованные исторические данные ЭД за один час

Table 3.
Filtered historical data of EM for one hour

Вектор	Дата/время	Т воздуха, °С	Ток ЭД, А	Напряжение ЭД, В	Температура обмотки А, °С	Температура подшипника, °С	Вибрация подшипника, мкм
<i>A</i>	20.10.22 12:00	5	15	10000	90	70	11
<i>B</i>	20.10.22 12:10	5	15	10000	90	70	12
<i>E</i>	20.10.22 12:40	3	15	10000	90	70	12
<i>F</i>	20.10.22 12:50	3	15	10000	90	70	12
Номинальные значения		-	15	10000	70-100	50-80	5-15

Таблица 4.
Набор параметров для диагностической модель ЭД

Table 4.
Set of parameters for the diagnostic model of EM

Электротехническая система ЭД	Механическая система ЭД
<i>Объем рекомендованных измерений</i>	
Температура окружающего воздуха	Температура окружающего воздуха
Влажность окружающего воздуха	Влажность окружающего воздуха
Скорость ротора	Скорость ротора
Ток статора	Температура подшипника (приводная и приводимая сторона)
Напряжение статора	Вибрация подшипника (приводная и приводимая сторона)
Температура обмоток статора	Температура масла на входе в подшипники
Температура сердечника	Перепад давления на масляном фильтре
Частота питающей сети	Температура охлаждающей среды на входе/выходе охладителя
Частичные разряды	Уровень масла в маслобаке
<i>Объем опциональных измерений</i>	
Коэффициент мощности	Температура масла в маслобаке
Активная мощность	Давление масла после маслофильтра
Реактивная мощность	Расход охлаждающей воды
Полная мощность	Температура внутри кожуха двигателя

На рис. 5 представлена функциональная схема системы ПД. На вход системы поступают онлайн-данные с датчиков, установленных на ЭД, из числа тех, которые вошли в диагностическую модель ЭД. На их основании система ПД производит расчет прогнозируемого значения следующим образом: основываясь на методе ближайших соседей, для поступившего онлайн вектора система ПД ищет десять ближайших векторов в отфильтрованных исторических данных, которые были подготовлены и загружены в систему ПД в качестве обучающей выборки, усредняет их и выводит получившийся вектор как прогнозное значение [10]. Далее фактическое значение сравнивается с прогнозным значением, на основании чего формируется вывод о начале развития дефекта или его отсутствия. Система ПД выводит тренды с датчика по каждому параметру. Для каждого параметра выводится три тренда: фактические значения датчиков (синяя линия), прогнозные значения (красная линия), которое система ПД строит исходя из обучающей выборки, и тренд отклонения фактических значений от прогнозных значений (черная линия). Пример набора трендов цифровой модели ПД ЭД показан на рис. 6.

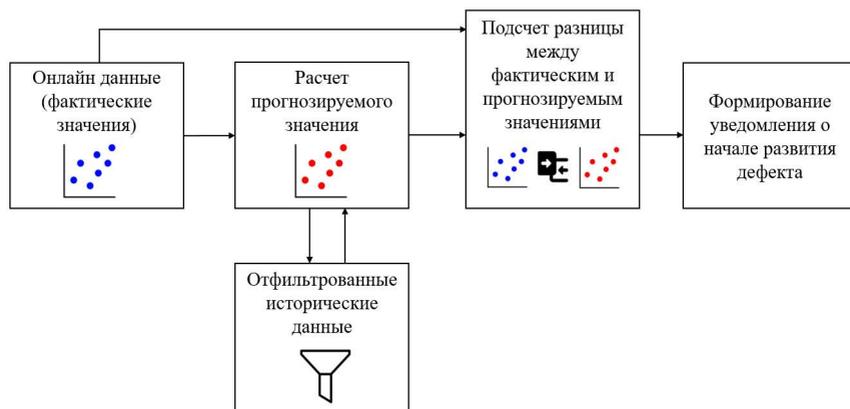


Рис. 5. Функциональная схема системы ПД

Fig. 5. Functional diagram of the PD system

Поскольку отклонение от нормального режима работы предлагается рассматривать как потенциальный дефект оборудования, фактические и прогнозные тренды сравниваются между собой на предмет сходимости путем вычитания прогнозных значений из фактических значений, исходя из чего строится тренд отклонения (черная линия). Если тренд отклонений превышает допустимые лимиты, система проинформирует об отклонении работы ЭД от нормального режима, т.е. о начале развития дефекта.

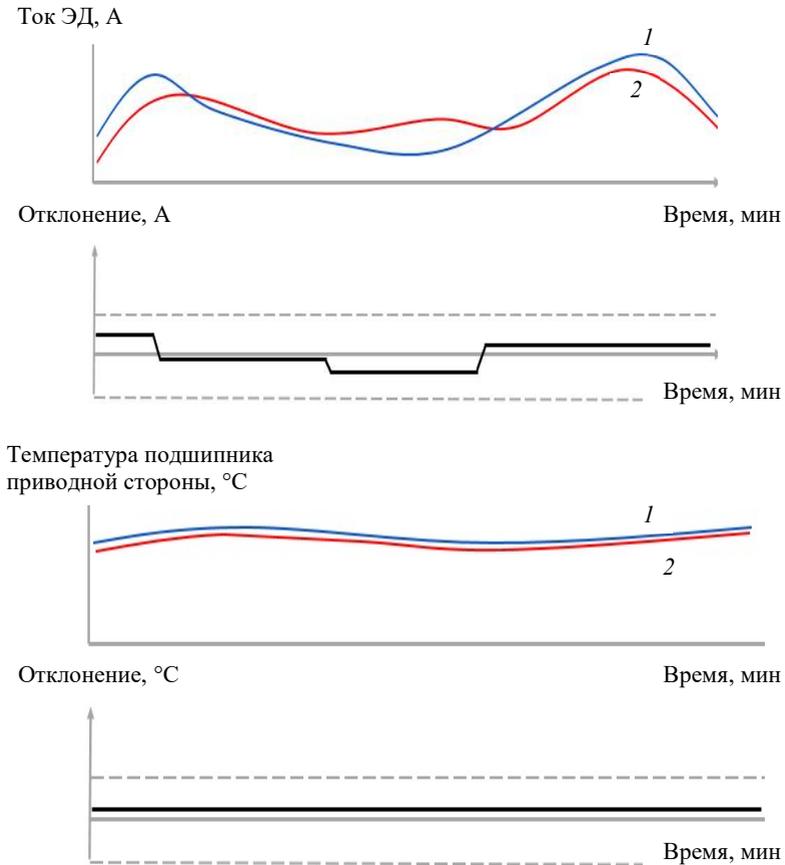


Рис. 6. Пример трендов цифровой модели системы ПД ЭД:
 1 – фактическое значение; 2 – «расчетное» значение

Fig. 6. Example of trends of the digital model of the EM of PD system:
 1 – actual value; 2 – «calculated» value

Лимиты определяются следующим образом:

Коридор «дообучения»:

$$\text{Гран}_{\text{дооб.верх.}} = P_{\text{макс}} + k_{\text{дов}} (P_{\text{макс}} - P_{\text{мин}});$$

$$\text{Гран}_{\text{дооб.ниж.}} = P_{\text{макс}} - k_{\text{дов}} (P_{\text{макс}} - P_{\text{мин}}),$$

где $\text{Гран}_{\text{дооб.верх}}$ и $\text{Гран}_{\text{дооб.ниж}}$ – верхняя и нижняя граница коридора «дообучения» системы ПД ЭД; $P_{\text{макс}}$ и $P_{\text{мин}}$ – максимальное и минимальное репрезентативное значение параметра модели из исторической выборки агрегата (максимальное/минимальное значение из отфильтрованной выборки исторических данных, соответственно); $k_{\text{дов}}$ – коэффициент доверия к системе ПД, то есть число, которое является оценкой степени доверия к решению, выдаваемому экспертной системой (0,05 – 0,3).

Коридор «дообучения» представляет собой область, внутри которой системе ПД ЭД разрешено самостоятельно обучаться. Это значит, что если все параметры ЭД, которые включены в цифровую модель ПД ЭД, находятся внутри коридора «дообучения», система ПД ЭД автоматически обучится на данном векторе и в дальнейшем будет ссылаться на него при построении прогнозных значений.

Границы сигнализации:

$$\begin{aligned}\text{Гран}_{\text{сигнал.верх}} &= \text{Гран}_{\text{дооб.верх}} + k_{\text{дов}} (\text{Гран}_{\text{дооб.верх}} - \text{Гран}_{\text{дооб.ниж}}); \\ \text{Гран}_{\text{сигнал.ниж}} &= \text{Гран}_{\text{дооб.ниж}} - k_{\text{дов}} (\text{Гран}_{\text{дооб.верх}} - \text{Гран}_{\text{дооб.ниж}}),\end{aligned}$$

где $\text{Гран}_{\text{сигнал.верх}}$ и $\text{Гран}_{\text{сигнал.ниж}}$ – верхняя и нижняя граница сигнализации системы ПД ЭД.

При достижении верхнего или нижнего уровня сигнализации, система ПД ЭД проинформирует пользователя о том, что параметр цифровой модели ПД ЭД вышел за допустимые значения. При данном отклонении присваивается первый приоритет [11], который является наивысшим (то есть наилучшим событием).

Лимиты отклонений:

$$\text{Лим.Откл} = \pm k_{\text{дов}} (\text{Гран}_{\text{сигнал.верх}} - \text{Гран}_{\text{сигнал.ниж}}).$$

Лимиты отклонений определяют область допустимых расхождений фактического значения от прогнозного значения системы ПД ЭД. Таким образом, если разница между фактическим значением параметра цифровой модели системы ПД ЭД и прогнозного значения параметра находится внутри области допустимых расхождений, считается, что у агрегата нет развивающегося дефекта. Но как только разница между фактическим значением параметра и прогнозного значения выходит за область допустимых расхождений, система ПД ЭД проинформирует о начале развития дефекта. Пример отклонения представлен на рис. 7.

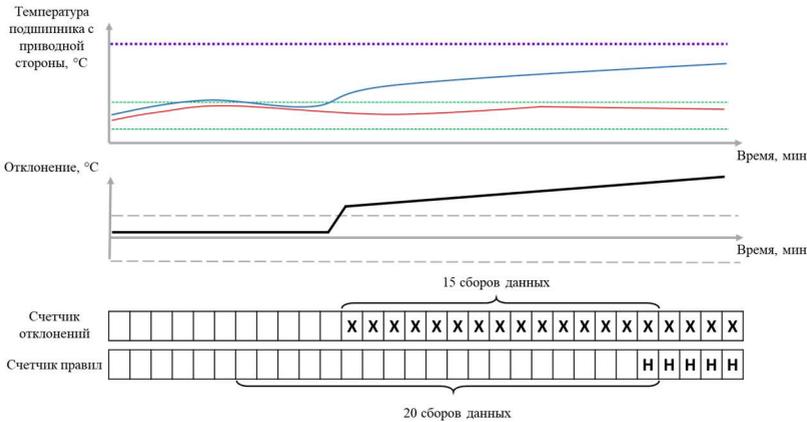


Рис. 7. Обнаружение отклонений в работе ЭД

Fig. 7. Detection of deviations in EM operation

В определенный момент времени фактические показания температуры подшипника ЭД с приводной стороны (синяя линия) начинают отклоняться от расчетных значений (красная линия), из-за чего тренд отклонений (черная линия) выходит за рамки допустимых лимитов отклонений. При выходе тренда отклонений за рамки допустимых лимитов начинает срабатывать счетчик отклонений синхронно со сбором данных. Программа указывает на отклонение фактического значения температуры подшипника с приводной стороны от прогнозного значения с указателем в форме креста «X» и отображает это в счетчике отклонений. В зависимости от количества превышений допустимых лимитов, их степени и продолжительности, возможно увидеть следующие сообщения – индикации (табл. 5). В рассматриваемом примере обнаружения отклонений в работе ЭД (рис. 7) в счетчике правил появляется указатель «H» (от англ. *High*) в тот момент, когда значение отклонений превышает лимиты по отклонениям в 15 сборах данных из 20 последних сборов данных согласно табл. 5.

На основе вышеперечисленных правил (сообщений-индикаций) выстраиваются диагностики (система укажет на определенный дефект оборудования, который начинает развиваться с учетом присвоенного приоритета):

Проблема с ЭД: Если [**H*] : «ток ЭД» и [**L*] : «напряжение ЭД», то «ТРЕВОГА, ПРИОРИТЕТ *N* – проблема с ЭД».

Высокая температура статора: Если ([**H*] : «температура обмотки *A*; температура обмотки *B*; температура обмотки *C*) и [**H*] : «ток ЭД»), то «ТРЕВОГА, ПРИОРИТЕТ *N* – высокая температура статора».

Локальная проблема подшипника: Если ($[*H]$: «температура подшипника; вибрация подшипника»), то «ТРЕВОГА, ПРИОРИТЕТ N – локальная проблема подшипника».

Проблема с охлаждением ЭД: Если ($[*H]$: «температура выходной воды» или $[*H]$: « температура выходного воздуха»), то «ТРЕВОГА, ПРИОРИТЕТ N – проблема с охлаждением ЭД».

Таблица 5.
Правила и сообщения-индикации системы ПД

Table 5.
Rules and messages-indications of the PD system

Стандартные правила системы ПД	Отклонение	Частота отклонений	Присваиваемый приоритет
<i>High (H)</i> <i>Low (L)</i>	Значение отклонений превышает лимиты по отклонениям	15 сборов из 20	Уровень 4 (Отклонение)
<i>Very High (VH)</i> <i>Very Low (VL)</i>	Значение отклонений в 2 раза превышает лимиты по отклонениям	5 из 5	Уровень 3 (Значительное отклонение)
<i>Long High (LH)</i> <i>Long Low (LL)</i>	Значение отклонений длительное время превышает лимиты по отклонениям	45 из 50	Уровень 3 (Длительное отклонение)
<i>Step High (SH)</i> <i>Step Low (SL)</i>	Сглаженное значение отклонений в 3 раза превышает лимиты по отклонениям	2 из 2	Уровень 2 (Резкое отклонение)
<i>Actual Value High (AVH)</i> <i>Actual Value Low (AVL)</i>	Значение фактических показаний датчиков превышает пределы, выставленные исходя из технологического регламента с определенным запасом	3 из 5	Уровень 1 (Критическое отклонение)

IV. Вывод

В работе проанализирована статистика наиболее распространенных дефектов ЭД с учетом рекомендованного перечня по объему измерений на ЭД. Предложен набор обязательных и дополнительных параметров для диагностической модели ЭД и метод раннего определения отклонений показаний ЭД от нормального режима работы за счет применения методов машинного обучения. Определены расчетные выражения внутренних уставок системы ПД и предложена логика построения диагностических правил системы ПД. Полученные результаты представляют собой подготовительную стадию развития системы ПД для электротехнического оборудования.

© Кирьянов Н.А., 2024

© Комков А.Н., 2024

*Поступила в редакцию 25.03.2024**Принята к публикации 08.05.2024**Received 25.03.2024**Accepted 08.05.2024*

Библиографический список

- [1] Распоряжение Правительства Российской Федерации от 28 июля 2017 г. № 1632-р. Программа «Цифровая экономика Российской Федерации» // Собрание законодательства РФ. 2017. № 32. С. 14517-14574.
- [2] Колмыков И.А. Предиктивная аналитика и «цифровая зрелость» // ИСУП. 2020. № 6 (90). С 50-53.
- [3] Kumar P., Hati A.S. Review on machine learning algorithm based fault detection in induction motors // Archives of Computational Methods in Engineering. 2021. Vol. 28. С. 1929-1940. DOI: 10.1007/s11831-020-09446-w
- [4] Bonaldi E.L., de Lacerda de Oliveira L.E., da Silva J.G.B., Lambert-Torres G., da Silva L.E.B. Predictive maintenance by electrical signature analysis to induction motors // Induction Motors – Modelling and Control, Araujo R. In Tech, 2012. – С. 487-520. DOI: 10.5772/48045
- [5] Моубрэй Д. Техническое обслуживание, ориентированное на надежность, пер. с англ. К.А. Зырянов, В.С. Смирнов. Екатеринбург: К.А. Зырянов, 2018. – 448 с.
- [6] Чувашов И.А. О роли предиктивной диагностики в цифровой электроэнергетике // Наука и инновации в современном мире, Ч. IV, Искандарова Г.Р. М.: Перо, 2019. – С. 149-151.
- [7] Motors don't just fail...do they? A guide to preventing failure, ABB, 2015. – 70 с. [Электронный ресурс]. URL: https://new.abb.com/docs/librariesprovider53/about-downloads/motors_ebook.pdf?sfvrsn=4 (дата обращения 20.02.2024).
- [8] Евстафьев И.Н. Организация сбора данных для выбора оптимальной стратегии управления техническим обслуживанием и ремонтом оборудования // Металлург. 2009. № 3. С. 30-33.
- [9] РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования. Введ. 1997-05-08. М.: НЦ ЭНАС, 2008. – 256 с.
- [10] Вьюгин В.В. Математические основы машинного обучения и прогнозирования. М.: МЦНМО, 2018. – 384 с.
- [11] Комонюк О.В., Антоненко И.Н. Информационная поддержка управления ремонтно-эксплуатационной деятельностью // Главный инженер. 2007. № 5. С. 35-41.

References

- [1] “Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 28 iyulya 2017 g. № 1632-r. Programma «Cifrovaya ekonomika Rossijskoj Federacii» [Order of the Government of the Russian Federation dated July 28, 2017 № 1632-r. Program «Digital Economy of Russian Federation]”, *Collection of legislation of the Russian Federation*, no. 32, pp. 14517-14574, Aug. 2017 (in Russian).

- [2] I.A. Kolmykov, “Prediktivnaya analitika i “cifrovaya zrelost’” [Predictive analytics and “digital maturity”], *ISUP*, vol. 6, no. 90, pp. 50-53, 2020 (in Russian).
- [3] P. Kumar and A.S. Hati, “Review on machine learning algorithm based fault detection in induction motors”, *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 28, pp. 1929-1940, May 2021. DOI: 10.1007/s11831-020-09446-w
- [4] E.L. Bonaldi, L.E. de Lacerda de Oliveira, J.G.B. da Silva, G. Lambert-Torres and L.E.B. da Silva, “Predictive maintenance by electrical signature analysis to induction motors”, in *Induction Motors – Modelling and Control*, R. Araujo, In Tech, 2012, pp. 487-520. DOI: 10.5772/48045
- [5] J. Moubray, *Tekhnicheskoe obsluzhivanie, orientirovannoe na nadezhnost’ [Reliability-centered maintenance]*, transl. from English by K.A. Zyryanov, V.S. Smirnov. Ekaterinburg: K.A. Zyryanov, 2018 (in Russian).
- [6] I.A. Chuvashov, “O roli prediktivnoy diagnostiki v cifrovoj elektroenergetike [About the role of predictive diagnostics in the digital electric power industry]”, in *Nauka i Innovacii v Sovremennom Mire [Science and Innovations in the Modern World]*, part IV, G.R. Iskandarova, Moscow, Pero, 2019, pp. 149-151 (in Russian).
- [7] *Motors don't just fail...do they? A guide to preventing failure*, ABB, 2015 [Online]. Available at: https://new.abb.com/docs/librariesprovider53/about-downloads/motors_ebook.pdf?sfvrsn=4 [Accessed: Feb. 20, 2024].
- [8] I.N. Evstafiev, “Organization of data collection for selection of optimal strategy for management of maintenance and repair”, *Metallurg*, no. 3, pp. 30-33, March 2009.
- [9] Scope and standards for testing electrical equipment, RD 34.45-51.300-97, May 1997.
- [10] V.V. Vyugin, *Matematicheskie osnovy mashinnogo obucheniya i prognozirovaniya [Mathematical bases of machine learning and forecasting]*. Moscow: ICNMO, 2018 (in Russian).
- [11] O.V. Komonyuk and I.N. Antonenko, “Informacionnaya podderzhka upravleniya remontno-ekspluatacionnoj deyatel'nost'yu [Information support of the repair and maintenance activity management]”, *Glavnyj inzhener [Chief engineer]*, no. 5, pp. 35-41, 2007 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Кирьянов Никита Александрович, аспирант РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация.

Nikita A. Kiryanov, postgraduate student of the National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russian Federation.

Комков Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация.

Aleksander N. Komkov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russian Federation.