УДК 621.31

Ю.Л.ЖУКОВСКИЙ, А.Е.КОЗЯРУК,
А.А.КОРЖЕВ, А.В.КРИВЕНКО
Санкт-Петербургский государственный горный институт (*технический университет*)

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА И ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СИЛОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Представлен обзор существующих методов технической диагностики промышленного электрооборудования, приведены выражения для определения основных диагностических показателей при диагностике состояния оборудования по электрическим параметрам.

The review of existing methods of technical diagnostics of an industrial electric equipment is submitted, expressions for definition of the basic diagnostic parameters are resulted at diagnostics of a condition of the equipment on electric parameters.

Затраты на ремонт и техническое обслуживание электрооборудования составляют значительную часть общих эксплуатационных затрат предприятий горной промышленности. Причем общая их доля в процессе эксплуатации по мере выработки ресурса возрастает. Поэтому особую важность имеют вопросы оценки текущего состояния используемого электрооборудования, своевременной диагностики аварийных и предаварийных режимов его работы, оценки остаточного ресурса. Сложность технической диагностики электрооборудования технологических комплексов в горной и нефтегазовой промышленности обусловлена его широкой номенклатурой, спецификой исполнения и режимов работы.

Целью диагностики электромашинных агрегатов является повышение их надежности и увеличение технического ресурса. Повышение надежности достигается за счет раннего обнаружения дефектов и неисправностей, что позволяет устранить их во время технического обслуживания и исключает отказы во время работы. Повышение технического ресурса систем ответственного назначения обеспечивается за счет перехода к их техническому обслуживанию по состоянию. В литературе [2] показано, что переход к эксплуатации по состоянию принес выгоду, эквивалентную 30 % общего парка машин.

В настоящее время для многих отраслей промышленности характерен переход от технического обслуживания по регламенту или по выходу из строя оборудования к обслуживанию по фактическому состоянию. Причем последнее обеспечивает значительное сокращение эксплуатационных затрат [1].

Для перехода к новым формам технического оборудования необходимо иметь системы технической диагностики, обеспечивающие адекватную оценку текущего состояния оборудования и прогноз его дальнейшего изменения.

Система технической диагностики должна включать в себя:

- Первичные преобразователи диагностируемых параметров.
- Вторичные преобразователи и нормализаторы сигналов.
- Устройства сбора данных.
- Средства связи с ЭВМ верхнего уровня.

Специализированное программное обеспечение, выполняющее функции:

– сбор и обработка диагностической информации;

– создание базы данных реального времени для накопления статистки изменения технического состояния объектов диагностики;

– формирование отчетов, включающих оценку текущего технического состояния

объектов диагностики и прогноз остаточного ресурса (при условии достаточного объема статистических данных в базе данных).

В настоящее время получили развитие следующие методы диагностики технического состояния электрооборудования:

- основанные на анализе вибраций отдельных оборудования [3, 10];
- основанные на анализе акустических колебаний, создаваемых работающей машиной [9];
- основанные на измерении и анализе магнитного потока в зазоре двигателя [12];
- основанные на анализе вторичных электромагнитных полей машины [13];
- основанные на измерении и анализе температуры отдельных элементов машины [6, 11];
- механических узлов (в частности подшипников) основанные на анализе содержания железа в масле [3];
- основанные на анализе электрических параметров машины [5, 7, 8, 14, 15].

В условиях промышленных предприятий использование многих указанных выше методов ограничено, так как не всегда возможен непосредственный доступ к диагностируемому электрооборудованию, а тем более установка на ней датчиков. Поэтому, с точки зрения практической реализации систем диагностики преимущество имеют методы, основанные на анализе наблюдаемых электрических параметров, в частности тока, напряжения, потребляемой и отдаваемой мощности, измерение которых возможно и без непосредственного доступа к диагностируемому электрооборудованию, а также без установки первичных измерительных преобразователей в непосредственной близости от него.

В качестве критерия для оценки энергетических процессов в реальной машине, обладающей неравномерным полем в воздушном зазоре и, как следствие, имеющих полигармонический состав спектра токов и напряжений используют понятие динамического коэффициента мощности [8]

$$K_{\acute{y}\ddot{i}} = \eta K_{\grave{i}}\, K_{\grave{e}}, \qquad (1)$$

где η – коэффициент полезного действия электрической машины, $K_м$ – средний коэффициент мощности, $K_и$ – коэффициент искажений.

Для полигармонического сигнала мощности многофазной машины КПД определяется как

$$\eta = \frac{P_2}{\sum\limits_{k=1}^{m}\sum\limits_{n=0}^{\infty} P_{nk}}, \qquad (2)$$

где P_2 – механическая мощность на валу двигателя, кВт; m – число фаз двигателя, P_{nk} – мощность n-ной грамоники k-й фазы двигателя, кВт.

Средний за период коэффициент мощности

$$k_{\grave{i}} = \frac{\sum\limits_{k=1}^{m}\sum\limits_{n=0}^{\infty} P_{nk}}{\sum\limits_{k=1}^{m}\sqrt{\sum\limits_{n=0}^{\infty} U_{nk}^2}\sqrt{\sum\limits_{n=0}^{\infty} I_{nk}^2}}. \qquad (3)$$

Коэффициент искажений

$$k_{\grave{e}} = \frac{P_{2n\acute{i}\hat{i}\grave{i}}}{P_{2n}}, \qquad (4)$$

где $P_{2n\acute{i}\hat{i}\grave{i}}$ – мощность на валу в номинальном режиме, кВт.

В случае непрерывного преобразования Фурье от сигнала, с учетом того, что наблюдаемый диапазон спектра ограничивается быстродействием реального измерительного тракта и не может превышать некой максимальной частоты ω_{max}, можно записать

$$\eta = \frac{P_2}{\sum\limits_{k=1}^{m}\int\limits_{0}^{\omega_{max}} P_k(\omega)d\omega}, \qquad (5)$$

где $P_k(\omega)$ – составляющая мгновенной мощности, приходящаяся на частоту ω.

Коэффициент мощности

$$K_{\grave{i}} = \frac{\sum\limits_{k=1}^{m}\sum\limits_{n=0}^{\infty} P_{nk}}{\sum\limits_{k=1}^{m}\sqrt{\sum\limits_{n=0}^{\infty} U_{nk}^2}\sqrt{\sum\limits_{n=0}^{\infty} I_{nk}^2}}, \qquad (6)$$

где U_{nk} – n-я гармоника напряжения k-й фазы двигателя, В; I_{nk} – n-я гармоника тока k-й фазы двигателя, А.

Переходя к непрерывному преобразованию Фурье и учитывая ограничения быстродействия измерительного тракта, аналогично получаем

$$K_{\text{і}} = \frac{\sum_{k=1}^{m} \int_{0}^{\omega_{\max}} P_k(\omega) d\omega}{\sum_{k=1}^{m} \sqrt{\int_{0}^{\omega_{\max}} U_k^2 d\omega} \sqrt{\int_{0}^{\omega_{\max}} I_k^2 d\omega}}. \quad (7)$$

Коэффициент искажений

$$K_{\text{è}} = \frac{P_{20}}{P_{2\text{í}}} < 1, \quad (8)$$

где P_{20} – мощность основной гармоники поля, Вт; $P_{2н}$ – мощность искажений, создаваемых высшими гармониками, Вт.

Коэффициент искажения характеризует отношение полезной мощности машины при реальном поле в зазоре к полезной мощности при синусоидальном поле в зазоре (для идеальной машины).

С учетом определения и учитывая, что при синусоидальном поле сигнал содержит только основную гармонику, для $K_{\text{и}}$ можно записать:

$$K_{\text{è}} = \frac{P_{20}}{P_{2\text{í}}} = \frac{\eta_{\text{íì}} \; P_{2\text{íì}}}{\eta \sum_{k=1}^{m} \int_{0}^{\omega_{\max}} P_k(\omega) d\omega}. \quad (9)$$

Следует отметить, что понятие динамического коэффициента мощности характеризует общее состояние диагностируемого агрегата, так как позволяет оценить соотношение мощности спектра сигнала к полезной мощности и соответствующее влияние искажений на энергетические показатели.

Электромагнитная несимметрия при симметричной системе питающих напряжений может быть охарактеризована величиной коэффициента несимметрии амплитудных значений фазных токов, который может быть определен как [14]

$$k_i = \frac{I_{1m} - I_{2m}}{I_{1m}}, \quad (10)$$

где I_{1m}, I_{2m} – амплитуды составляющих тока прямой и обратной последовательностей,

$$I_{1m} = \sqrt{2} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} i_{1i}^2}, \quad (11)$$

$$I_{2m} = \sqrt{2} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} i_{2i}^2}, \quad (12)$$

где i_1, i_2 – симметричные составляющие токов прямой и обратной последовательности.

Надежность работы оборудования электроустановок в значительной степени определяется надежностью электрической изоляции. Это подтверждается данными эксплуатации электрических машин и аппаратов. Условия и характер работы электрооборудования и, следовательно, изоляции разнообразны. Они определяются назначением или характером электрооборудования.

В период эксплуатации изоляция электрооборудования подвергается воздействиям нагрева, электрического поля, механических нагрузок, агрессивных сред, климатических факторов, различных излучений и т.п.

Изоляционные материалы, применяемые в технике, не являются идеальными диэлектриками. Им всем присуща активная проводимость, характеризующаяся удельным объемным r_v и удельным поверхностным r_s сопротивлениями. Соответственно любая изоляционная конструкция (изоляция жил кабелей, изоляция обмоток электрических машин и т.п.) имеет конечные значения объемного R_v и поверхностного R_s сопротивлений, которые зависят от значений удельных сопротивлений материалов и геометрических размеров конструкции.

Сопротивление изоляции изделий – величина, нормируемая ПУЭ и ПЭЭП при приемке новых изделий и при техническом обслуживании электрооборудования. При снижении его ниже установленных норм возможно формирование пожароопасных ситуаций из-за теплового пробоя изоляции. При снижении сопротивления изоляции в месте повреждения (загрязнение, увлажнение и т.п.) увеличивается ток, протекающий под действием рабочего напряжения сети, соответственно повышается температура нагрева этого места. Повышение температуры

нагрева изоляционного материала снижает его сопротивление, что приводит к соответствующему увеличению тока. Последнее вызывает новое повышение температуры и соответствующее дополнительное снижение сопротивления изоляции. Процесс нарастания электрического тока продолжается до тех пор, пока не установится равновесие между тепловыделением и теплоотводом (при какой-то установившейся температуре перегрева).

Представление о значении сопротивления изоляции дает лишь сила тока в измерительной цепи в установившемся режиме, так как в первые моменты после приложения измерительного напряжения, а также при каждом изменении структуры и состава сети (например, при подключении новых электроприемников) в измерительной цепи протекают токи переходных режимов, обусловленные перезарядом емкости полюсов сети относительно корпуса или зарядом емкости подключаемого участка сети. Кроме того, на результат измерений оказывает влияние рабочее напряжение электроустановки. Правильный результат может быть получен лишь при соответствии принятого метода измерений параметрам контролируемой сети. Без соблюдения этого условия в одной и той же сети при измерении различными средствами могут быть получены данные, противоречащие одни другим.

Рассматривая проблему использования информации о техническом состоянии изоляции электротехнического оборудования для принятия решений по ремонтным воздействиям, целесообразно выделить три уровня адекватности оценок.

• Первый – идентификация технического состояния по показателям надежности, т.е. по параметру потока отказов или интенсивности восстановлений.

• Второй – идентификация по характеристикам дефектов и повреждений изоляции электрооборудования, выявленных в определенные моменты времени.

• Третий – идентификация по контролируемым параметрам, характеризующим техническое состояние изоляции электрооборудования, таким как сопротивление изоляции, коэффициенты абсорбции (увлажненности) и поляризации (старения изоляции).

Реализация третьего уровня возможна лишь при условии наличия диагностических систем. Второй уровень более доступен и требует достаточной информации по выявленным дефектам и повреждениям, а также моделей динамики их развития. Реализация первого уровня связана лишь с достаточностью статистического материала.

Корректность принятия решения о введении того или иного регламента технического обслуживания и ремонта зависит от технического состояния изоляции оборудования. Регламент технического обслуживания и ремонта как система правил, определяющих технологию, средства, объем, методы и периодичность ремонтных воздействий, зависит не только от технического состояния рассматриваемого оборудования. На него оказывает влияние структурная значимость данного оборудования в объемлющей технической системе и конкретные условия ее функционирования (в том числе чисто ремонтного характера, например, оснащенность ремонтной базы, наличие ресурсов и др.).

Задача определения времени вывода в ремонт обследуемого оборудования промышленного предприятия включает в себя следующие стадии:

• определение состава выводимого в ремонт оборудования с учетом технологических взаимосвязей;

• определение потребности конкретного оборудования в объеме и сроке ремонта;

• определение ограничений по срокам и затратам (включая все виды обеспечения ремонта);

• подготовка графика вывода в ремонт, включающего в себя сроки остановов и их продолжительность.

Сущность этой задачи состоит в определении ремонтных программ оборудования с одновременным использованием нормативной базы и результатов оценок технического состояния изоляции. Такое сочетание информации позволяет наиболее полно использовать любую информацию о техниче-

ском состоянии оборудования, получаемую как с помощью систем диагностики, так и по экспертным оценкам.

Под ремонтными программами подразумеваются графики и сроки выполнения конкретных наборов ремонтных работ, наиболее полно отражающих динамику изменения технического состояния оборудования.

Диагностическими параметрами являются: наработка до отказа, время восстановления, наработка до появления повреждения, характеристики развития повреждения, предельно допустимые уровни повреждения.

В этой связи необходимо:

- создание базы данных используемого электрооборудования с информацией, отражающей состояние изоляции (время выхода из строя электротехнического оборудования, время плановых ремонтов, периоды наработки на отказ, режимы эксплуатации, отказообразующие причины и т.п.);
- построение базы данных, где в качестве показателей фигурируют ключевые факторы, влияющие на работоспособность электрооборудования;
- создание базы данных по параметрам, полученным в результате диагностирования изоляции оборудования.

Ожидаемые результаты от внедрения:

- разработка системы сбора и обработки статистической информации о значениях показателей технического состояния электрооборудования;
- выполнение анализа накопленных эксплуатационных данных;
- проведение согласованной корректировки планов технического обслуживания и ремонта, которая позволит планировать и производить ремонты электрооборудования, исходя из его фактического технического состояния;
- оптимизация затрат на ремонт и обеспечение заданного технического состояния электрооборудования.

Таким образом, создание информационно-диагностического комплекса позволит оценивать текущее состояние эксплуатируемого электрооборудования и его остаточный ресурс.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Азовцев Ю.А.* Диагностика и прогноз технического состояния оборудования целлюлозно-бумажной промышленности в рыночных условиях / Ю.А.Азовцев, Н.А.Баркова, В.А.Доронин // Бумага, картон, целлюлоза. 1999. № 5.

2. *Биргер И.А.* Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978.

3. Вибродиагностика / Г.Ш.Розенберг, Е.З.Мадорский, А.И.Таджибаев и др. / ПЭИПК. СПб, 2003.

4. *Гашимов М.А.* Диагностирование неисправностей обмотки статора электрических машин / М.А.Гашимов, Г.А.Гаджиев, С.М.Мирзоева // Электрические станции. 1998. № 11.

5. *Гребченко Н.В.* Экспериментальные исследования установившихся режимов работы асинхронных электродвигателей при наличии в них дефектов / Н.В.Гребченко, Д.В.Полковниченко; Сборник научных трудов ДонГТУ. Серия: электротехника и энергетика. Выпуск 17. Донецк, 2000.

6. Информационная термография в энгергетике/ А.В.Афонин, Р.К.Ньюпорт, А.И.Таджибаев и др. / ПЭИПК. СПб, 2000.

7. *Нури Абделбассет.* Диагностика короткозамкнутых роторов асинхронных электроприводов электротехнических комплексов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: Дон ГТУ. Донецк, 1997.

8. *Копылов И.П.* Математическое моделирование электрических машин. М.: Высшая школа, 1994.

9. *Павлов Б.В.* Акустическая диагностика машин. М.: Машиностроение, 1971.

10. *Попков В.И.* Виброакустическая диагностика и снижение виброактивности судовых механизмов. Л.: Судостроение, 1974.

11. *Таджибаев А.И.* Автоматизированные системы распознавания состояний электроустановок. СПб: Энергоатомиздат, 2001.

12. *Bennett S.M. and Patton R.J.* Rapid prototyping of a sensor fault tolerant traction control system,т IEEE Colloquium on Power Electronics, 21 Apr. 1997, pp. 2/1-2/6.

13. *Patton R.J.* Robustness in model-based fault diagnosis: the 1995 situation,т Proceeding on IFAC workshop, On-line fault detection and supervision in the chemical process industries. Newcastle UK. June 1995.

14. *Randy R. Schoen*, *Thomas G. Habetler*, *Farrukh Kamran*, *Robert G. Barthel* «Motor Bearing Damage Detection Using Stator Current Monitoring» IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL.31, № 6, November/December 1995.

15. *Thomson W.T.* and *Rankin D.* «Case Histories of Rotor Winding Fault Diagnosis in Induction Motors», 21"1 Int Conf Proc on Condition Monitoring, University College Swansea, March 1987.