

УДК 621.313.333

КОМПЛЕКСНОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

И. В. ПЕТРОВ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Ключевые слова: техническое диагностирование, гипоциклоидные частоты, вибродиагностирование, прямой спектр, диагностическая модель, автоматизация дефектоскопии, неразрушающие методы, остаточный ресурс, диагностический паспорт.

Введение

Традиционно техническое диагностирование электрических двигателей рассматривалась как компонент эксплуатационной надежности функционирования энергооборудования. Техническое диагностирование состояния, как до ремонта, так и после него позволяет увеличить срок службы оборудования, значительно сокращает стоимость ремонтных работ и их продолжительность. В ряде случаев существует возможность отказа от ремонта при удовлетворительном техническом состоянии оборудования.

Многолетний опыт показывает, что диагностирование требует дальнейшего развития и совершенствования. Уже сегодня многие предприятия предусматривают выполнение технического диагностирования электрических двигателей – в основном подшипниковых опор.

Повышение эффективности эксплуатации электрических двигателей заключено в переходе на техническое обслуживание по результатам технического диагностирования. Однако данный переход невозможен без использования надежных методов выявления и оценки текущего состояния оборудования. Кроме того, произведенный анализ действующей нормативной документации по эксплуатации и ремонту электрических двигателей показал, что появилась необходимость дополнить существующую нормативную документацию современными методами технического диагностирования во всех министерствах и ведомствах, где эксплуатируются электрические двигатели, так как согласно ей ремонт должен выполняться по сроку эксплуатации [1]. Это позволит, во-первых, проводить ремонт не по регламенту, а по результатам диагностирования; во-вторых – значительно сократить затраты на эксплуатацию электрооборудования. Необходимо запретить высоковольтные испытания изоляции и использовать неразрушающие методы. Это и определяет необходимость развития системы технической диагностики.

Цель работы – повышение достоверности выявления дефектов асинхронных двигателей в эксплуатационных условиях.

Постановка задачи

В техническом диагностировании в настоящее время существуют проблемные зоны. Традиционные методы испытаний разработаны давно и направлены на выявление дефектов, которые, как правило, уже не определяют надежность современного оборудования. Периодичность испытаний не согласована со скоростью развития де-

фектов. В последние годы были предложены новые методы диагностирования, появилась возможность дистанционного контроля и испытаний без вывода оборудования из работы.

Проведение исследований

Одним из специализированных методов неразрушающего контроля является вибродиагностирование. Практически мгновенная реакция вибросигнала на изменение состояния оборудования является незаменимым свойством в аварийных ситуациях, когда определяющим фактором является скорость постановки диагноза и принятия решения.

На сегодняшний день достоверность вибродиагностирования электрических двигателей составляет 30–60 % [2].

В процессе исследований установлено, что для способов вибродиагностирования по общему уровню 0–200 Гц, мкм, 0–1000 Гц, мм/с и анализа спектра «оггибающей» свойственны наибольшие погрешности по целому ряду причин. Установлено, что выявление дефектов при анализе прямого спектра является более достоверным, наглядным и универсальным. Этим способом можно проводить вибродиагностирование любого оборудования, которое вибрирует во время работы. Выявление дефектов при анализе прямого спектра является более достоверным, наглядным (при вибромониторинге) и универсальным (рис. 1).

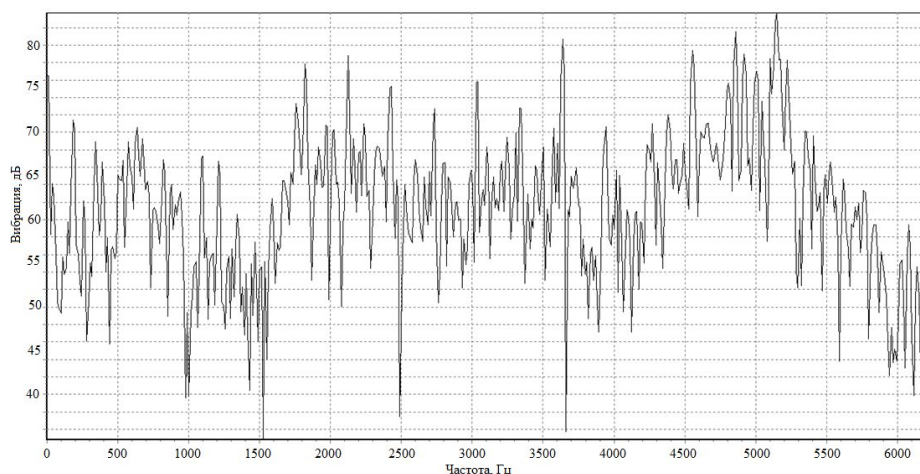


Рис. 1. Спектр вибрации подшипника двигателя вентилятора

Из анализа спектра вибрации на рис. 1 по способу прямого спектра можно сделать вывод, что в подшипниковом узле присутствуют дефекты сепаратора, внутреннего кольца и нарушения балансировки.

При диагностировании по прямому спектру предварительно вычисляются частоты, на которых проявляются дефекты [3].

Разработанные ранее способы расчета информативных частот только частично решали задачи определения дефектов. Проведенные исследования на диагностическом стенде показали, что 60 % дефектов находятся в области высоких частот от 1000 до 5000 Гц. Принятые математические модели не описывали указанные частоты, поэтому требовали доработки.

В реальных условиях возникают дополнительные факторы, которые вызывают вибрацию подшипников в широком частотном диапазоне. Установлено, что при вращении внутреннего кольца каждая точка шарика движется по гипоциклоиде.

При вибродиагностировании иногда максимальная амплитуда вибрации возникает не на частоте возмущающей силы, а на ближайшей собственной частоте колебаний.

Количество касаний тел качения наружного и внутреннего кольца определяется по формулам:

$$n = \frac{R_n}{r_{ш}}; \quad m = \frac{R_{вн}}{r_{ш}},$$

где R_n – радиус наружного кольца; $r_{ш}$ – радиус тела качения (шарика); $R_{вн}$ – радиус внутренней поверхности.

Умножая частоту дефекта на кратность гипоциклоида, получаем ряд гипоциклоидных частот, на которых этот дефект также будет проявляться.

Учитывая, что количества точек, которые перемещаются по гипоциклоиде, бесконечное множество, то это в совокупности создает очень плотный частотный спектр вибрации белого шума. Особенно это заметно в диапазоне частот более 1000 Гц.

Современные методы диагностирования позволяют выявить дефекты на основе практических математических моделей. На практике часто бывает, что разные дефекты характеризуются одинаковым уровнем вибрации. Возникает задача неопределенности. Тогда при наличии определенной статистики применяют метод Байеса.

Обобщенная формула Байеса может быть записана так:

$$P\left(\frac{D_i}{X^*}\right) = \frac{P(D_i)P\left(\frac{X^*}{D_i}\right)}{\sum_{s=1}^n P(D_s)P\left(\frac{X^*}{D_i}\right)}.$$

Отметим, что сумма вероятностей всех возможных реализаций признака равна единице.

Знаменатель формул Байеса для всех диагнозов одинаков. Это позволяет сначала определить вероятности совместного появления i -го диагноза и данной реализации комплекса признаков:

$$P\left(\frac{D_i}{X^*}\right) = P(D_i)P\left(\frac{X^*}{D_i}\right),$$

а затем апостериорную вероятность диагноза:

$$P\left(\frac{D_i}{X^*}\right) = \frac{P(D_i X^*)}{\sum_{s=1}^n P(D_s X^*)}.$$

Для определения вероятности диагнозов по методу Байеса необходимо составить диагностическую матрицу, которая формируется на основе предварительного статистического материала (табл. 1).

Диагностическая матрица асинхронных двигателей в методе Байеса

| Диагноз D_i асинхронного двигателя | Признак | | | $P(D_i)$ |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------|----------|
| | Вибрация подшипника качения x_1 | Износ изоляции обмотки статора x_2 | Неуравновешен- ность ротора x_3 | |
| | $P(x_1/D_i)$ | $P(x_2/D_i)$ | $P(x_3/D_i)$ | |
| D_1 (АД1) | 0,25 | 0,24 | 0,3 | 0,31 |
| D_2 (АД2) | 0,15 | 0,3 | 0,2 | 0,2 |
| D_3 (АД3) | 0,3 | 0,2 | 0,35 | 0,45 |
| ... | ... | ... | ... | ... |

Цифровые значения в табл. 1 представлены эвристически, так как получить достоверную выборку данных не представилось возможным. В данной таблице содержатся вероятности разрядов признаков при различных диагнозах.

Условные вероятности признаков при других диагнозах корректировки не требуют.

Применяя обобщенную формулу Байеса и числовые значения из табл. 1, определим вероятность выхода из строя АД1, АД2, АД3 в случае выхода из строя только подшипников. Вероятность события для АД1:

$$P\left(\frac{D_1}{x_1\bar{x}_2\bar{x}_3}\right) = \frac{P(D_1) \cdot P\left(\frac{x_1}{D_1}\right) \cdot P\left(\frac{\bar{x}_2}{D_1}\right) \cdot P\left(\frac{\bar{x}_3}{D_1}\right)}{P(D_1) \cdot P\left(\frac{x_1}{D_1}\right) \cdot P\left(\frac{\bar{x}_2}{D_1}\right) \cdot P\left(\frac{\bar{x}_3}{D_1}\right) + P(D_2) \cdot P\left(\frac{x_1}{D_2}\right) \cdot P\left(\frac{\bar{x}_2}{D_2}\right) \cdot P\left(\frac{\bar{x}_3}{D_2}\right) + P(D_3) \cdot P\left(\frac{x_1}{D_3}\right) \cdot P\left(\frac{\bar{x}_2}{D_3}\right) \cdot P\left(\frac{\bar{x}_3}{D_3}\right)};$$

$$P\left(\frac{D_1}{x_1\bar{x}_2\bar{x}_3}\right) = \frac{0,31 \cdot 0,25 \cdot 0,76 \cdot 0,7}{0,31 \cdot 0,25 \cdot 0,76 \cdot 0,7 + 0,2 \cdot 0,15 \cdot 0,7 \cdot 0,8 + 0,45 \cdot 0,3 \cdot 0,8 \cdot 0,65} = \frac{0,04123}{0,04123 + 0,0168 + 0,0702};$$

$$P\left(\frac{D_2}{x_1\bar{x}_2\bar{x}_3}\right) = \frac{0,2 \cdot 0,15 \cdot 0,7 \cdot 0,8}{0,04123 + 0,0168 + 0,0702} = 0,131;$$

$$P\left(\frac{D_3}{x_1\bar{x}_2\bar{x}_3}\right) = \frac{0,45 \cdot 0,3 \cdot 0,8 \cdot 0,65}{0,04123 + 0,0168 + 0,0702} = 0,547.$$

Проведенное прогнозирование показывает, что наибольшую вероятность отказа имеют подшипники АД3. Следовательно, нужно начинать плановое диагностирование или ремонт АД3.

После анализа и обработки отказов специалистами службы технической диагностики формируется диагностическая матрица, которая хранится в памяти автоматизированной системы информационной поддержки операторов.

При проведении исследований разработана и составлена диагностическая модель вибрации. Диагностическая модель строится на основе минимальной (условно-идеальной) машины и максимальной (условно-дефектной машины) вибрации на информативных частотах. Текущее значение вибрации по частоте и амплитуде сравнивается с диагностической моделью и выявляется дефект. Диагностическая модель может быть представлена в графическом (рис. 2) и табличном (табл. 2) видах.

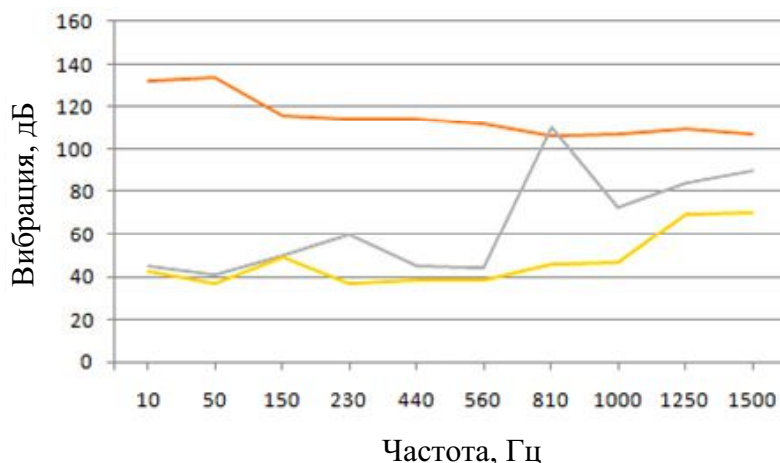


Рис. 2. Графическое отображение диагностической модели:
 1 – эталонное предельное значение; 2 – эталонное минимальное значение;
 3 – фактическое значение

Таблица 2

Табличное отображение диагностической модели

| f , Гц | $A_{кр}$, дБ | $A_{изм}$, дБ | $A_{нач}$, дБ | Степень износа |
|----------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| 10 | 132 | 45,5 | 43 | Начальный |
| 50 | 134 | 41,3 | 37 | Начальный |
| 150 | 116 | 50 | 49 | Начальный |
| 230 | 114 | 60,2 | 37 | Средний |
| 440 | 114 | 45,6 | 39 | Малый |
| 560 | 112 | 44,3 | 39 | Малый |
| 810 | 106 | 110 | 46 | Аварийный |
| 1000 | 107 | 73,2 | 47 | Средний |
| 1250 | 109 | 83,9 | 69 | Средний |
| 1500 | 107 | 90 | 70 | Средний |

Укажем следующие достоинства данной диагностической модели:

- учитываются конструктивные особенности каждого типа машин;
- учитываются особенности эксплуатации каждой машины в отдельности;
- высокая наглядность и достоверность при выявлении дефектов и степени износа каждой машины в отдельности.

В процессе проведения исследований разработан алгоритм для написания программы «Таямница-2». Данная программа предназначена для автоматизации дефектоскопии по полученным в стороннем программном обеспечении спектрам вибраций. Она позволяет хранить и управлять банками данных параметров диагностируемого оборудования. По параметрам оборудования программа позволяет рассчитать информативные частоты, соответствующие определенным дефектам, определить уровень дефекта и сформировать диагностическую таблицу по дефектам, имеющимся у обследованного оборудования. Результаты диагностирования сводятся в отдельный электронный документ (рис. 3) в формате электронной таблицы.

| Номер | Частота | A_мин | A_тек | A_макс | Износ | Дефект | Рекомендации |
|-------|---------|-------|-------|--------|------------|----------------------------|--------------------------------------------|
| 1 | 25.0 | 74.3 | 86.7 | 90.6 | Предельный | Нарушение балансировки | Выполнить балансировку, заменить подшипник |
| 2 | 75.5 | 77.1 | 83.5 | 88.5 | Средний | Дефекты тел качения | |
| 3 | 31.2 | 73.5 | 90.8 | 87.4 | Аварийный | Дефекты внутреннего кольца | |
| 4 | 9.6 | 70.2 | 72.6 | 85.7 | Начальный | Дефекты сепаратора | |

Рис. 3. Интерфейс дефектной таблицы в программе «Таямница-2»

В настоящее время согласно установленной нормативной документации (ТКП 181–2009 «Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей») одним из основных способов оценки технического состояния изоляции электрических двигателей являются высоковольтные испытания. Как показывает практика, неоднократные высоковольтные испытания разрушают изоляцию.

После проведения исследований предложено для оценки технического состояния изоляции электрических двигателей использовать:

- коэффициент поляризации или коэффициент микропористости;
- тангенс угла диэлектрических потерь (далее – $\text{tg}\delta$);
- температурное поле;
- частичные разряды.

Данные методы диагностирования изоляции являются неразрушающими и позволяют отказаться от проведения высоковольтных испытаний для оценки состояния изоляции электродвигателей.

Исходя из многочисленных исследований состояния электрического оборудования на действующих предприятиях, рекомендуется при диагностировании изоляции по коэффициентам $\text{tg}\delta$ и частичным разрядам результаты их измерения рассматривать совместно, по разработанному графику зависимости (рис. 4). При попадании точки измерения в зону I состояние изоляции оценивается как неудовлетворительное; в зону II – среднее; в зону III – удовлетворительное.

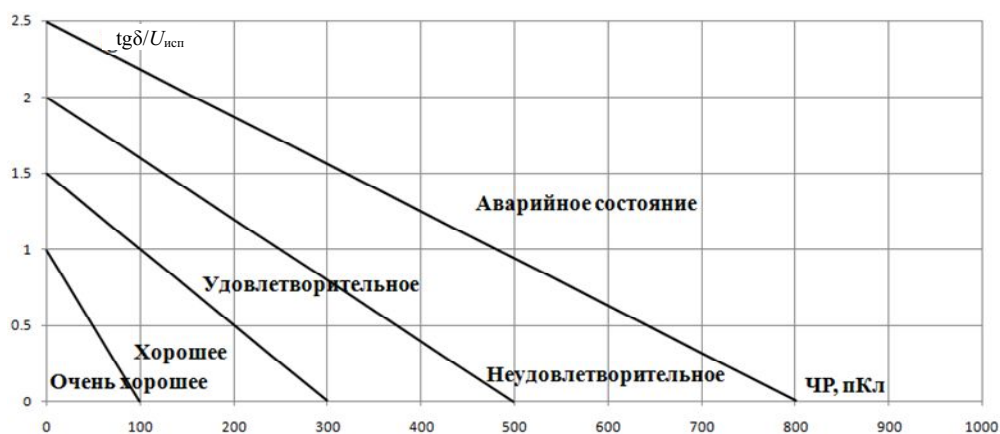


Рис. 4. Эталоны технического состояния изоляции

В процессе исследований проведены многократные эксперименты по оценке технического состояния изоляции высоковольтных электрических машин по изменению $\text{tg}\delta$ от приложенного напряжения U (рис. 5). Согласно теории старения изоляции, $\text{tg}\delta$ не должен изменяться при увеличении испытательного напряжения.

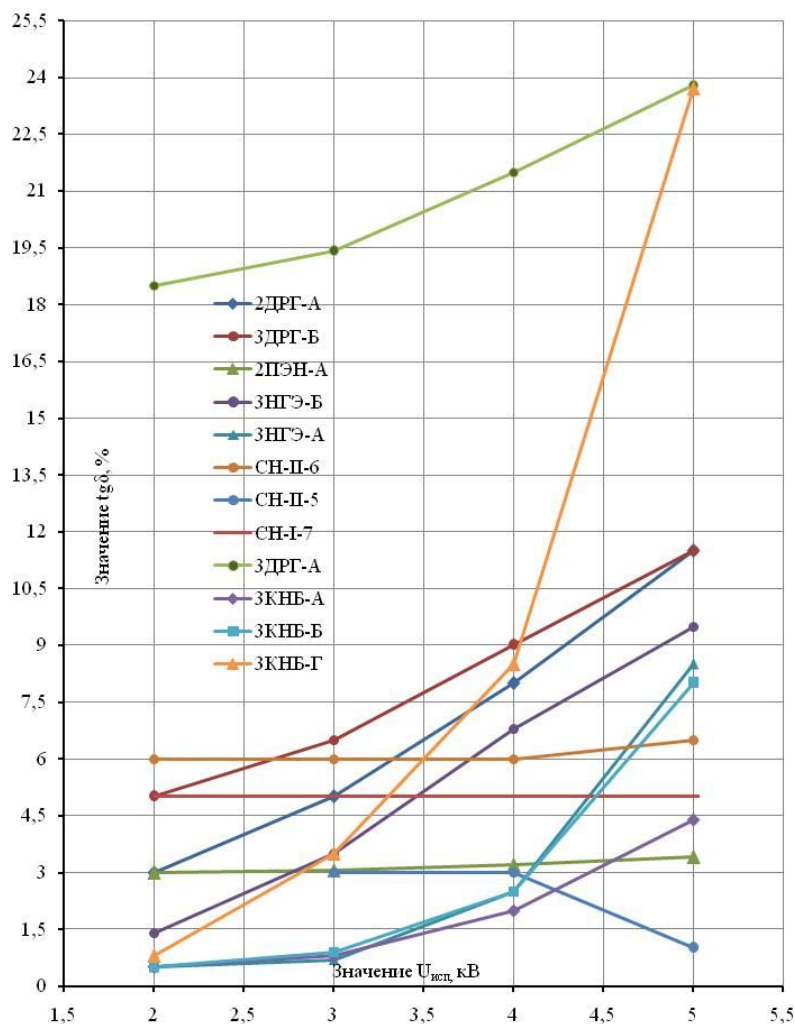


Рис. 5. Зависимость $\text{tg}\delta = F(U)$ для статорной обмотки различных электрических двигателей

Принято считать, что $\text{tg}\delta$ не зависит от габаритов электрической машины. Если следовать этим утверждениям, то, чем больше значение $\text{tg}\delta$, тем больше степень старения изоляции. Как показала практика диагностирования изоляции электрических машин, для повышения достоверности степени износа изоляции целесообразно применять дополнительные параметры. Однако при этом имеются жесткие требования к диагностическим параметрам: они не должны быть чувствительны к температуре окружающей среды и габаритам электрической машины, а должны характеризовать техническое состояние изоляции. Для этих целей подходит коэффициент микропористости, который определяется по формуле

$$K_m = \frac{\Delta C}{C_{50}},$$

где ΔC – емкость абсорбции; C_{50} – емкость геометрическая.

При проведении исследований разработана зависимость $\operatorname{tg}\delta$ от приложенного напряжения U и коэффициента микропористости (рис. 6). Полученная зависимость отображает запас диэлектрической прочности изоляции электрических двигателей.

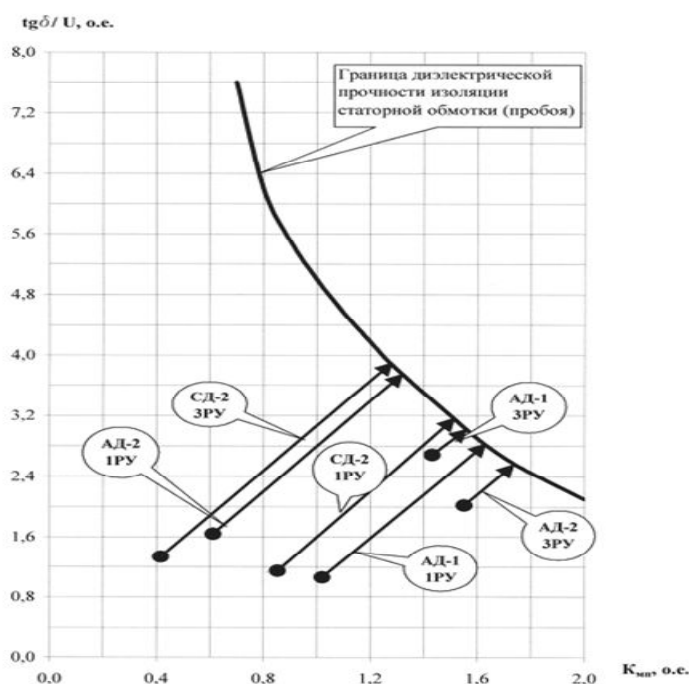


Рис. 6. Зависимость $\operatorname{tg}\delta = F(U)$ и K_m для статорной обмотки различных электрических двигателей

Разработана формула для определения остаточного ресурса:

$$d = \sqrt{(\operatorname{tg}\delta_3 - \operatorname{tg}\delta_T)^2 + (K_{м.э} - K_{м.т})^2},$$

где $\operatorname{tg}\delta_3$ – эталонное значение тангенса угла диэлектрических потерь, снимаемое с линии пробоя в каждом конкретном случае; $\operatorname{tg}\delta_T$ – текущее значение тангенса угла диэлектрических потерь, получаемое при диагностировании изоляции электрических машин; $K_{м.э}$ – эталонное значение коэффициента микропористости; $K_{м.т}$ – текущее значение коэффициента микропористости.

Любые результаты диагностирования должны быть отображены в удобном для пользователей виде. В нормативной документации не определены типовые бланки отображения результатов диагностирования. Поэтому при проведении исследований разработан и предложен к использованию паспорт технического состояния электрической машины по результатам проведения диагностирования. Содержание паспорта представлено в табл. 3.

Таблица 3

Содержание паспорта

| | |
|--------------|------------------------------------------------------|
| ФОРМУЛЯР № 1 | Регистрация работ |
| ФОРМУЛЯР № 2 | Документация, использованная при оформлении паспорта |
| ФОРМУЛЯР № 3 | Паспортные данные |
| ФОРМУЛЯР № 4 | Сведения о ремонтах |

Окончание табл. 3

| | |
|--------------|---------------------------------------------|
| ФОРМУЛЯР № 5 | Результаты испытания изоляции |
| ФОРМУЛЯР № 6 | Результаты вибрационного обследования |
| ФОРМУЛЯР № 7 | Результаты измерения частичных разрядов |
| ФОРМУЛЯР № 8 | Результаты тепловизионного обследования |
| ФОРМУЛЯР № 9 | Оценка степени износа и остаточного ресурса |

Заключение

На основании выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Планирование и проведение капитальных ремонтов выполнять только по результатам комплексного технического диагностирования, что позволит сэкономить значительные финансовые средства и увеличить межремонтный интервал.
2. Шестьдесят процентов дефектов и выходов из строя подшипников качения проявляются на частотах выше 1000 Гц, которые описываются гипоциклоидными частотами, разработанными в процессе исследований.
3. Разработаны алгоритмы вибродиагностирования электрических двигателей с учетом магнитной вибрации и вибрации подшипниковых опор.
4. Проведенные исследования показали, что оценивать степень старения изоляции необходимо по изменению $\text{tg}\delta$ от приложенного напряжения и частичных разрядов.
5. Для повышения достоверности выявления степени старения изоляции разработан способ по изменению коэффициента поляризации, $\text{tg}\delta$, коэффициента микропористости и частичных разрядов.

Литература

1. ТКП 181–2009 (02230). Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – Минск, 2009.
2. Грунтович, Н. В. Типовые ошибки при вибродиагностировании энергетического оборудования / Н. В. Грунтович, А. А. Алферов, П. М. Колесников // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2010. – № 1 (40). – С. 72–81.
3. Грунтович, Н. В. Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования : учеб. пособие / Н. В. Грунтович. – М. : Инфра-М ; Новое зн., 2013. – 271 с.
4. Барков, А. В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации / А. В. Барков, Н. А. Баркова, А. Ю. Азовцев. – СПб. : Изд-во С.-Петерб. гос. техн. ун-та, 2000. – 169 с.
5. Петров, И. В. Оценка достоверности различных способов измерения и обработки виброакустических характеристик при техническом диагностировании электрических машин / И. В. Петров // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2014. – № 1. – С. 108–116.
6. Грунтович, Н. В. Комплексное техническое диагностирование электротехнического оборудования – основа системы ремонтов «по состоянию» / Н. В. Грунтович, Н. И. Грачек // Горн. журн. – 2003. – № 7. – С. 67–69.

Получено 10.09.2018 г.