

НАДЕЖНОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И МЕТОДЫ ТЕРМОГРАФИИ

RELIABILITY OF POWER EQUIPMENT
AND THERMAL IMAGING METHODS

УДК 772.96

P.A. РОМАНОВ

аспирант СПбГУКиТ, директор по маркетингу
и сбыту ООО «Балтех»

Санкт-Петербург

R.A. ROMANOV

graduate student of SPbGUKiТ, Sales and Marketing
Manager of Baltech Ltd

Saint-Petersburg

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
KEYWORDS:**

термография, тепловизионная диагностика, термограмма
thermal imaging, thermal imaging diagnostics, thermal image

В статье рассматриваются проблемы обеспечения надежности энергетического оборудования методами термографии.

The article is concerned with problems of reliability assurance of power equipment using thermal imaging methods.

Современный уровень развития технологий энергетических предприятий предъявляет высокие требования к надежности оборудования, повышению достоверности диагностических методов, а также к эффективности и экономической эксплуатации данного оборудования. Надежность оборудования базируется на обязательном применении новейших средств и методов диагностики и наладки энергомеханического оборудования, и требует комплексного подхода к решению инженерно-технических проблем.

Работоспособность энергооборудования, турбин, насосов, вентиляторов,

редукторов – это способность оборудования удовлетворять заданным техническим характеристикам в течение определенного момента времени и восстановление его основных характеристик, которая обеспечивается на предприятиях установленной системой диагностики и технического обслуживания и ремонта (ТОиР).

За последние годы в России произошло множество крупных техногенных катастроф в энергетической и других отраслях промышленности. Очень часто решения и предпринимаемые меры не достаточны для обеспечения надежной и

безаварийной эксплуатации промышленного оборудования. Анализ сложившейся ситуации выявляет, что не решен ряд объективных и субъективных проблем, начиная с системных и организационных мероприятий обеспечения надежности энергомеханического оборудования, устаревших технологий ремонта, отсутствия современных и достоверных диагностических методов и заканчивая подготовкой и технической грамотностью на местах каждого ответственного технического специалиста (диагноста, ремонтного персонала). ►

Система ТОиР	ДОСТОИНСТВА	НЕДОСТАТКИ
РПО (Реагирующая, работа до поломки)	Не требует больших финансовых вложений на организацию и техническое оснащение.	Высокая вероятность внеплановых простоев из-за внезапных отказов приводящая к дорогостоящим и продолжительным ремонтам.
ППР (Плановая, обслуживание по графику или по наработке)	Система хорошо развита, имеет отработанную методологическую основу и позволяет поддерживать заданный уровень исправности и работоспособности энергооборудования.	Базируется на статистических данных историй отказов аналогичного оборудования с заложенным коэффициентом надежности, следовательно, для обеспечения заданного уровня его работоспособности изначально планируется объем работ превышающий требуемый фактически. Статистическая наработка не исключает полностью вероятность внепланового отказа.
ОФС (По фактическому состоянию, обслуживается только дефектное оборудование)	Исключает вероятность аварийных отказов и связанных с ними внеплановых простоев. Позволяет прогнозировать объемы технического обслуживания и производить ремонт исключительно дефектного оборудования.	Может быть осуществлена только посредством постепенного перехода от системы ППР и требует полного пересмотра организационной структуры. Требуется первоначально больших финансовых вложений для подготовки диагностов, специалистов и технического оснащения отдела надежности.
ПАО (Проактивное, дополнительно к ОФС применяется анализ причин дефектов и их локализация)	Максимальное увеличение межремонтного срока за счет подавления источников отказов. Используются самые прогрессивные технологии технического обслуживания, ремонта и восстановления энергооборудования.	Требуется трудоемкий анализ всех отказов с целью выявления их источников. Очень гибкая организационная система, постоянно требующая оперативного решения и внедрения ряда мероприятий по надежности и технологии ТОиР.

Таб. 1. Достоинства и недостатки систем ТОиР энергооборудования

Автор данной статьи имеет десятилетний практический опыт по комплексному обеспечению надежности энергомеханического промышленного оборудования и внедрению современных диагностических методов термографии, вибродиагностики и виброналадки (центровка и балансировка), а также трибодиагностке (анализ масел и смазок). В ходе реализации практических внедрений диагностических и инструментальных средств на крупные промышленные предприятия автором был разработан и внедрен комплексный подход к повышению надежности энергетического оборудования согласно концепции «Надежное оборудование: 2010» [3].

Данная концепция призвана облегчить работы, связанные с эксплуатацией, ремонтом и диагностикой энергетического оборудования начиная с организационных мероприятий и заканчивая прямым взаимодействием подразделений энергетиков, технологов и механиков с производителями оборудования, диагностическими средствами измерения и инструментальными обеспечивающими надежную эксплуатацию.

По данным статистики вибродиагностики энергетического оборудования двадцати двух промышленных предприятий самыми распространенными являются проблемы расцентровки и дисбаланса, которые определяются вибродиагностическими и термографическими методами, проблемы подшипниковых узлов определяются трибодиагностикой, вибродиагностикой и тепловизионными методами, а проблемы фундаментов и качества ремонтов диагностируются лазерными системами выверки геометрии. Разбив все часто возникающие задачи на категории физических основ производится разбивка дефектов и проблем, которые относятся в большинстве случаев к дефектам механической или электрической природы.

Надежность энергетического оборудования во всем мире реализуется через четыре формы технического обслуживания [1]:

- 1) Реактивное (реагирующее) профилактическое обслуживание (РПО);
- 2) Обслуживание по регламенту или плано-профилактическое обслуживание (ППР);
- 3) Обслуживание по фактическому техническому состоянию (ОФС);
- 4) Проактивное или предотвращающее обслуживание (ПАО);

В европейских и развитых странах используются прогрессивные формы ПАО и ОФС, а в России и странах СНГ регрессивные РПО и ОФС. Далее приведена таблица, в которой указаны основные достоинства и недостатки систем ТОиР для обеспечения надежности энергетического оборудования.

Для реализации прогрессивных методов ОФС и ПАО необходимо создать методики обеспечения надежности энергетического оборудования на базе методов технической диагностики. Суть методов технической диагностики заключается в оценке и прогнозе технического состояния объекта диагностики по результатам прямых или косвенных измерений параметров состояния или диагностических параметров.

Чтобы оценить техническое состояние объекта необходимо знать не только фактические значения параметров, но и соответствующие им нормируемые значения. Разница между фактическим $\theta_{\text{факт}}$ и нормируемым $\theta_{\text{норм}}$ значением называется диагностическим симптомом [2]. Основная сложность в определении критичности диагностического симптома заключается в отсутствии в большинстве случаев норм или эталонов исследуемых параметров (например, порога температур), а также отсутствие всех известных видов дефектов объекта и его диагностических признаков.

Принимая во внимание, что все методы технической диагностики, используемые в мировой практике, очень тесно граничат с теорией вероятности и имеют теоретическую достоверность 92-96%, а практическая достоверность любого метода технической диагностики находится в диапазоне 80%-90%, автором исследования были сделаны выводы, что для повышения достоверности диагностики и локализации дефекта необходимо использовать несколько методов технической диагностики (например, термография и вибродиагностика или трибодиагностика) или несколько разных научных методик одного направления технической диагностики (например, термографические методы преобразования и анализа термограмм) применительно к энергооборудованию (электродвигателю). Данная аппаратура (тепловизоры) и методы обработки тепловых фотографий объектов (термограмм) дают широкие возможности для исследовательских работ и разработки методик в будущем. Энергетическое оборудование (например, асинхронный двигатель) выбрано в качестве примера сложного объекта, в котором могут протекать физические процессы, вызванные совокупностью природы возникновения (механической, электродинамической, тепловой и др.). Методы термографии, используемые на сегодняшний день применительно к асинхронным двигателям, не дают достоверный диагноз по причине малой статистики, не большой рандомизации и относительно малого количества исследовательских методик, поэтому в исследовательской работе опираясь на статистические методы анализа ранжируются два класса состояния асинхронных электродвигателей во время эксплуатации (I – годные, II – не годные).

Для электрооборудования существуют «Нормы испытания» тепловизионными

методами согласно РД 34.45-51.300-97, а для диагностики асинхронных двигателей регламентирующая документация отсутствует, поэтому первичной задачей ставится расчет необходимого количества измерений n и расчет границ статистически возможных значений максимальной температуры для n измерений.

Преимуществами тепловизионной диагностики применительно к асинхронным двигателям является:

- Проведение технического контроля дистанционно в рабочем режиме электродвигателя;
- Безопасность персонала при проведении измерений;
- Не требуется отключение электродвигателя (бесконтактный контроль);
- Не требуется специальных помещений и подготовки рабочего места;
- Большой объем выполняемых диагностических работ за единицу времени;
- Возможность определение дефектов на ранней стадии развития;
- Диагностика всех типов асинхронных двигателей;
- Малые трудозатраты на производство измерений и диагностики;

По общему тепловому полю объекта, исследуя термограммы мы можем точно определить температурные пятна $t_{\text{max}}^{\circ\text{C}}$, $t_{\text{min}}^{\circ\text{C}}$, дисперсию с точностью до $0,1^{\circ\text{C}}$, что косвенно говорит о перегрете элемента и с высокой вероятностью возможно локализовать дефект.

В исследовательской работе, связанной с разработкой методов термографии сложных объектов были впервые разработаны:

- Методы и методики тепловизионной диагностики электромеханических систем по тепловому полю объекта.
- Проведена классификация видов дефектов энергомеханического оборудования по степени их развития и разбиение их по критичности.
- С помощью математических моделей и статистического анализа выработаны рекомендации по фактическому подходу к обслуживанию и диагностике энергетического оборудования
- Разработаны алгоритмы повышения надежности сложных объектов и совокупных элементов данного объекта ►

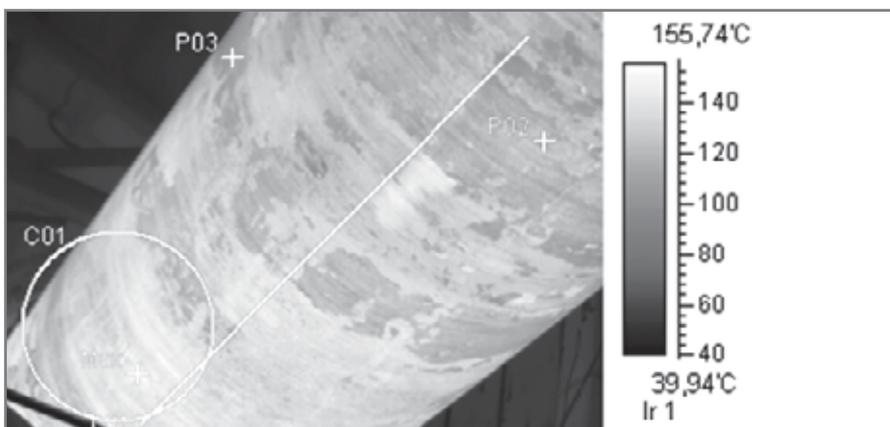


Рис.1 Пример термограммы с критическими «тепловыми пятнами»

Методы тепловизионной диагностики наиболее эффективны для энергомеханического оборудования: электродвигатели, предохранители, кабели, контакты соединительных кабелей и т.п.

Наиболее важным и дорогими из энергооборудования являются приводы динамического оборудования (электродвигатели). Задачи тепловизионной диагностики асинхронных двигателей могут решаться методами дисперсионного или дискриминантного анализа.

Однако об изменении температуры электродвигателя свыше нормативной в инструкции по обслуживанию рекомендуют судить по косвенным признакам, например по температуре подшипникового узла или корпуса электродвигателя, что является следствием нагрева других элементов.

Перегрев корпуса электродвигателя свыше $\Delta t=23^\circ$ от номинальной температуры вызывает не только нагрев обмоток (ротора, статора), но и изменения коэффициента теплопередачи, и, как следствие, вытекание смазки.

Тепловизионный контроль выявляет перегрев элемента в начальной стадии до появления внешних изменений и опасности разрушения.

Перегрев дает на термограмме яркое пятно с локализацией температуры. Поэтому для диагностики ее технического состояния достаточен контроль максимальной температуры теплового поля (рис.2). Для этого используют термограмму, снятую при фокусировке тепловизора на исследуемый элемент, с той стороны, где он не заслонен другими объектами с нормалью не менее 60° .

При периодическом контроле каждого электродвигателя с момента начала его эксплуатации в памяти тепловизора сохраняются значения t_{max} , что позволяет фиксировать изменение температуры корпуса.

Критерии диагностического контроля имеют вид:

$$\begin{cases} \Delta t = t_{max,i} - t_{max,0} \leq [\Delta t] \\ t_{max,i} \leq [t_{max}] \end{cases} \quad (1)$$

$t_{max,0}$ – максимальная температура в области теплового пятна, соответствующего

электродвигателю, в начальный момент времени или номинальное значение температуры, установленное производителем;

$t_{max,i}$ – тот же параметр при i -м тепловизионном контроле;

$[\Delta t]$ – допустимый перегрев электродвигателя;

$[t_{max}]$ – допустимая максимальная температура электродвигателя, установленная производителем.

Для увеличения достоверности тепловизионной диагностики производится повторное измерение теплограмм объекта при одном и тот же цикле контроля. Число измерений n должно быть не менее 5.

Расчет границ статистически возможных значений максимальной температуры для n измерений производят по формулам [3].

$$\begin{aligned} x_n^B &= \bar{x}_n + k_n^B \cdot S_n, \\ x_n^H &= \bar{x}_n - k_n^H \cdot S_n, \end{aligned} \quad (2)$$

$x = t_{max}$ – контролируемый параметр;

\bar{x}_n и S_n – среднее и дисперсия контролируемого параметра по n измерениям

$$\begin{aligned} \bar{x}_n &= \sum_{i=1}^n x_i / n; \\ S_n^2 &= \sum_{i=1}^n (\bar{x}_n - x_i)^2 / (n-1) \end{aligned}$$

k_n^B, k_n^H – толерантные коэффициенты.

Принимая доверительную вероятность $P=0,995$, получаем следующую формулу для расчета толерантных коэффициентов:

$$k_n^H = k_n^B = \frac{2,58}{\sqrt{n}} + 2,58 \cdot \sqrt{\frac{n-1}{\chi^2(P, f)}}$$

$\chi^2(P, f)$ квантиль распределения, который при ($5 \leq n \leq 10$) определяется по таблице 1.

При проверке соответствия максимальной температуры допускаемой по критериям (1) в качестве замеренного значения t_{max} используется его статистически возможное верхнее значение t_{max}^B , рассчитанное по формуле (2) по « n » результатам единовременного контроля,

$$t_{max}^B = \bar{t}_{max,n} + k_n^B \cdot S_{tn} \quad (3)$$

Окончательно проверка обеспечения допускаемой температуры диагностируемого элемента принимает вид:

$$t_{max,n}^B \leq [t_{max}] \quad (4)$$

Выводы:

1. Термографический метод диагностики является универсальным и эффективным методом оценки технического состояния и надежности асинхронных электродвигателей.
2. При проверке гипотезы минимального числа диагностических измерений и для оценки фактического технического состояния работающего электродвигателя достаточно пяти статистических измерений на данном объекте.
3. В случае невозможности различить визуально тепловые изображения элементов перекрывающих друг друга должны использоваться методы автоматического анализа и обработки термограмм.
4. Задачи тепловизионной диагностики могут решаться методами дисперсионного анализа с привлечением пакетов компьютерных программ обработки данных.
5. Для определения коэффициентов диагностических (дискриминантных) функций необходим сбор статистических данных о влиянии отдельных дефектов энергетического оборудования и сложных объектов на все тепловое поле. ■

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. Mitchell J.S. An Introduction to Machinery Analysis and Monitoring, PennWell Pub. Co., 1981, с. 35.
2. Ключев В.В., Соснин Ф.Р., Ковалев А.В. Неразрушающий контроль и диагностика. – М., Изд. Машиностроение, 2003г, с. 528.
3. Романов Р.А, Васильев Д.И. Тепловизионная диагностика промышленных объектов. Тезисы Международного симпозиума промышленных предприятий Украины и стран СНГ, г.Харьков, 13-14 апреля 2010., с.55.

n-1	4	5	6	7	8	9
χ^2	0,71	1,14	1,63	2,17	2,73	3,32

Таб. 1. Значения квантилей $\chi^2(P, f)$

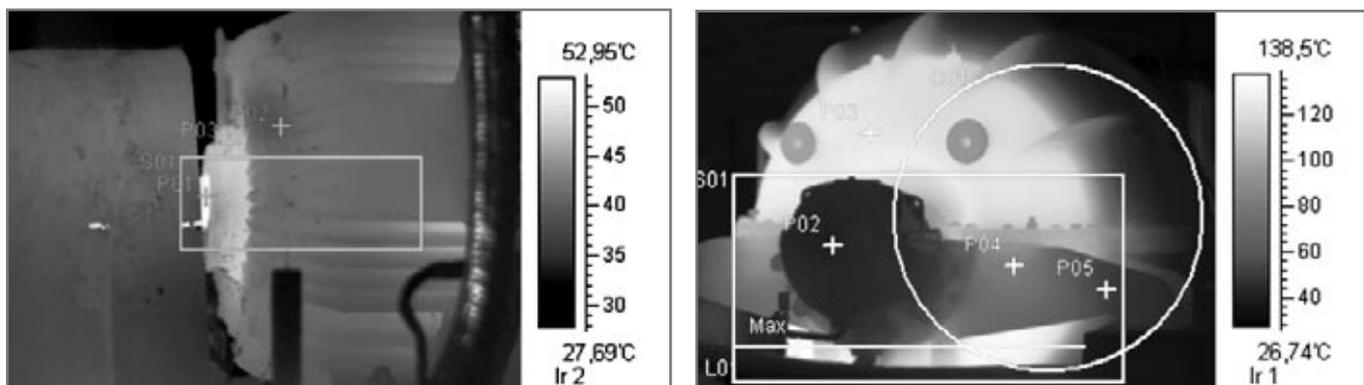


Рис.2 Диагностика структурной модели теплового поля асинхронных электродвигателей