

УДК 658.26.001.63; 621.311.172

Применение тепловизионной диагностики для оценки теплового состояния электрооборудования и температуры обмотки судовых электродвигателей

А.Б. Власов, Е.А. Мухин

Судомеханический факультет МА МГТУ, кафедра электрооборудования судов

Аннотация. Проведен экспериментальный и теоретический анализ теплового состояния электрооборудования и температуры обмоток электрических машин на основе дистанционного измерения с помощью тепловизионной техники. Показано, что возможно с достаточной степенью точности произвести расчет температуры в объеме обмотки при различных нагрузках.

Abstract. Experimental and theoretical analysis of heat condition equipment and temperature of windings of marine electric machines on the base of remote measurement by means of thermovision inspection has been carried out. It has been shown that it is possible to calculate temperature in volume of windings under different load with sufficient degree of accuracy.

Ключевые слова: термография, тепловизионная диагностика, электрическое оборудование, провод, судовая электрическая машина, техническое состояние

Key words: IR thermography, thermovision inspection, electric equipment, wire, marine electrical machine, technical condition

1. Введение

Термографическая (тепловизионная) диагностика является ведущим оперативным методом контроля технического состояния объектов тепло- и электроэнергетики. Преимуществом данного метода является оценка технического состояния объектов непосредственно в процессе эксплуатации под нагрузкой. В последние годы тепловизионный контроль электрического оборудования стал незаменимым методом технической диагностики не только в российских энергетических системах и предприятиях, но и у энергетических предприятий СНГ, в том числе Украины, Белоруссии, Казахстана и других.

Особое значение имеет развитие, с одной стороны, методов технической диагностики для выявления, локализации и предупреждения отказов элементов оборудования, определяющих вероятные отказы и повреждения, с другой – разработка эффективных методов статистической обработки полученных данных для определения на их основе показателей надежности.

Для контроля судовой инфраструктуры, подчиненной правилам морского Регистра, требуется разработка оперативных методов неразрушающего контроля.

В связи с развитием нефте- и газодобывающих комплексов на Арктическом шельфе на первый план выходят вопросы безопасности морских нефтедобывающих платформ, являющихся пожароопасными объектами, несущими потенциальную экологическую угрозу.

Важное значение методы тепловизионного контроля имеют и для оценки технического состояния энергетических объектов береговой инфраструктуры флота, включающей в себя электрическое оборудование порталных кранов, распределительные и трансформаторные подстанции, кабельные трассы и т.п., обеспечивающих энергоэффективную деятельность судов (у причалов), судоремонтных предприятий и других объектов.

2. Перспективы тепловизионной диагностики судового энергетического оборудования

Возможности тепловизионного метода как средства контроля работоспособности энергетического оборудования представлены в работах (Власов, 2005; 2006а,б).

Задачей тепловизионной диагностики на судах является инженерный аудит разнообразного оборудования и выявление дефектов элементов судового энергетического оборудования с учетом уровня нагрузки, условий и сроков эксплуатации, районов плавания, перспектив ремонта и замены элементов оборудования на основе оперативного неразрушающего контроля непосредственно при рабочих режимах нагрузки. С этой позиции тепловизионная диагностика представляет собой высокоэффективное диагностическое средство для снижения техногенных и технологических рисков на судах как объектах повышенной опасности.

Тепловизионная диагностика судового электрооборудования имеет свои особенности, связанные со спецификой её применения.

На большинстве отечественных судов основная часть оборудования выработала свой ресурс, но не меняется из-за недостатка финансирования. Если учесть еще и кратковременность пребывания судов в портах, на первый план выходит вопрос о временных затратах для экспресс-диагностики и устранения дефектов технического состояния. Поэтому для целей технической диагностики оборудования необходимо разрабатывать новые методы, которые обеспечивают оперативную дистанционную диагностику оборудования, находящегося под нагрузкой.

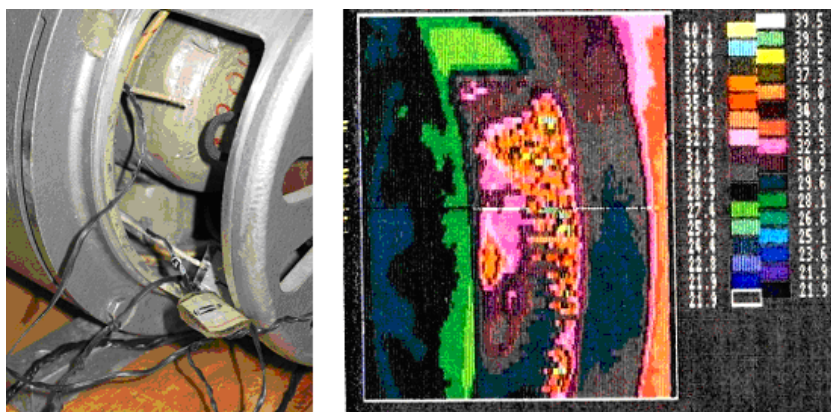
Существующие руководящие документы и методики тепловизионной диагностики, ориентированные, главным образом, на объекты высоковольтного электрооборудования, не учитывают проблемы, связанные со спецификой судового электрооборудования.

На примере тепловизионной диагностики электрооборудования судов и береговой инфраструктуры показана эффективность подобного технического метода (Власов, Мухин, 2010). Обследованию подвергалось энергетическое оборудование судов различного класса и назначения, в том числе РТМК-С типа "Моонзунд" проект "Атлантик 488" ("М-0011 Борис Сыромятников"), УПС "Седов" и др. Обследованы объекты судовой электро- и теплоэнергетики: кабельные трассы, оборудование ГРЩ, двигатели, технологическое, теплоэнергетическое и другое оборудование. В ряде случаев температура поверхности элементов электрического оборудования судов достигала 60-70 °С при нагрузке, составляющей 25-30 % от номинальной, что свидетельствует о повышенной электро- и пожароопасности.

Тепловое состояние судовых кабельных трасс эффективно анализируется в процессе тепловизионного контроля непосредственно при наличии токовой нагрузки. Это позволяет выявить состаренные участки кабельных трасс, предотвратить избыточный перегрев изоляции, устранить источники повышенной пожароопасности.

Перспективным является разработка методики тепловизионного контроля судовых электродвигателей в процессе эксплуатации и после ремонта (рис. 1).

Рис. 1. Фото и термограмма обмотки статора электродвигателя



3. Расчет температуры в объёме обмотки судовых электродвигателей

Известные методы оценки температуры поверхности обмоток не дают полной информации о техническом состоянии электродвигателя, поскольку отсутствуют методики оценки температуры в объёме, например, статорной обмотки.

Нами разработана методика оценки температуры в центре статорной обмотки асинхронного электродвигателя путем дистанционного измерения температуры поверхности t_n и расчета поверхностной плотности теплового потока q_s от обмоток при различной нагрузке P .

Рассмотрим алгоритм расчета температуры статорной обмотки на примере асинхронного двигателя (АД) серии АОМШ со следующими паспортными данными: $P_n = 0,35$ кВт, $I_n = 1$ А, $U_n = 380$ В, $\eta_n = 64$ %, $\cos\theta = 0,8$, $n = 2760$ об/мин, класс изоляции В, режим работы S1.

Температура поверхности t_n обмотки контролировалась дистанционно с помощью тепловизора, пирометра, а также закрепленными контактными термомпарами. Для измерения величины поверхностной плотности теплового потока $q_{s,эксп}$ от статорной обмотки АД на её лобовую часть были установлены датчики теплового потока. Испытание проводилось согласно ГОСТ 7217-87 для трёх значений нагрузки: $0,6P_n$, P_n , $1,2P_n$.

На рис. 2 представлена экспериментальная зависимость температуры поверхности t_n статорной обмотки АД от времени τ испытаний непосредственно в процессе работы электродвигателя в различных режимах.

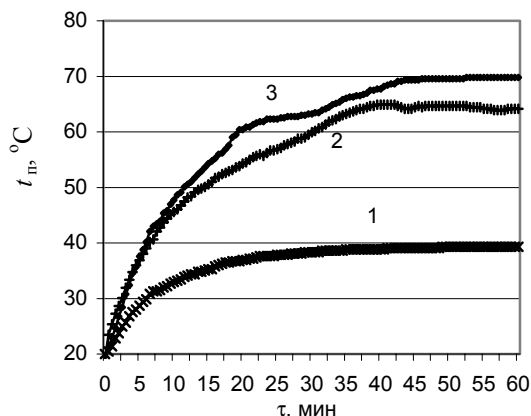


Рис. 2. Зависимость температуры поверхности t_n обмотки АД от времени испытаний:
1 – $0,6P_n$; 2 – P_n ; 3 – $1,2P_n$

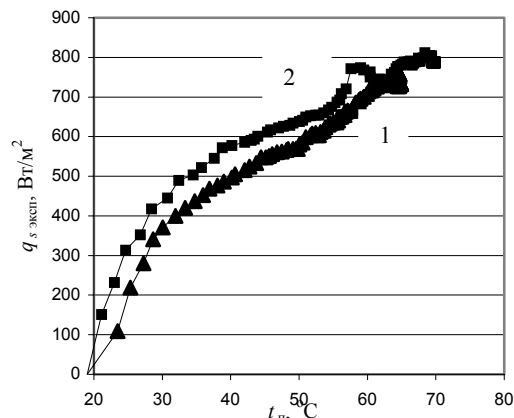


Рис. 3. Зависимость $q_{s\text{эксп}}$ от температуры поверхности t_n : 1 – P_n ; 2 – $1,2P_n$

В частности, после 60 минут испытаний при номинальной нагрузке P_n температура поверхности изоляции лобовой части обмотки достигла значения $t_n = 64,2$ °С, а превышение температуры Δt_n поверхности над температурой окружающей среды $t_0 = 45,2$ °С. Равновесная температура поверхности при номинальной нагрузке $1,2P_n$ равна $t_n = 69,8$ °С, а $\Delta t_n = 50,8$ °С.

На рис. 3 приведена экспериментальная зависимость поверхностной плотности теплового потока $q_{s\text{эксп}}$ от температуры поверхности t_n статорной обмотки АД для нескольких значений нагрузки. Например, поверхностная плотность теплового потока $q_{s\text{эксп}}$, измеренная экспериментально при номинальной нагрузке P_n в момент $\tau = 60$ мин, составляет $q_{s\text{эксп}} = 738,9$ Вт/м².

Коэффициент теплоотдачи α от поверхности (цилиндрической формы) статорной обмотки АД упрощенно рассчитывается (Власов, 2006а,б):

$$\alpha = 1,33 \cdot (\Delta t_n / d)^{0,25} + 2,04 \cdot 10^{-7} \cdot \varepsilon \cdot (t_0 + 273)^3 \cdot \{ [2,08 \cdot (t_n + 273) / (t_0 + 273)] - 1 \} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С}), \quad (1)$$

где d – диаметр секции обмотки статора, м; ε – коэффициент излучательности.

На рис. 4 представлен график изменения коэффициента теплоотдачи α от лобовой части статорной обмотки АД, рассчитанного по соотношению (1), в зависимости от температуры поверхности t_n при температуре среды $t_0 = 19$ °С.

Например при нагрузке, равной номинальной P_n , в момент $\tau = 60$ мин при $t_0 = 19$ °С и $t_n = 64,2$ °С, $d = 0,006$ м, $\varepsilon = 0,95$ из соотношения (1) получаем:

$$\alpha = 1,33 \cdot (45,2 / 0,006)^{0,25} + 2,04 \cdot 10^{-7} \cdot 0,95 \cdot (19 + 273)^3 \cdot [(2,08 \cdot (64,2 + 273) / (19 + 273)) - 1] = 19,16 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С}). \quad (2)$$

При полном учете факторов, влияющих на коэффициент теплоотдачи (форма обмотки, определяющий размер и другие), с помощью разработанной программы (Власов, 2003) получено значение $\alpha = 19,2$ Вт/(м²·°С).

Известна взаимосвязь между поверхностной плотностью теплового потока q_s и превышением температуры поверхности Δt_n :

$$q_s = \alpha \Delta t_n. \quad (3)$$

Подставляя в соотношение (3) расчетное значение α при экспериментально измеренном значении $\Delta t_n = 45,2$ °С, получаем теоретическое значение $q_{s\text{теор}} = 867,84$ Вт/м².

Уменьшение экспериментального значения поверхностной плотности теплового потока $q_{s\text{эксп}}$ (738,9 Вт/м²) по сравнению с теоретическим значением $q_{s\text{теор}}$ (867,84 Вт/м²) объясняется сложностью измерения плотности теплового потока с помощью плоского датчика, контактно прижимаемого к обмотке цилиндрической формы.

Таким образом, расчет коэффициента теплоотдачи α по данным измерения температуры поверхности t_n и среды t_0 позволяет теоретически оценить величину поверхностной плотности теплового потока $q_{s\text{теор}}$ по соотношению (3).

Объемная плотность теплового потока q_v , рассчитывается из отношения:

$$q_v = 2q_s / r_n, \text{ Вт}/\text{м}^3, \quad (4)$$

где $r_n = d/2 = 0,003$ м – радиус секции обмотки статора.

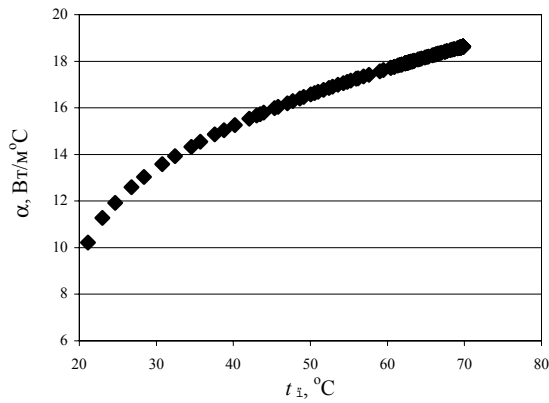


Рис. 4. Изменение α от температуры поверхности $t_{\text{п}}$ обмотки

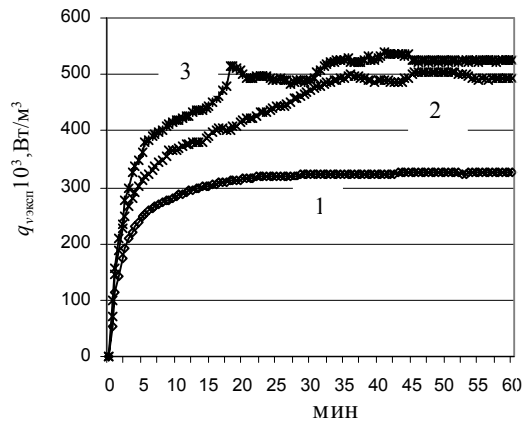


Рис. 5. Зависимость изменения $q_{\text{vэксп}}$ от времени испытаний: 1 – $0,6P_{\text{н}}$; 2 – $P_{\text{н}}$; 3 – $1,2P_{\text{н}}$

На рис. 5 представлена зависимость экспериментального значения объёмной плотности теплового потока $q_{\text{vэксп}}$ от времени испытаний τ .

Из соотношения (4) получаем $q_{\text{vтеор}} = 2 \cdot 867,84 / 0,003 = 578,56 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^3$.

Секция обмотки исследуемой электрической машины состоит из медных проводников, покрытых лаковым изоляционным материалом. Для описания процесса теплопроводности в объёме секции вводится понятие коэффициента теплопроводности замещающего тела $\lambda_{\text{зам}}(t)$, определяемого соотношением (Таев, 1987):

$$\lambda_{\text{зам}}(t_{\text{п}}) = a_{\text{н}} \{ \lambda_{\text{из}} \cdot \lambda_{\text{в}}(t_{\text{п}}) \cdot [(d_{\text{пров}}/\delta_{\text{из}}) + 1] \}^{0,5} - b_{\text{н}} \cdot \lambda_{\text{в}}(t_{\text{п}}), \text{ Вт/м} \cdot \text{°С}, \quad (5)$$

где используются следующие параметры: диаметр проводника статорной обмотки $d_{\text{пров}} = 0,4 \text{ мм}$, толщина изоляции $\delta_{\text{из}} = 0,05 \text{ мм}$, коэффициент теплопроводности лакового покрытия проводников $\lambda_{\text{из}} = 0,18 \text{ Вт/м} \cdot \text{°С}$, безразмерные коэффициенты $a_{\text{н}} = 1,45$, $b_{\text{н}} = 1,57$.

Зависимость коэффициента теплопроводности сухого воздуха $\lambda_{\text{в}}(t_{\text{п}})$ рассчитывается:

$$\lambda_{\text{в}}(t_{\text{п}}) = 0,0244 + 2 \cdot 10^{-11} t_{\text{п}}^3 - 4 \cdot 10^{-8} t_{\text{п}}^2 + 8 \cdot 10^{-5} t_{\text{п}}. \quad (6)$$

При $t_{\text{п}} = 64,2 \text{ °С}$, коэффициент теплопроводности сухого воздуха $\lambda_{\text{в}}$ равен:

$$\lambda_{\text{в}} = 0,0244 + 2 \cdot 10^{-11} \cdot 64,2^3 - 4 \cdot 10^{-8} \cdot 64,2^2 + 8 \cdot 10^{-5} \cdot 64,2 = 0,029 \text{ Вт/м} \cdot \text{°С}. \quad (7)$$

С учетом (5-7) рассчитываем коэффициент теплопроводности замещающего тела $\lambda_{\text{зам}}$:

$$\lambda_{\text{зам}} = 1,45 \cdot [0,18 \cdot 0,029 \cdot \{(0,4/0,05) + 1\}]^{0,5} - 1,57 \cdot 0,029 = 0,27 \text{ Вт/м} \cdot \text{°С}. \quad (8)$$

Статорная обмотка АД является объектом с внутренним источником теплоты. При тепловыделении в объёме обмотки цилиндрической формы устанавливается равновесная температура $t_{\text{макс}}$. Превышение температуры $\Delta t_{\text{макс}}$ центра обмотки над температурой окружающей среды t_0 , составляет (Исаченко, 1981):

$$\Delta t_{\text{макс}} = [q_{\text{vтеор}}/2\lambda_{\text{зам}}(t_{\text{п}})] \cdot (r_{\text{п}}^2/2) + q_{\text{в}} r_{\text{п}}/2\alpha = (t_{\text{макс}} - t_{\text{п}}) + (t_{\text{п}} - t_0), \text{ °С}. \quad (9)$$

Подставляя в соотношение (9) рассчитанные ранее значения $q_{\text{в}}$, $\lambda_{\text{зам}}$, α , определяем $\Delta t_{\text{макс}}$:

$$\Delta t_{\text{макс}} = [578,56 \cdot 10^3 / (2 \cdot 0,27)] \cdot (0,003^2/2) + 578,56 \cdot 10^3 \cdot 0,003 / (2 \cdot 19,2) = 4,8 + 45,2 = 49,9 \text{ °С}. \quad (10)$$

Максимальная температура в центре статорной обмотки $t_{\text{макс}}$ рассчитывается с учетом t_0 :

$$t_{\text{макс}} = \Delta t_{\text{макс}} + t_0. \quad (11)$$

Таким образом, расчетное значение максимальной температуры в объёме статорной обмотки при нагрузке, равной номинальной $P_{\text{н}}$, температуре окружающей среды $t_0 = 19 \text{ °С}$ составляет

$$t_{\text{макс}} = 49,9 + 19 = 68,9 \text{ °С}. \quad (12)$$

Аналогично, можно рассчитать, что при нагрузке $1,2P_{\text{н}}$ максимальная температура в обмотке достигает значения $t_{\text{макс}} = 75,4 \text{ °С}$.

Известно, что допустимая температура нагрева изоляционного материала класса нагревостойкости B составляет $135\text{ }^{\circ}\text{C}$, а допустимая температура нагрева обмоток электродвигателя не должна превышать $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ при температуре среды $t_0 = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Результаты испытаний показывают, что при исследуемых режимах нагрузки расчетное значение температуры t_{max} исследуемого двигателя не превышает $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ при температуре среды $t_0 = 19\text{ }^{\circ}\text{C}$. При перерасчете данных в соответствии с требованиями ГОСТ 8024-90 на температуру среды, равную $t_0 = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, можно ожидать, что t_{max} изоляции проводов достигнет $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, что свидетельствует об удовлетворительном тепловом состоянии изоляции исследуемой электрической машины.

4. Заключение

Разработанный метод позволяет с достаточной точностью рассчитать температуру в объеме статорной обмотки на основе дистанционного измерения температуры поверхности обмотки, расчета коэффициента теплоотдачи, теоретической или экспериментальной оценки величины теплового потока от поверхности при различных температурах окружающей среды, видов нагрузки, условий эксплуатации.

Представленные данные показывают возможности дистанционного метода оценки температуры центральных слоев обмотки судовых электрических машин в процессе эксплуатации для непрерывного мониторинга или периодического контроля их технического состояния.

Литература

- Власов А.Б.** Дистанционная оценка величины тепловых потоков оборудования на основе тепловизионной диагностики. *Электротехника*, № 4, с.45-49, 2006а.
- Власов А.Б.** Модели и методы термографической диагностики объектов энергетики. *М., Колос*, 280 с., 2006б.
- Власов А.Б.** Программа расчета коэффициента теплопередачи от поверхности при тепловизионном контроле. *Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2003611742 регистр. 22.08.2003. Российское агентство по патентам и товарным знакам*, 2003.
- Власов А.Б.** Тепловизионная диагностика объектов электро- и теплоэнергетики (диагностические модели). *Мурманск, МГТУ*, 265 с., 2005.
- Власов А.Б., Мухин Е.А.** Оценка технического состояния электрооборудования судов методом тепловизионной диагностики. *Эксплуатация морского транспорта*, № 3, с.66-69, 2010.
- Исаченко В.П.** Теплопередача. Учебник для вузов. *М., Энергоиздат*, 416 с., 1981.
- Таев И.С.** Основы теории электрических аппаратов. Учеб. для вузов. *М., Высш. шк.*, 352 с., 1987.