

## ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL PAPERS

DOI: 10.17073/2500-0632-2019-3-188-201

### Диагностирование теплового состояния электромеханического оборудования

Борисенко В. Ф.<sup>1</sup>, Землянский А. И.<sup>1</sup>, Сидоров В. А.<sup>1</sup>, Сидорова Е. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ✉andrewiz@yandex.ua

<sup>2</sup>Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия

**Аннотация:** В работе рассмотрены вопросы контроля теплового состояния объектов промышленной группы производственных механизмов на основе обобщенного подхода к пониманию причин и целей диагностирования электромеханических систем (ЭМС) по текущим значениям температуры. Обобщенная математическая модель ЭМС (однородного тела или многомассовой расчетной тепловой схемы замещения) для различных режимов работы объекта позволяет обозначить диагностические признаки (критерии) для принятия конкретных мер по стабилизации его работы. Повышение эффективности контроля теплового состояния объектов можно достичь при использовании приборов бесконтактного измерения распределения температур по всей поверхности объекта. По виду распределения температур по поверхности объектов ЭМС можно сделать вывод о необходимости проведения ремонтных работ. Для эффективного использования бесконтактной тепловизионной техники для диагностики ЭМС на основе изложенных в статье положений разработана программа подготовки специалистов по термометрированию промышленных объектов.

**Ключевые слова:** тепловой контроль, электромеханическая система, тепловая расчетная масса, распределение температур, диагностический признак.

**Для цитирования:** Борисенко В. Ф., Землянский А. И., Сидоров В. А., Сидорова Е. В. Диагностирование теплового состояния электромеханического оборудования. *Горные науки и технологии*. 2019;4(3):188-201. DOI: 10.17073/2500-0632-2019-3-188-201.

### Diagnostics of Thermal Condition of Electromechanical Machinery

V. F. Borisenko<sup>1</sup>, A. I. Zemlyansky<sup>1</sup>, V. A. Sidorov<sup>1</sup>, E. V. Sidorova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Donetsk National Technical University, Donetsk, ✉andrewiz@yandex.ua

<sup>2</sup>Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia

**Abstract:** The paper is devoted to studying issues of machinery thermal state monitoring using generalized approach to objectives of electromechanical system (EMS) diagnostics based on current temperature values. Generalized mathematical model of EMS (a homogeneous body or a multi-weight estimated heat balance diagram) for various operation conditions of a facility allows to identify diagnostic indicators (criteria) for taking specific measures to stabilize its operation. Increasing efficiency of the facility thermal state monitoring can be achieved using non-contact measuring instruments to determine temperature distribution over the facility surface. Temperature distribution over an EMS facility surface enables concluding on maintenance necessity. For effective application of non-contact thermal-imaging equipment for diagnostics of EMS on the basis of the provisions presented in the paper, training program for specialists in thermomentering of industrial facilities has been developed.

**Keywords:** thermal monitoring, electromechanical system, thermal estimated weight, temperature distribution, diagnostic indicator.

**For citation:** Borisenko V. F., Zemlyansky A. I., Sidorov V. A., Sidorova E. V. Diagnostics of thermal condition of electromechanical machinery. *Mining Science and Technology*. 2019;4(3):188-201 (In Russ.). DOI: 10.17073/2500-0632-2019-3-188-201.

#### Введение

Вопросы диагностирования технического состояния электромеханических систем

(ЭМС) в настоящее время стоят довольно остро, что объясняется физическим и моральным износом действующего промыш-



ленного оборудования, срок реновации которого давно истек. Стремление продлить его работу ставит перед обслуживающим персоналом и научными кадрами задачу текущего контроля объекта и его узлов на основе последних достижений науки и техники.

В промышленности используется большое число производственных механизмов, приводимых в движение различными типами двигателей. Это могут быть ветро-, пневмо-, гидро-, электродвигатели. Каждый тип привода обладает своими особенностями, спецификой применения и условиями эксплуатации. В процессе осуществления рабочей операции происходит нагрев отдельных элементов (звеньев) системы, причем некоторые звенья нагреваются до таких температур, которые недопустимы по условиям технологического процесса и нормального (нормативного) функционирования механизма. Нагрев элементов блоков системы возможен за счет трения, теплоизлучения, конвекции, протекания недопустимых токов по обмоткам электродвигателей в случае плохих (слабых) контактов в цепях коммутационной аппаратуры, при недостаточном охлаждении трансформаторов и др.

С другой стороны, механическая часть системы испытывает нагрузки на кручение (валы, оси), на растяжение-сжатие (канаты, штоки); шестерни испытывают контактную нагрузку, которая может существенно отличаться от расчетной (номинальной) при пуско-тормозных режимах и частых реверсированиях. При всех возможных режимах работы ЭМС механическая прочность не должна падать ниже так называемой точки бифуркации, когда нарушается закон Гука и происходят структурные изменения в металле. В общем случае контроль технического состояния системы должен базироваться на показателях работы электрической и механической частей системы одновременно.

Визуальный осмотр объекта, контроль текущих величин энергопотребления не дают убедительных ответов на текущее безаварий-

ное состояние объекта. Имеют место многократные попытки контролировать тепловое состояние наиболее ответственных звеньев электромеханической системы (подшипников, статоров, якорей двигателей). В случае превышения необходима разгрузка механизма или отключение системы.

Контроль температуры отдельных элементов в этом случае позволяет оценить не только степень нагрева, но и техническое состояние объекта, используя логические зависимости при диагностировании. Повышение температуры сопровождается появлением и развитие ряда неисправностей. Органолептическое восприятие температуры позволяет сделать вывод на уровне «холодно», «тепло», «горячо». Контактное измерение температуры при локализации точки контроля не позволяет судить о состоянии объекта в целом. Бесконтактное измерение с использованием инфракрасной тепловизионной аппаратуры позволяет перейти к анализу тепловой картины объекта, выделив информативные узлы наиболее наглядным образом – путем визуализации тепловой картины. Интерес к решению данных вопросов подтверждается увеличением количества работ, посвященных этой теме, опубликованных в последние годы [1...9]. Анализ данной картины включает много аспектов, рассмотрению некоторых из них относительно оптимизации процесса диагностирования и подготовки специалистов посвящена данная статья.

**Контроль теплового состояния элементов электрической части системы.** Любая электромеханическая система содержит одни и те же элементы: источник питания, управляемый преобразователь, приводной электродвигатель, промежуточное механическое звено (редуктор), исполнительный орган или механизм [10...12]. Энергия к предприятию подводится на высоком напряжении линий электропередачи (ЛЭП) и на главной понизительной подстанции трансформируется в напряжения 35 и 10 кВ. Далее по кабельным линиям она поступает на цехо-

вые подстанции, где происходит дальнейшая трансформация напряжения под нужды конкретных потребителей. В качестве основных потребителей в цехах выступают приводные двигатели (синхронные, асинхронные) на напряжения 10, 6, 3, 0,4 кВ; преобразовательные агрегаты – тиристорные регуляторы напряжения (на постоянном и переменном токе), тиристорные преобразователи частоты (с непосредственной связью или со звеном постоянного тока). Преобразователи питают двигатели постоянного или переменного тока в системах ТП-Д, ТРН-АД, ТПЧ-АД, ТПЧ-СД. Системы электропривода могут работать в одном из восьми режимов  $S1...S8$ , основными из которых считаются длительный ( $S1$ ), кратковременный ( $S2$ ), повторно-кратковременный ( $S3$ ). Каждому режиму присущи свои особенности работы по условиям нагрева [13, 14, 16...19]. У двигателей наиболее слабым звеном считается его изоляция. Оценить тепловое состояние двигателя возможно, используя один из рассмотренных далее подходов. Наиболее простой случай – представление двигателя однородным телом [10, 11] и решение уравнения

$$\tau = \tau_{уст} (1 - e^{-t/T_n}) \quad (1)$$

где  $\tau_{уст}$  – установившаяся температура перегрева;  $T_n$  – постоянная времени нагрева.

В настоящее время в большинстве случаев используется изоляция классов  $F$  и  $H$ . Уравнение (1) представляет экспоненциальную зависимость, температура перегрева, близкая к установившейся, будет достигнута через время  $t = 3T_n$ ,  $\tau = 0,95\tau_{уст}$ . В зависимости от класса изоляции можем судить о тепловом состоянии двигателя:

$$\tau_{тек} < \tau_{доп.изл},$$

где  $\tau_{тек}$  – текущее значение температуры нагрева;  $\tau_{доп.изл}$  – допустимая температуры нагрева для данного класса изоляции.

Реально двигатель не является однородным телом, а состоит из множества элементов. Поэтому желание наиболее точно оценить тепловое состояние двигателя приводит

к представлению последнего многомассовой расчетной схемой. Число расчетных масс тепловой схемы замещения (ТСЗ) двигателя в зависимости от конкретной задачи может приниматься от 2 до 15...17 [12, 13, 15, 20]. Для практических расчетов ТСЗ не превышает 5...7, результаты расчетов дают возможность оценить тепловое состояние каждой из расчетных масс и выявить более нагретую.

Тепловое состояние  $n$ -го тела может быть описано следующим уравнением:

$$C_n \frac{d\theta_n}{dt} = \sum_{i=1}^{q(i \neq n)} \Lambda_{in} (\theta_i - \theta_n) + P_n, \quad (2)$$

где  $C_n$  – теплоемкость  $n$ -го тела;  $\theta_n$  – температура  $n$ -го тела;  $\theta_i$  – температура одного из соседних тел  $i$ ;  $q$  – количество тел, связанных в тепловом отношении с рассматриваемым телом  $n$ ;  $\Lambda_{in}$  – теплоотдача от одного из соседних тел  $i$  к данному телу  $n$ ;  $P_n$  – потери мощности в данном теле  $n$ ;  $t$  – текущее время.

Для схемы из  $n$  тел уравнения теплового баланса будут иметь следующий вид [10, 13]:

$$\begin{cases} C_1 \frac{d\theta_1}{dt} = \left( - \sum_{i=2}^m \Lambda_{i1} \right) \theta_1 + \sum_{i=2}^m \Lambda_{i1} \theta_i + P_1, \\ C_2 \frac{d\theta_2}{dt} = \left( - \sum_{i=1}^{k(i \neq 2)} \Lambda_{i2} \right) \theta_2 + \sum_{i=1}^{k(i \neq 2)} \Lambda_{i2} \theta_i + P_2, \\ \dots, \\ C_n \frac{d\theta_n}{dt} = \left( - \sum_{i=2}^{q(i \neq n)} \Lambda_{in} \right) \theta_n + \sum_{i=2}^{q(i \neq n)} \Lambda_{in} \theta_i + P_n, \end{cases} \quad (3)$$

где  $m$  – количество тел, связанных в тепловом отношении с первым телом;  $k$  – количество тел, связанных в тепловом отношении со вторым телом.

Решение системы приводит к определению средней температуры  $n$ -го тела в момент времени  $t$ .

Уравнения теплового баланса целесообразно привести к виду

$$\begin{cases} C_{M1} \frac{d\theta_{M1}}{dt} = P_{M1}(t), \\ C_{M2} \frac{d\theta_{M2}}{dt} = P_{M2}(t), \end{cases} \quad (4)$$

где  $C_{M1}$ ,  $C_{M2}$  – полные теплоемкости обмоток статора и ротора;  $\theta_{M1}$ ,  $\theta_{M2}$  – текущие значения

температур обмоток;  $P_{M1}(t)$ ,  $P_{M2}(t)$  – текущие значения электрических потерь в обмотках статора и ротора.

При исследовании динамики, например, асинхронного электропривода его поведение описывается системой дифференциальных уравнений в осях  $x$ ,  $y$  [10...12]:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{sx}}{dt} = U_{sx} - \frac{1}{T_{s1}}\psi_{sx} + \frac{k_r}{T_{s1}}\psi_{rx} - \omega_s\psi_{sy}, \\ \frac{d\psi_{sy}}{dt} = -\frac{1}{T_{s1}}\psi_{sy} + \frac{k_r}{T_{s1}}\psi_{ry} - \omega_s\psi_{sx}, \\ \frac{d\psi_{rx}}{dt} = -\frac{1}{T_{r1}}\psi_{rx} + \frac{k_s}{T_{r1}}\psi_{sx} + (\omega_s - Z_p\omega)\psi_{ry}, \\ \frac{d\psi_{ry}}{dt} = -\frac{1}{T_{r1}}\psi_{ry} + \frac{k_s}{T_{r1}}\psi_{sy} - (\omega_s - Z_p\omega)\psi_{rx}, \end{cases} \quad (5)$$

а выражение для электрических потерь имеет вид

$$\begin{cases} P_{M1}(t) = 3I_s^2 R_s, \\ P_{M2}(t) = 3I_r^2 R_r, \end{cases} \quad (6)$$

где  $P_{M1}(t)$ ,  $P_{M2}(t)$  – текущие значения электрических потерь в обмотках статора и ротора;  $I_s$ ,  $I_r$  – действующие значения токов статора и ротора;  $R_s$ ,  $R_r$  – активные сопротивления обмоток статора и ротора.

Мгновенные значения токов в обмотках электрической машины находим из системы уравнений, имеющей вид

$$\begin{cases} i_{sx} = \frac{1}{\sigma L_s}(\Psi_{sx} - k_r \Psi_{rx}), \\ i_{sy} = \frac{1}{\sigma L_s}(\Psi_{sy} - k_r \Psi_{ry}), \\ i_{rx} = \frac{1}{\sigma L_r}(\Psi_{rx} - k_s \Psi_{sx}), \\ i_{ry} = \frac{1}{\sigma L_r}(\Psi_{ry} - k_s \Psi_{sy}). \end{cases} \quad (7)$$

Действующие значения токов для подстановки в (6) получаем из (8):

$$\begin{cases} i_s = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{i_{sx}^2 + i_{sy}^2}, \\ i_r = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{i_{rx}^2 + i_{ry}^2}. \end{cases} \quad (8)$$

Зная текущие потери в статоре и роторе, можно перейти к определению температур обмоток  $\theta_{M1}$  и  $\theta_{M2}$  с помощью (4).

При исследовании пускового режима температуры обмоток  $\theta_{M1}$  и  $\theta_{M2}$  находятся при совместном решении (4) и (6). В дальнейшем они используются как начальные условия при исследовании теплового состояния двигателя при конкретном характере нагружения.

Примеры определения температур обмотки статора в лобовой и пазовой частях по изложенной методике приведены на рис. 1 [10]. На первом этапе работы двигателя виден интенсивный нагрев его элементов под действием пусковых токов  $\approx 5,5 I_H$ , далее процесс нарастания температур существенно замедляется, так как имеет место работа двигателя с постоянной нагрузкой и расчетными условиями охлаждения.

На рис. 2 приведены экспериментальные подтверждения теоретических постулатов для режима повторного включения двигателя конвейера и контроля лобовой части двигателя (рис. 2, а), увеличение скорости нагрева подшипника двигателя при нарушении режима смазки (рис. 2, б). Сложность практического использования любой теоретической модели заключается в отсутствии точного значения коэффициентов и расчетных значений. В этом случае используется методика взаимного или динамического сравнения контролируемых параметров.

При работе двигателя в режиме ПКР с частыми пусками интенсивность нагрева элементов машины возрастает в первые несколько десятков циклов, а далее имеет место переход в квазиустановившийся режим работы (по условиям нагрева). Получение в этом случае  $\theta_{паз} > \theta_{доп}$  (для конкретного класса изоляции) будет диагностическим критерием для снижения нагрузки на двигатель или перехода на систему, ограничивающую пусковые токи, например ТРН-АД или ТПЧ-АД, ПЧ-АД. При использовании системы ПЧ-АД удастся уйти от перегрева двигателя при частых пусках (рис. 3).



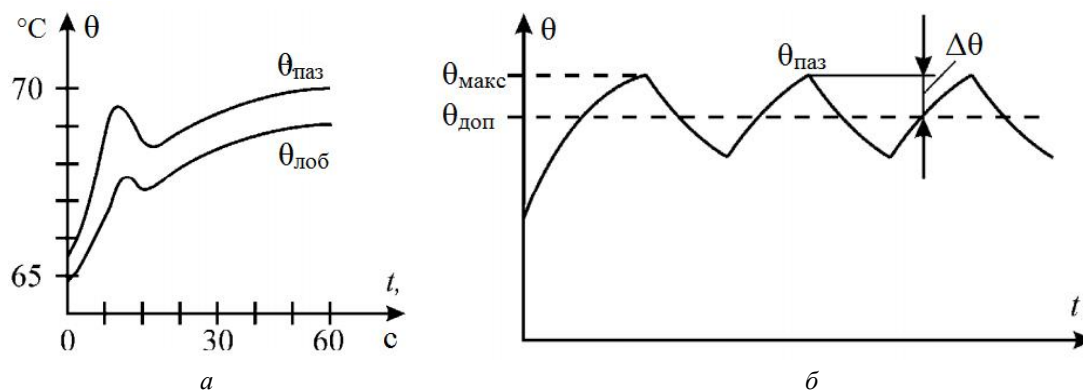


Рис. 1. Кривые нагрева  $\theta(t)$  электродвигателя:  
 $a$  – длительный режим;  $b$  – повторно-кратковременный режим (ПКР)

Fig. 1. Heating curves  $\theta(t)$  of electric motor:  
 $a$  – continuous service;  $b$  – intermittent service (IS)

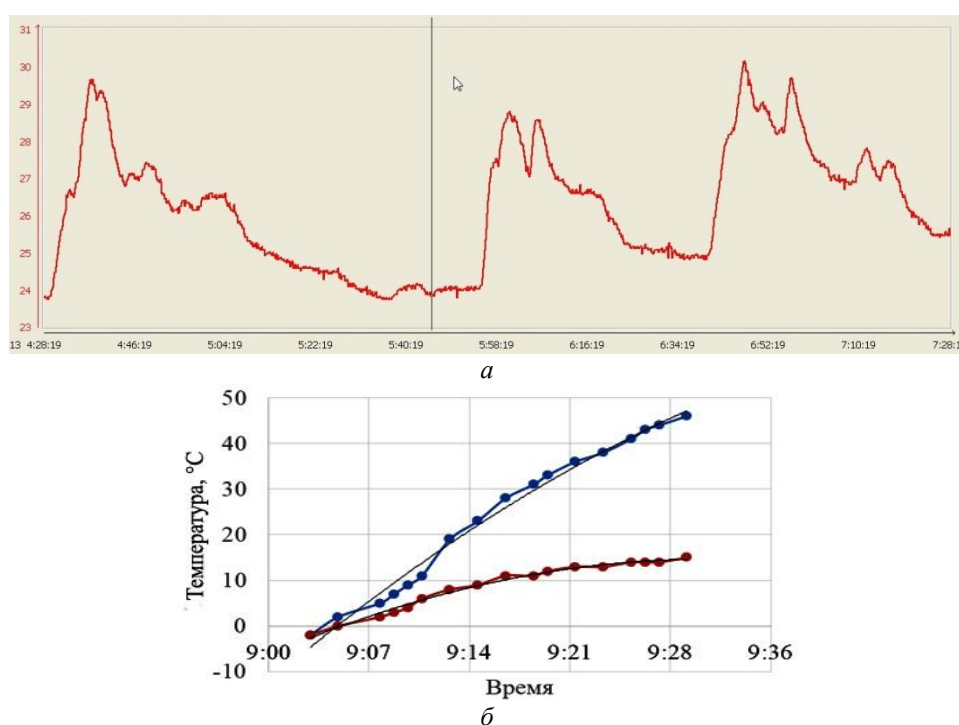


Рис. 2. Экспериментальные кривые нагрева узлов электродвигателей конвейера:  
 $a$  – нагрев лобовой части двигателя конвейера при периодическом включении;  $b$  – рост скорости нагрева подшипника двигателя при нарушении режима смазки

Fig. 2. Experimental heating curves for conveyor electric motor units:  
 $a$  – heating of frontal part of conveyor motor at intermittent operation;  $b$  – increasing heating rate of motor bearing at lubrication rate violation

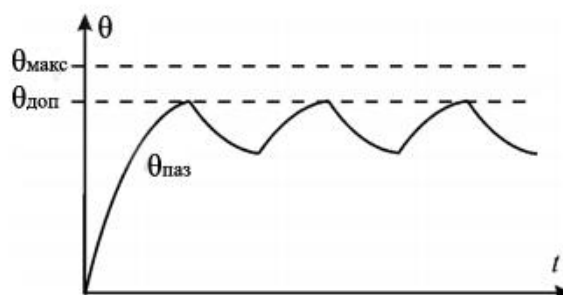


Рис. 3. Кривые  $\theta(t)$  при работе системы ПЧ-АД

Fig. 3. Heating curves  $\theta(t)$  for option with Frequency Converter - Induction Motor system operation

Подобные расчеты  $\theta(t)$  для двигателя могут быть выполнены на этапе проектирования или для изменившихся условий эксплуатации электромеханической системы. С другой стороны, диагностическая модель системы может вести расчет текущего теплового состояния двигателя и адекватно реагировать в случае  $\theta_{\text{паз тек}} > \theta_{\text{доп}}$ .

Необходимым условием при контроле теплового состояния является учет параметров механической части привода. Суммарный момент инерции системы  $J_{\Sigma}$  для большинства производственных механизмов может рассматриваться в качестве постоянной величины. В тех случаях, когда момент инерции  $J_{\Sigma}$  является функцией угла поворота и его производных, величина его переменной составляющей обычно не превышает 10...20 %  $J_0$ :

$$J_{\Sigma} = J_0 + J_K(\phi, \dot{\phi}). \quad (9)$$

В тепловой модели расчета потери энергии учитываются коэффициент трения  $\mu$ , значение которого меняется ступенчато при изменении режима смазывания, что и составляет основную неопределенность данного расчета. Так, при реализации жидкостного режима трения, соответствующего полному разделению движущихся поверхностей и исправному состоянию при длительном режиме

работы,  $\mu = 0,003$ . При граничном трении в момент запуска  $\mu = 0,01$ , а при сухом трении в момент возникновения повреждений значения становятся равными  $\mu = 0,1$  вначале локально, а затем по всей площади соприкосновения элементов трения.

Существенное влияние на работу электромеханической системы оказывает источник питания. В общем случае это преобразователь (статический или электромеханический со своими особенностями работы), т.е. в общем случае должна рассматриваться система «управляемый преобразователь – двигатель» (на постоянном или переменном токе).

Полученные температуры расчетных масс модели (рис. 4) [10] могут служить диагностическим признаком (критерием) для оценки режима работы двигателя и принятия конкретных мер по стабилизации его работы. Необходимо заметить, что данная методика довольно сложна и требует затрат времени на определение удельных теплоемкостей, коэффициентов теплопередачи, составление и набор модели, ее наладку, привлечение специалистов с высоким уровнем подготовки в области ЭМС и нагрева.

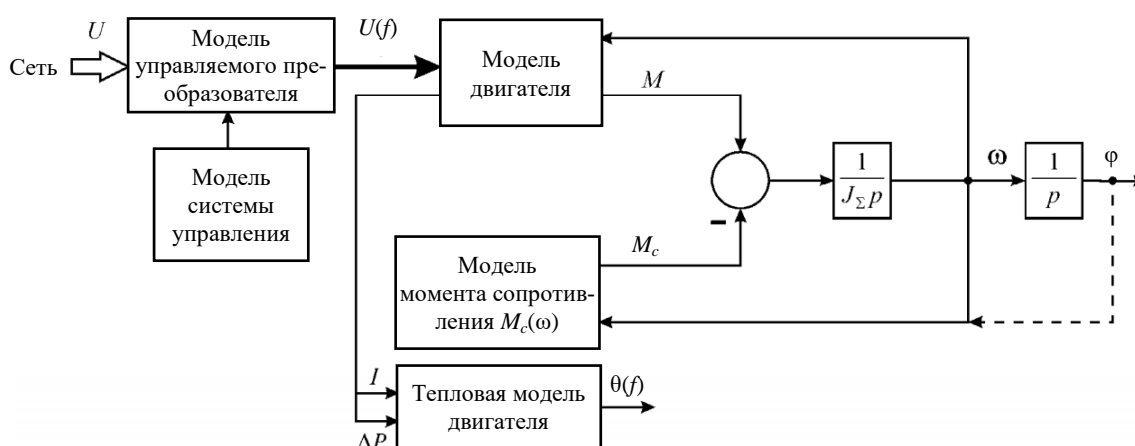


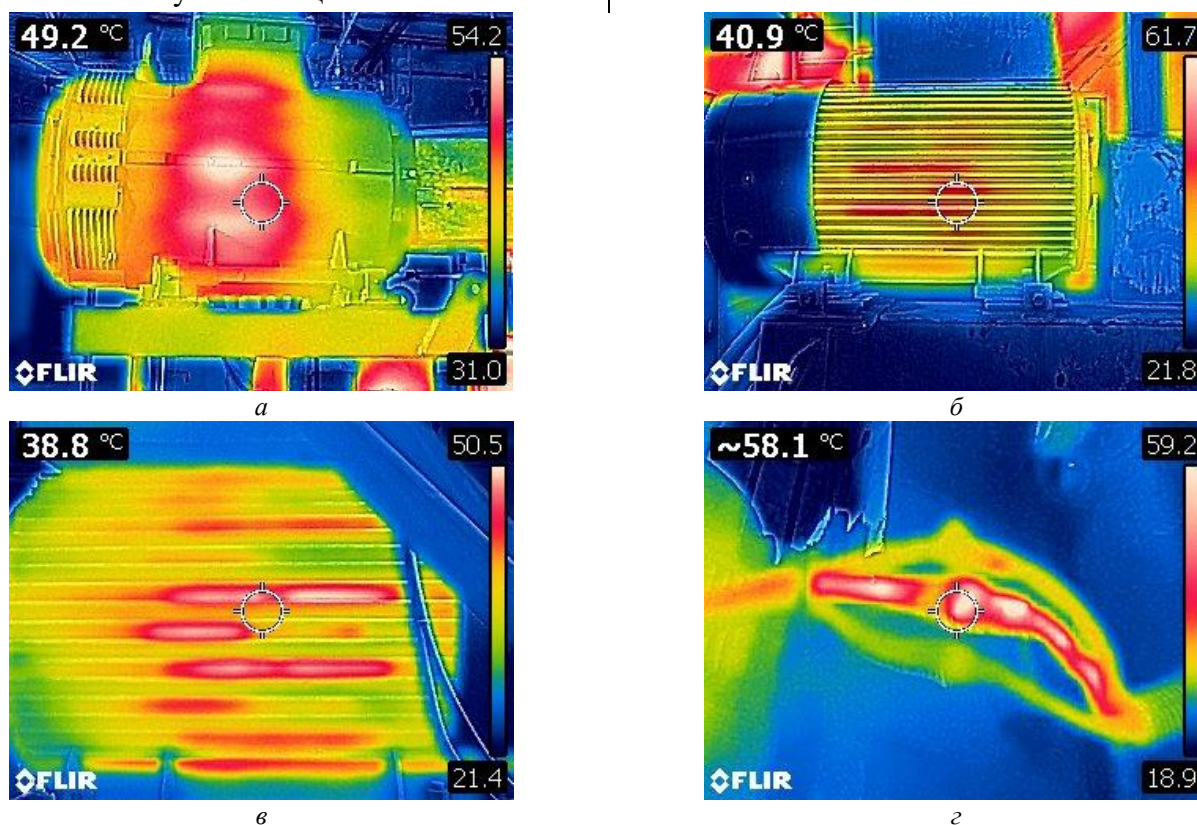
Рис. 4. Модель системы при упрощенном учете механической части ЭМС

Fig. 4. System model with simplified accounting of EMS mechanical part

**Практика контроля теплового состояния электромеханического оборудования.** Существенно упрощается задача контроля теплового состояния объектов, если перейти к использованию специальных «тепловых» приборов – пирометров и тепловизоров. Действие этих приборов основано на фотоэлектрической регистрации интенсивности теплового излучения нагретых тел, пропорциональной их температуре. Тепловизор позволяет всесторонне оценить тепловое состояние двигателя и на его основе сделать вывод о возможности продолжения работы или необходимости проведения ремонтной операции.

Термограммы, приведенные на рис. 5, позволяют судить о тепловом состоянии двигателей и возможности дальнейшего функционирования машин. Термограмма (рис. 5, а) позволяет получить общее заключение о

тепловом состоянии двигателя, выделить зоны расположения полюсов обмоток статора и сделать вывод об удовлетворительном состоянии по значению максимальной температуры – 54,2 °С. Термограмма, приведенная на рис. 5, б, позволяет установить факт наличия неравномерного охлаждения статора электродвигателя, выделить зоны локального перегрева (рис. 5, в), контроль развития тенденций которых позволит предупредить наступление предельного состояния. Информация на термограмме рис. 5, г была использована практически мгновенно – перегрев одной из фаз до 58,1 °С (более чем на 20 °С превышающий температуру расположенных рядом однотипных элементов) мог привести к внеплановой остановке двигателя, повторный контроль показал равенство температур по фазам.



**Рис. 5. Тепловое изображение электрической машины:**

а – двигатель компрессора; б – двигатель – охлаждение статора; в – местные перегревы статора; г – нагрев одной фазы питания двигателя – недопустимое состояние

**Fig. 5. Thermal image of electric machine:**

а – compressor motor; б – motor – stator cooling; в – local overheating of stator; г – heating of one phase of motor power – unacceptable condition





Рис. 6. Насос горячей воды – запорная арматура без теплоизоляции

Fig. 6. Hot water pump – shut-off valving without thermal insulation



Рис. 7. Повышенный нагрев фазы В высоковольтного ввода (6 кВ) до 39 °С

Fig. 7. Increased heating of high voltage input (6 kV) phase B up to 39 °C

Оценка теплового состояния электрооборудования в зависимости от конструкции и условий эксплуатации осуществляется:

- по нормированным температурам нагрева (превышениям температуры);
- равномерности поверхностного теплового поля объекта;
- динамике изменения температуры во времени или с изменением нагрузки;
- путем сравнения измеренных значений температуры исправных и неисправных узлов.

Следует отметить, что не существует методов оценки степени неисправности дефектов на перегреваемых поверхностях оборудования. Перегревы могут быть вызваны скрытыми дефектами или тепловым излучением сторонних объектов. На рис. 6 приведено тепловое изображение насоса горячей воды, позволяющее оценить степень передачи тепла от насоса к лобовому подшипнику двигателя. Рис. 7 демонстрирует перегрев одной

из фаз силовой подстанции 6 кВ, устраненный при проведении текущего ремонта без последствий в виде внезапной остановки оборудования.

Полное термографическое обследование проводится при подготовке к проведению капитального ремонта. Снимаются термограммы поверхностей в местах контактов деталей, по поверхности объекта, фундаменту механизма. При обработке термограмм сравниваются между собой нагревы элементов, однотипных узлов и деталей, динамика изменения нагревов во времени и в зависимости от нагрузки, определяются локальные нагревы, места их расположения, сопоставляются места нагрева с расположением элементов механической и электрической части привода, определяется эффективность работы систем охлаждения. Анализ тепловых изображений диагностируемого оборудования должен учитывать наличие дефектов поверхности объектов, загрязнений и смазки.



Наиболее важным параметром для оценки теплового состояния объекта является его излучательная способность (количество излучения, испускаемого объектом по сравнению с излучением от абсолютно черного тела). Обычно излучательная способность поверхности объекта находится в диапазоне приблизительно 0,10...0,95. У полированной (зеркальной) поверхности излучательная способность ниже 0,1, в то время как у окисленной или окрашенной поверхности – 0,85...0,95. Например, краска на масляной основе, независимо от цвета в видимом спектре, имеет излучательную способность более 0,9 в инфракрасном диапазоне [1, 2, 21, 22].

Такие внешние факторы, как температура и влажность окружающего воздуха, при проведении термографирования можно не учитывать, поскольку суммарная ошибка из-

мерения температуры в этом случае не превышает 0,2 °C.

На рис. 8, 9 приведены термограммы базового оборудования сортового прокатного стана «390» – это нагревательная печь (ее механизмы), комплекс механизмов прокатной клетки (валки, шпиндели, редукторы, соединительные муфты, подшипники). Общеизвестно, что внимание в первую очередь необходимо обратить на входные и выходные подшипники, а также на подшипники прокатных валков (на стане используются два вида валков – вертикальные и горизонтальные) как наиболее нагруженные элементы. В некоторых случаях необходимо обращать внимание на тепловые отражения нагретого до температуры 1 000 °C прокатываемого слитка. Задача различения нагрева от теплового излучения и внутреннего нагрева элементов становится в данном случае весьма актуальной.

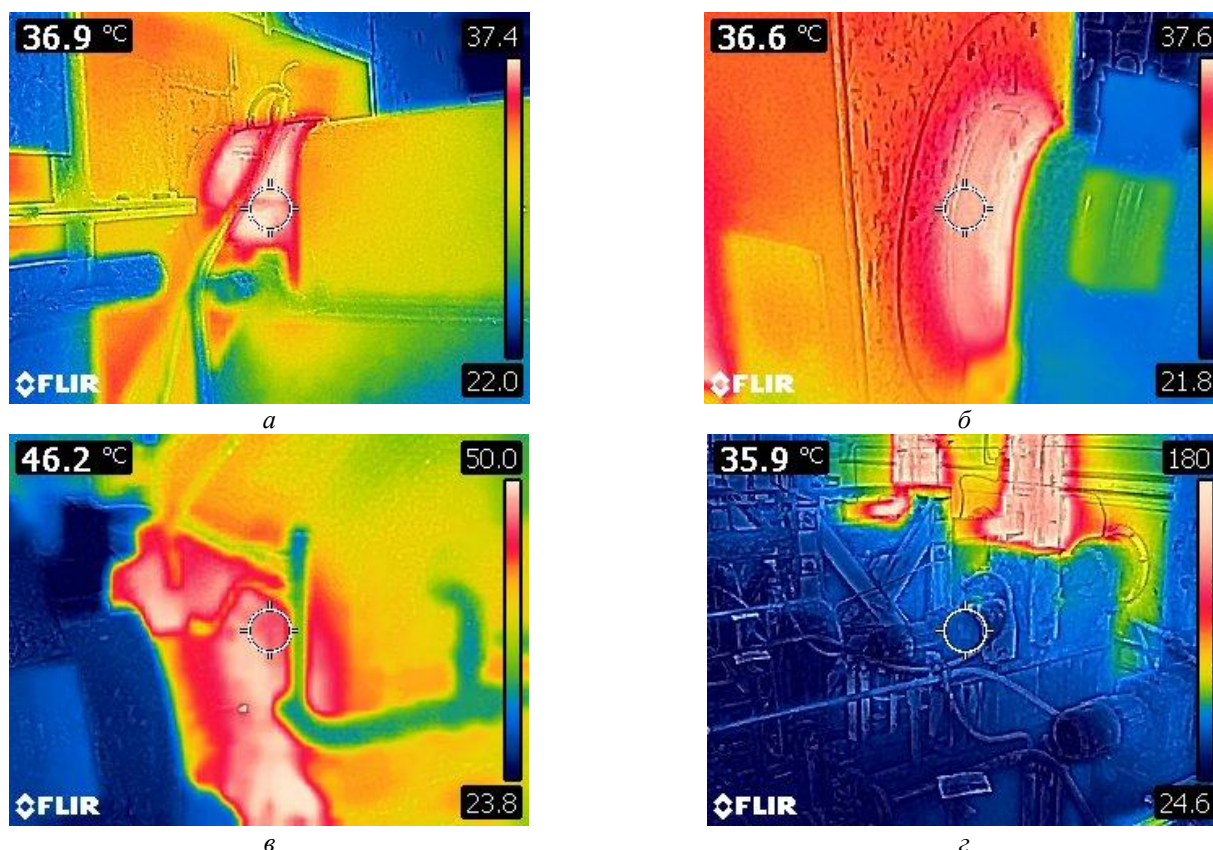


Рис. 8. Термограммы механических звеньев:

*a* – подшипниковая опора вентилятора, допустимый нагрев 37 °C; *б* – лобовой подшипник и соединительная муфта; *в* – редуктор и трубопроводы смазки; *г* – металлоконструкции печи

Fig. 8. Thermograms of mechanical components:

*a* – fan bearing assembly, permissible heating of 37 °C; *b* – frontal bearing and sleeve coupling; *c* – gearbox and lubrication pipes; *d* – furnace steel structures

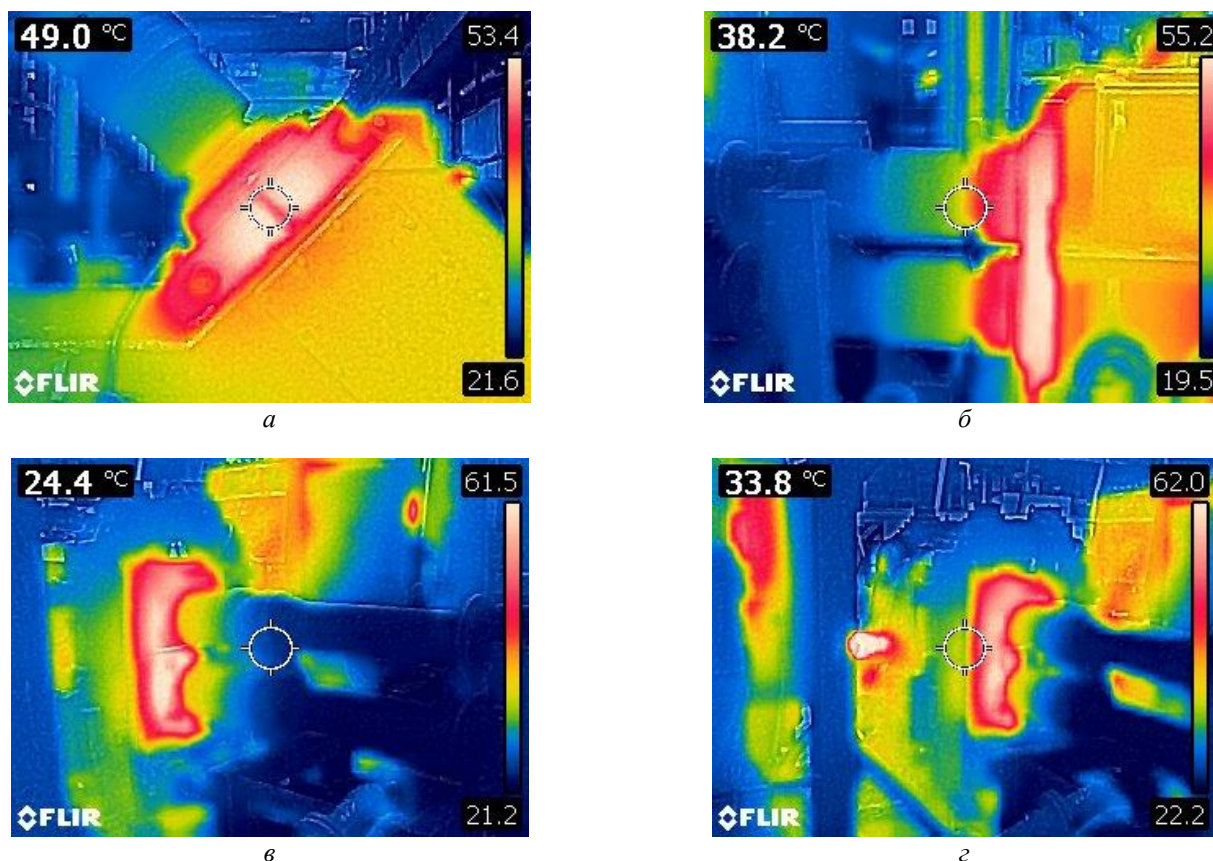


Рис. 9. Термограммы выходных валов редукторов привода прокатных валков:

*a* – подшипник выходного наклонного вала; *б* – подшипники выходного горизонтального вала, нагрев до 55 °С; *в*, *г* – подшипники прокатной клетки

Fig. 9. Thermograms of output shafts of mill roll gearheads:

*a* – bearing of the output inclined shaft; *b* – bearings of output lay shaft, heating up to 55 °С; *c*, *d* – rolling mill stand bearings

Значительный нагрев подшипниковых опор электродвигателей и редукторов может быть вызван несоответствием типа или уровня смазки, дисбалансом ротора, слишком плотной посадкой подшипника, вибрациями, неровностью поверхности опоры.

Среди диагностических параметров выделяются температура в локальных точках, интенсивность нарастания температуры при запуске, разность температур масла или жидкости на выходе и входе; наличие цветов каления и побежалости. Эффективным является сочетание субъективных и приборных методов.

Пирометры и тепловизоры представлены широким спектром моделей с разным техническим уровнем и с разными возможностями. При выборе подходящей модели прибора необходимо определиться, какие именно

задачи диагностики придется решать с его помощью. Выбор подходящей модели пирометра и/или тепловизора определяется следующими условиями: из каких материалов изготовлены диагностируемые объекты; возможный диапазон температур и размеры диагностируемых областей; расстояния, с которых будут проводиться измерения; температура окружающей среды; прозрачность пространства между прибором и объектом; требуемая точность измерений; скорость изменения положения или состояния диагностируемого объекта; необходимость интеграции прибора в компьютерную систему диагностики.

**Формирование профессиональных компетенций в области термометрирования промышленных объектов.** Для достоверного определения температуры поверхно-



стей элементов электромеханических систем необходимо хорошо понимать процесс формирования показаний температуры бесконтактными приборами термометрии и обязательно учитывать коэффициент теплового излучения материалов.

Подготовка специалиста базируется на знаниях основ тепловидения, обработки и интерпретации оперативных замеров температур тепловых полей диагностируемых объектов [23–26]. Типовая программа подготовки специалиста по термометрированию разработана с учетом существующих нормативных документов [21–34] и предлагает к изучению следующие вопросы:

- аксиомы работоспособности и диагностические параметры – факторы, определяющие работоспособное состояние и виды ремонтных воздействий;

- физические основы термометрии – требования к средствам измерения; основы инфракрасной термографии; активный и пассивный тепловой контроль; диагностические параметры при измерении температуры; дополнительное оснащение тепловизора; критерии выбора тепловизора для проведения различных работ в области теплового контроля; пирометры, тепловизоры – общее устройство;

- основные функциональные возможности тепловизоров – параметры тепловых изображений; выбор рабочей палитры тепловизора; температурный диапазон и поддиапазоны тепловизора; определение и настройка коэффициента излучения; настройка тепловизора перед началом работы; требования к уровням подготовки персонала; методика тепловизионного обследования; правила техники безопасности при работе с тепловизором; измерение тепловой картины объекта;

- методы оценки технического состояния – качественный и количественный анализ; основные регламентирующие документы; характерные неисправности и их обнаружение по термограммам; критерии дефектов тепловой группы; анализ результатов и составление протокола результатов измерений; компьютерные программы обработки термограмм.

Данная программа рассчитана на работу со слушателями в течение недели. После проведения практических занятий по измерению тепловых полей объектов следует экзамен, который подтверждает уровень закрепленных знаний и готовность к самостоятельной работе.

### Выводы

1. Появление широкого спектра приборов тепловизионного контроля значительно расширяет возможности контроля технического состояния ЭМС по параметрам температуры. Визуализация тепловых полей позволяет эффективно решать задачи диагностирования электрической и механической части с учетом специфических условий преобразования электрической энергии в механическую и тепловую.

2. Использование динамических тепловых расчетных схем замещения двигателей рекомендуется на этапе предварительного контроля состояния электромеханической системы при введении в расчет типовых и экстремальных возмущений.

3. Разработаны рекомендации и программа для использования тепловизионной техники техническим персоналом промышленного предприятия с учетом комплексного подхода к изучению физики теплового проявления неисправностей электрического и механического оборудования.

### Библиографический список

1. Baranski M., Polak A. Thermal diagnostic in electrical machines. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 87 NR 10/2011.
2. Dukovska L, Petkov V., Mihailov Em., Vasileva S. Image Processing for Technological Diagnosis of Metallurgical Facilities. Cybernetics and Information Technologies, Vol. 12, No 4, 2012, pp. 66–76.



3. Chou Y. and Yao L. Automatic Diagnostic System of Electrical Equipment Using Infrared Thermography, 2009 International Conference of Soft Computing and Pattern Recognition, Malacca, 2009, pp. 155–160.
4. Madding, Robert. Emissivity Measurement and Temperature Correction Accuracy Considerations, Infrared Training Center, 2002.
5. Neto E. T. W., Costa E. Da, Maia M. Influence of emissivity and distance in high voltage equipments thermal imaging, Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2006. TDC'06. IEEE/PES, 2006, vol. 0, pp. 1–4.
6. PAJANI, Dominique. 10 mars 2013 Thermographie Principes et mesure. Dans: «Mesure de température», [en ligne], Éditions T.I. [Paris, France], 2017, r2740, [Consulté le 06/09/2017], TIB542DUO, [base de données en ligne], disponible à l'adresse: <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mesures-analyses-th1/mesure-de-temperature-42542210/thermographie-r2740/>.
7. PAJANI, Dominique et AUDAIRE, Luc., 10 mars 2013, «Thermographie Technologies et applications». Dans: «Mesure de température», [en ligne], Éditions T.I. [Paris, France], 2017, r2741, [Consulté le 06/09/2017], TIB542DUO, [base de données en ligne], disponible à l'adresse : <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mesures-analyses-th1/mesure-de-temperature-42542210/thermographie-r2741/>.
8. Introduction aux plans d'expériences [Ressource électronique] / Jacques Goupy, Lee Creighton. 3e édition. Paris: Dunod : L'Usine nouvelle, 2006.
9. Introduction aux transferts thermiques : cours et exercices corrigés / Jean-Luc Battaglia, Andrzej Kusiak, Jean-Rodolphe Puiggali. Paris : Dunod, 2010.
10. Электромеханические системы автоматизации стационарных установок / Машиностроение и технология XXI века / Под общ. ред. В.Ф. Борисенко // Сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. в г. Севастополе 12–17 сентября 2005 г. Донецк: ДонНТУ, 2005. 281 с.
11. Чиликин М. Г., Сандлер А. С. Общий курс электропривода: учебник для вузов. М., 1981. 576 с.
12. Ключев В. И. Теория электропривода: Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 560 с.
13. Борисенко А. И., Костиков А. И., Яковлев А. И. Охлаждение промышленных электрических машин. М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
14. Беспалов В. Я., Мощинский Ю. А., Цуканов В. И. Упрощенная математическая модель нестационарного нагрева и охлаждения обмотки статора асинхронного двигателя // Электричество. 2003. № 4. С. 20–26.
15. Беспалов В.Я., Дунайкина Е.А., Мощинский Ю.А. Нестационарные тепловые расчеты в электрических машинах / Под ред. Б.К. Клокова. М.: МЭИ, 1987. 72 с.
16. W.L. Chan, A.T.P. So, L.L. Lai, Three-dimensional thermal imaging for power equipment monitoring, IEE Proceedings, Generation, Transmission, and Distribution, Vol. 147, Issue 6 November 2000, pp. 355–360.
17. Pragasen Pillay. Loss of life in induction machines operating with unbalanced supplies. IEEE transactions on energy conversion, Vol. 21, No. 4, December 2006.
18. Vija Mehta, Sanket Pandya, Nirav Meghpara. Thermal network model of electrical motor by lumped heat method [Тепловая сетевая модель электродвигателя методом сосредоточенного нагрева]. IJEDR, Vol. 4, Issue 2, 2016.
19. Bouheraoua M., Zaouia M., Khaldi R., Benamrouche N. Experimental Study of Heating in Induction Motors for Several Load Conditions. (2019).
20. Ejiofor, Oti & Nnadi, Damian & Nwosu, Cajethan. Fundamentals of thermal modelling of induction machines. Int.conf. of electric power enginiring (ICEPENG 2015), October 14–16, 2015.
21. РД 153-34.0-20.364–00. Методика инфракрасной диагностики тепломеханического оборудования.
22. ГОСТ 26629–85. Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций.
23. СНиП II-3–79. Строительные нормы и правила. Строительная теплотехника.
24. Ялышев Ф. Х. Оптические методы контроля зданий и сооружений. Контроль качества теплозащиты. Л.: Стройиздат. Ленингр. отд., 1988. 79 с.
25. МУ 34-70-184–87. Методические указания по испытанию тепловой изоляции оборудования и трубопроводов ТЭС. М.: Союзтехэнерго, 1988.
26. Эксплуатационный циркуляр Ц-01-94 (Т) от 06.05.1994 г. Организация контроля за состоянием и ремонт обмуровки и тепловой изоляции оборудования тепловых электростанций в целях снижения потерь тепла и температур поверхности до нормальных значений.
27. ОСТ 34 26.446–88. Обмуровка паровых и водогрейных стационарных котлов. Общие технические требования. М.: Информэнерго, 1989. 14 с.
28. Методика обследования дымовых труб тепловых электростанций визуальным способом и при помощи тепловизора (Отчет по договору 96-137-901-025, 1-й кв. 1996 г.). М.: ОРГРЭС, ПЛИТ, 1996.

29. Экспериментальные работы на действующей дымовой трубе по определению тепловых потерь при эксплуатационных режимах (Отчет по договору 96-162-900-025, 2-й кв. 1996 г.) М.: ОРГРЭС. ПЛИТ, 1996.

30. Методические указания по определению состояния тепловых сетей подземной прокладки по известной температуре поверхности грунта над теплотрассой. Разработано Firmой ОРГРЭС (Александров А. Н.) и Донской акционерной компанией (Иванов В.В., Бабенков В.И., Дунин И.Л.). М.: ОРГРЭС, 1991.

31. РД 34.20.501–95. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. 15-е изд. – М.: ОРГРЭС, 1996.

32. Афонин А. В., Поляков В. С. и др. Инфракрасная термография в энергетике, Т. 1. Основы инфракрасной термографии. СПб.: Изд. ПЭИПК, 2000.

33. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. М.: Мир, 1988.

34. Бажанов С. А. Инфракрасная диагностика электрооборудования распределительных устройств. Библиотечка электротехника, прил. к журналу «Энергетик». М., 2000.

## References

1. Baranski M., Polak A. Thermal diagnostic in electrical machines. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 87 NR 10/2011.

2. Dukovska L., Petkov V., Mihailov Em., Vasileva S. Image Processing for Technological Diagnosis of Metallurgical Facilities. Cybernetics and Information Technologies, Vol. 12, No 4, 2012, pp. 66–76.

3. Chou Y. and Yao L. Automatic Diagnostic System of Electrical Equipment Using Infrared Thermography, 2009 International Conference of Soft Computing and Pattern Recognition, Malacca, 2009, pp. 155–160.

4. Madding Robert. Emissivity Measurement and Temperature Correction Accuracy Considerations, Infrared Training Center, 2002.

5. Neto E. T. W., Costa E. Da, e Maia M., *Influence of emissivity and distance in high voltage equipments thermal imaging*, Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2006. TDC'06.IEEE/PES, 2006, vol. 0, pag. 1–4.

6. PAJANI, Dominique. 10 mars 2013, «Thermographie Principes et mesure». Dans: «Mesure de température», [en ligne], Éditions T. I. [Paris, France], 2017, r2740, [Consulté le 06/09/2017], TIB542DUO, [base de données en ligne], disponible à l'adresse: <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mesures-analyses-th1/mesure-de-temperature-42542210/thermographie-r2740/>.

7. PAJANI, Dominique et AUDAIRE, Luc., 10 mars 2013, Thermographie Technologies et applications. Dans: «Mesure de température», [en ligne], Éditions T.I. [Paris, France], 2017, r2741, [Consulté le 06/09/2017], TIB542DUO, [base de données en ligne], disponible à l'adresse: <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mesures-analyses-th1/mesure-de-temperature-42542210/thermographie-r2741/>.

8. Introduction aux plans d'expériences [Ressource électronique] / Jacques Goupy, Lee Creighton. - 3e édition. Paris, Dunod: L'Usine nouvelle, 2006.

9. Introduction aux transferts thermiques : cours et exercices corrigés / Jean-Luc Battaglia, Andrzej Kusiak, Jean-Rodolphe Puiggali. Paris: Dunod, 2010.

10. Electromechanical automation systems for stationary installations / Engineering and technosphere of the XXI century / under general editorship of V.F. Borisenko // Proceedings of international scientific and technical conference, Sevastopol, September 12-17, 2005; Donetsk: DonNTU Publ., 2005, 281 p. (in Russ.).

11. Chilikin M.G., Sandler A.S. Electric drive course of studies: textbook for universities and colleges (*Obshchiy kurs elektropriroda: uchebnik dlya vuzov*). Moscow, 1981, 576 p. (in Russ.).

12. Klyuchev V.I. Theory of electric drive: Textbook for universities and colleges (*Teoriya elektropriroda: Uchebnik dlya vuzov*). Moscow: Energoatomizdat Publ., 1985, 560 p. (in Russ.).

13. Borisenko A.I., Kostikov A.I., Yakovlev A.I. Cooling of industrial electric machines (*Okhlazhdenie promyshlennykh elektricheskikh mashin*). Moscow: Energoatomizdat Publ., 1983, 296 p. (in Russ.).

14. Bespalov V.Ya., Moshchinsky Yu.A., Tsukanov V.I. Simplified mathematical model of nonstationary heating and cooling of induction motor stator winding// Electricity (*Elektrichestvo*), 2003, No. 4, pp. 20–26 (in Russ.).

15. Bespalov V.Ya., Dunaikina EA, Moshchinsky Yu.A. Nonstationary Thermal Design Calculations for Electric Machines (*Nestatsionarnye teplovye raschety v elektricheskikh mashinakh*)// Edited by B. K. Klovov. Moscow: MEI, 1987, 72 p. (in Russ.).

16. Chan W. L., So A. T. P., Lai L. L. Three-dimensional thermal imaging for power equipment monitoring, IEE Proceedings, Generation, Transmission, and Distribution, Vol. 147, Iss. 6, November 2000, pp. 355–360.

17. Pragasen Pillay. Loss of life in induction machines operating with unbalanced supplies. IEEE transactions on energy conversion, Vol. 21, No. 4, December 2006.
18. Mehta Vija, Pandya Sanket, Meghpara Nirav. Thermal network model of electrical motor by lumped heat method. IJEDR, Vol. 4, Issue 2, 2016.
19. Bouheraoua M., Zaouia M., Khaldi R., Benamrouche N. Experimental Study of Heating in Induction Motors for Several Load Conditions. (2019).
20. Ejiofor, Oti&Nnadi, Damian &Nwosu, Cajethan. (2015). FUNDAMENTALS OF THERMAL MODELING OF INDUCTION MACHINES. International conference of electric power engineering (ICEPENG 2015), October 14–16, 2015.
21. RD (Standard Operation Procedure) 153-34.0-20.364–00. Technique of infrared diagnostics of thermomechanical equipment (in Russ.).
22. State Standard GOST 26629–85. Buildings and structures. Method of thermal imaging quality control for thermal insulation of building envelopes (in Russ.).
23. SNiP II-3–79. Constructions Codes and Regulations. Construction heat engineering (in Russ.).
24. Yalyshev F. Kh. Optical methods for monitoring buildings and structures. Thermal protection system quality control (*Opticheskie metody kontrolya zdaniy i sooruzheniy. Kontrol' kachestva teplozashchity*). Leningrad: Stroyizdat Publ., Leningrad Branch, 1988, 79 p. (in Russ.).
25. MU 34-70-184–87. Procedural guidelines for testing thermal insulation of equipment and pipelines of thermal power plants. Moscow: Soyuztekhenenergo Publ., 1988 (in Russ.).
26. Operational circular order Ts-01-94 (T) dated 05.06.1994. Organization of control over the condition and repair of lining and thermal insulation of equipment of thermal power plants for reducing heat losses and decreasing surface temperatures to normal level (in Russ.).
27. Sectoral Standard OST 34 26.446–88. Lining of steam and hot-water stationary boilers. General technical requirements. Moscow: Informenergo Publ., 1989, 14 p. (in Russ.).
28. Method of visual inspection of thermal power plant chimneys using thermal imager (Report under Contract 96-137-901-025, 1st quarter of 1996). Moscow: ORGRES, PLIT, 1996 (in Russ.).
29. Experimental work on the operating chimney to determine heat losses under operational conditions (Report under Contract 96-162-900-025, 2nd quarter of 1996). Moscow: ORGRES, PLIT, 1996 (in Russ.).
30. Guidelines for determining the state of underground heating networks using known temperature of the soil surface above the heating pipes. Developed by the ORGRES Firm (Alexandrov A. N.) and the Donskaya Joint-Stock Company (Ivanov V. V., Babenkov V. I., Dunin I. L.), Moscow: ORGRES, 1991 (in Russ.).
31. RD (Standard Operation Procedure) 34.20.501–95. Rules for maintenance of power plants and networks of the Russian Federation, 15th ed. M.: ORGRES, 1996 (in Russ.).
32. Afonin A. V., Polyakov V. S. et al. Infrared thermography in energy engineering, v. 1. Fundamentals of infrared thermography (*Infrakrasnaya termografiya v energetike. Osnovy infrakrasnoy termografii*). SPb.: PEIPK Publ., 2000 (in Russ.).
33. Gossorg Zh. Infrared Thermography (*Infrakrasnaya termografiya*). Moscow: Mir Publ., 1988 (in Russ.).
34. Bazhanov S. A. Infrared diagnostics of electrical equipment of electricity distribution plants. Library of Electrical Engineer, Appendix to Power Engineer journal (*Energetik*). Moscow, 2000 (in Russ.).