



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - СОФИЯ

Електротехнически факултет

Катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт”

маг. инж. Явор Йорданов Лозанов

**ТЕХНИЧЕСКА ДИАГНОСТИКА НА
ЕЛЕКТРООБЗАВЕЖДАНЕТО В ПРОМИШЛЕНОСТТА**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
„ДОКТОР”

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.2. Електротехника, електроника и автоматика

Научна специалност: Електроснабдяване и електрообзавеждане на
промишлеността

Научен ръководител:

доц. д-р инж. Светлана Георгиева Цветкова

СОФИЯ, 2022

Дисертационният труд е обсъден и насрочен за защита от Разширен катедрен съвет на катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт” към Електротехнически факултет на Технически университет – София, проведен на 09.05.2022 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 20.09.2022 г. от 13.00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научно жури, определено със Заповед №ОЖ-5.2-43 от 20.05.2022 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. Проф. д-тн инж. Иван Ячев – председател
2. Доц. д-р инж. Вълчан Георгиев – научен секретар
3. Проф. д-р инж. Георги Павлов
4. Проф. д-р инж. Васил Димитров
5. Доц. д-р инж. Ивайло Стоянов

Рецензенти:

1. Проф. д-р инж. Георги Павлов
2. Доц. д-р инж. Вълчан Георгиев

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Електротехнически факултет при Технически университет – София, блок 12, кабинет 12222.

Дисертантът е редовен докторант към катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт” на Електротехнически факултет. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Явор Лозанов

Заглавие: Техническа диагностика на електрообзавеждането в промишлеността

Тираж: 30 бр.

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

В промишлените предприятия се използват различни машини и съоръжения със сложно електрообзавеждане, които са предназначени за решаване на разнообразни производствени задачи и се експлоатират в различни условия, при различни режими на натоварване, от персонал с различна квалификация. В процеса на експлоатация на електрическите системи експлоатационните им параметри се влошават, стареят или отказват отделни елементи и възли. В резултат на това се понижава качеството на функционирането им.

Опитът от експлоатацията на сложни технически системи показва, че в процеса на възстановяване на изправността на системата много продължителен е етапът на откриване на отказалия елемент (средно 70% от общото време за възстановяване). Ето защо с увеличаване на сложността на обектите трябва да се отделя по-голямо внимание на въпроса за по-бързото откриване на отказалите елементи.

Тенденциите в развитието на системите за техническа диагностика са насочени, както в областта на търсене на отказалите елементи, така и в контрола и прогнозирането на техническото състояние на съоръженията. За тази цел съвременните системи за диагностика използват, не само параметрите (електрически, механични и технологични) характеризиращи работоспособността на техническите системи, но и показателите на явленията съпътстващи работата на съоръженията (вибрации, прегрявания, шум и др.). Това направление на техническата диагностика търпи изключително бурно развитие в последните 20 – 30 години. Една от съвременните техники, чрез която се реализира този подход е термовизионното изследване. Тя се използва като средство за неразрушителен контрол и прогнозиране на техническото състояние на съоръженията. Именно поради тази причина, основната цел на дисертацията е насочена към усъвършенстване на системите за техническа диагностика чрез внедряване на съвременни методи за диагностика и разработване на математически модели, които реално да оценяват информацията получавана от провежданите изпитвания и степента на нейната достоверност.

Цел и основни задачи на дисертационния труд

Основната цел на дисертационния труд е насочена към създаване на елементи от система за наблюдение и контрол на техническото състояние на електрообзавеждането въз основа на термовизионна техника, с цел подобряване на неговата експлоатация. За целта е необходимо да се решат следните основни задачи:

1. Анализ на възможностите на техническите средства за извършване на термовизионна диагностика. Класификация и количествена оценка на факторите повлияващи измерването на температурата с цел повишаване на достоверността на термовизионната диагностика.
2. Разработване на инженерни методики, алгоритми и програми за обработка на термографски изображения с оглед подобряване на визуалния им

анализ, при ръчна обработка на резултатите от термовизионни изпитвания на електрическите съоръжения.

3. Разработване на методики, алгоритми и програми за автоматизиране на процесите на обработка и анализ на термографски изображения на електрообзавеждането.
4. Разработване на диагностични топлинни модели на елементи на електрообзавеждането при различни работни режими.
5. Анализ и моделиране на експлоатационната надеждност на електрообзавеждането.
6. Оценка на взаимовръзката между експлоатационната надеждност и диагностичните процеси и оптимизация на периодичността на провеждане на термовизионните изпитвания.

Методи на изследване

Основните методи на работа, използвани при решаването на поставените задачи в дисертацията са: теоретичен анализ, математическо моделиране, оптимизация, експериментални изследвания, математическа статистика за обработка на резултати.

Практическа приложимост

Разработените компютърни програми за обработка на термографски изображения и определяне на оптималните моменти от време за извършване на диагностични процеси намират приложение в практиката при експлоатацията и термовизионната диагностика на помпени агрегати от две дружества работещи в тази област. Разработените методики за провеждане на термовизионни изследвания на електрообзавеждането намират приложение в предприятия от минната промишленост. Компютърните програми се използват и в учебния процес при разработването на дипломни работи, свързани с обработката и визуалния анализ на термографски изображения на електрообзавеждането.

Апробация

Резултатите от дисертационния труд са докладвани на международни конференции: BulEF, SIELA и ELMA.

Публикации

Основните постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 10 броя статии, от които 1 самостоятелна.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 167 страници, като включва увод, четири глави за решаване на формулираните основни задачи, приноси на дисертационния труд, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 164 литературни източници, като 137 са на латиница и 22 на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо 78 фигури и 23 таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. ПРОУЧВАНЕ И АНАЛИЗ НА ДОСТИЖЕНИЯТА В ОБЛАСТТА НА ТЕХНИЧЕСКАТА ДИАГНОСТИКА

Направеният литературен анализ се основава на достатъчен брой научни трудове в областта и дава възможност за оценка на развитието на методите и средствата за извършване на техническа диагностика, очертаване на проблемите и формулиране на задачите на дисертационния труд. Развитието на съвременните системи за техническа диагностика следва да включва наличните методики за мониторинг на техническото състояние на разглежданите обекти и съоръжения. В съответствие с потенциала и възможностите на термовизионната диагностика е актуално нейното развитие и активно използване за техническа диагностика на различни елементи на електрическото оборудване.

ГЛАВА 2. ТЕРМОВИЗИОННА ДИАГНОСТИКА НА ЕЛЕКТРООБЗАВЕЖДАНЕТО И ПРЕДПОСТАВКИ ЗА ПОВИШАВАНЕ НА ДОСТОВЕРНОСТТА Й

2.1. Възможности за прилагане на термовизионният метод при диагностика на електрообзавеждането

Промяната на температурата при работа е един от най-често срещаните показатели за техническото състояние на електрообзавеждането и неговите компоненти. Термовизията е все по-широко използвана в областта на диагностиката и мониторинга на техническото състояние на:

- Разпределителни уредби, комутационната апаратура и електропроводни линии
- Силови трансформатори
- Фотоволтаични модули
- Акумулаторни батерии
- Електронни преобразуватели
- Електрически двигатели за постоянен или променлив ток

Направен е анализ на направленията за развитие на термовизионната диагностика на разглежданите електрически съоръжения.

2.2. Характеристики на термовизионното оборудване използвано за техническа диагностика на електрообзавеждането

Параметрите използвани за оценка на работата на термовизионните камери са добре изследвани и стандартизирани. Тези параметри могат да бъдат разделени на две групи – измервателни параметри и оптично-визуални параметри.

Към групата на измервателните параметри спадат:

- Точност на отчетената температура
- Температурна разделителна способност (*Noise equivalent temperature difference NETD*)
- Честота на опресняване на образа
- Работна температура на инфрачервения сензор
- Спектрален диапазон на работа

Групата на оптично-визуалните параметри включва:

- Зрително поле (*Field of View - FOV*)
- Моментно зрително поле (*Instantaneous Field of View - IFOV*).

2.3. Фактори оказващи влияние при термовизионната диагностика на електрообзавеждането

При провеждане на изследвания на електрическо оборудване по термовизионния способ от съществено значение е да се идентифицират и премахнат систематичните и случайни грешки, които влияят върху резултатите от измерванията.

Факторите оказващи влияние върху резултатите от измерванията могат да се класифицират в четири групи.

2.3.1. Параметри на измерване

Това са параметрите характеризиращи изследвания обект, обекти в околното пространство и средата на разпространение на инфрачервеното лъчение. Към тази група се причисляват следните параметри:

- Излъчвателна способност ε
- Отражена температура T_{refl}
- Температура на околната среда T_{atm}
- Относителна влажност на въздуха $\omega\%$
- Разстояние между изследвания обект и термовизионната камера d

Именно на основата на тези параметри се формират математическите модели за радиационната термометрия, независимо от тяхната сложност и многокомпонентност. Поради това правилната оценка на тези параметри е решаваща за точността на преобразуване на изходния сигнал на инфрачервените сензори в стойности на температурата в отделните точки на обекта.

2.3.2. Експлоатационни фактори

Тази група фактори характеризират режимите на работа на изследваните машини и съоръжения и техните конструктивни или експлоатационни особености.

Основните експлоатационни фактори са:

- Токово натоварване
- Топлинна времеконстанта на изследвания обект

Доста често стойността на токовото натоварване I_1 при провеждане на термовизионното изследване се различава от номиналната I_n . В такива случаи следва получените стойности на температурата T_1 да се преизчислят за номиналната стойност на тока, като за целта се прилага следната зависимост:

$$T_n = T_1 \left(\frac{I_1}{I_n} \right)^2. \quad (2.7)$$

2.3.3. Оперативни фактори

Оперативните фактори се обуславят от характеристиките на избраната термовизионна камера, използваната програма за провеждане на изследването и степента на квалификация на провеждащия измерването.

2.3.4. Случайни фактори

Случайните фактори са породени от непредвидими изменения в параметрите на обкръжаващата среда, зависещи най-вече от типа на разглежданите уредби и съоръжения. Към тази група фактори се причисляват:

- Влияние на слънчевата радиация
- Влияние на скоростта на движение на въздуха.

2.3.5. Влияние на параметрите на измерване върху достоверността на резултатите

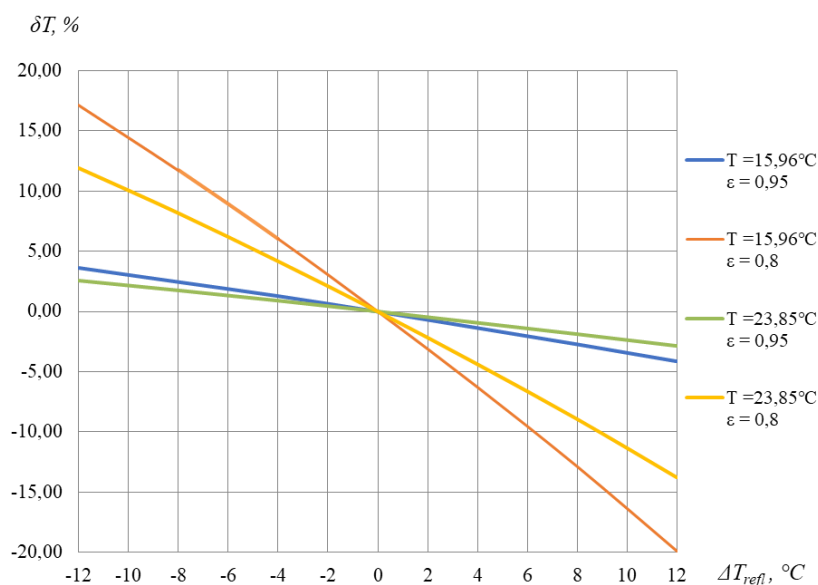
С оглед получаване на количествена оценка на влиянието на отделните параметри на измерване, и в частност зададената им стойност, върху точността на измерване на температурата е проведено изследване на електрообзавеждането на помпена станция.

Направена е обработка на термографските изображения чрез програмния продукт FLIR Tools+, който осигурява възможност за изменение на зададените стойности на параметрите на измерване. Обобщени са резултатите и са формирани характеристики, описващи изменението на относителните грешки в температурните отчети, при отклонение на зададените стойности на отделните параметри на измерване от действителните.

Изследвана е зависимостта на получените характеристики от температурата на наблюдавания обект.

- Оценка на влиянието на зададената стойност на отразената температура

На фиг. 2.15. е показано изменението на относителната грешка на температурните отчети δT под влиянието на зададената стойност на отразената температура при различни стойности на температурата на изследвания обект и излъчвателната способност.



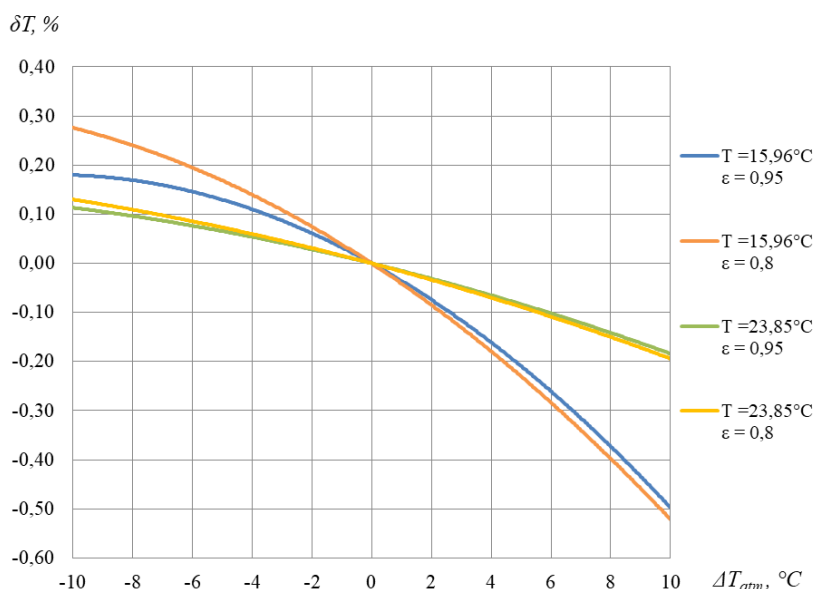
Фиг. 2.15. Влияние на температурата на изследвания обект върху грешката, предизвиквана от зададената стойност на отразената температура.

Анализът на получените характеристики показва, че:

- Отразената температура оказва значително въздействие върху точността на измерванията – относителната грешка достига **20%**.
- Грешката в отчетената температура, получавана вследствие зададената стойност на отразената температура, е силно зависима от излъчвателната способност на обекта.

- Промяната на температурата не води до изменение на типа и формата на получените характеристики. Увеличаването на температурата на обекта води до намаляване на относителната грешка в измерванията.
- Оценка на влиянието на зададената стойност на температурата на околната среда

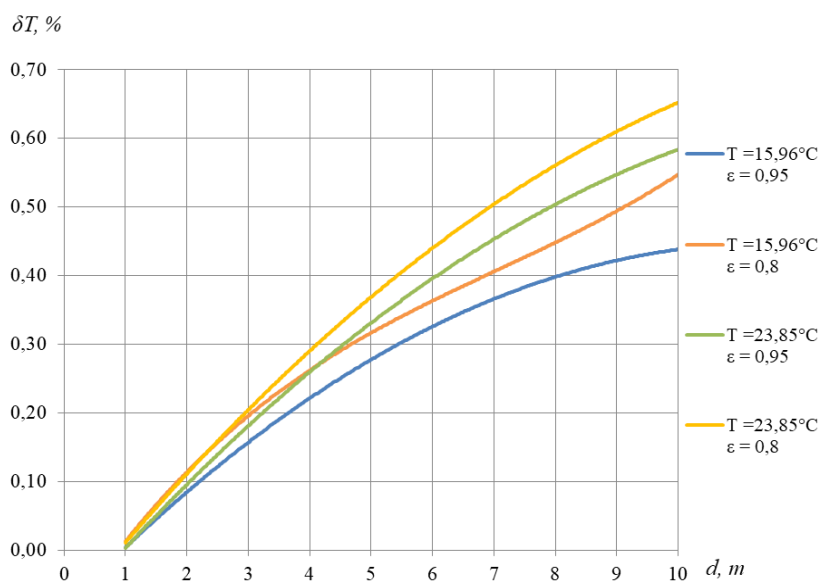
Изменението на относителната грешка на температурните отчети, под влиянието на зададената стойност на температурата на околната среда, при различни стойности на температурата на изследвания обект и излъчвателната способност е показано на фиг. 2.16.



Фиг. 2.16. Влияние на температурата на изследвания обект върху грешката, предизвиквана от зададената стойност на температурата на околната среда.

- Оценка на влиянието на зададената стойност на разстоянието до наблюдавания обект

Характеристиките отразяващи влиянието на зададената стойност на разстоянието до наблюдавания обект са представени на фиг. 2.17.



Фиг. 2.17. Влияние на температурата на изследвания обект върху грешката, предизвиквана от зададената стойност на разстоянието до изследвания обект.

- Оценка на влиянието на зададената стойност на относителната влажност на въздуха

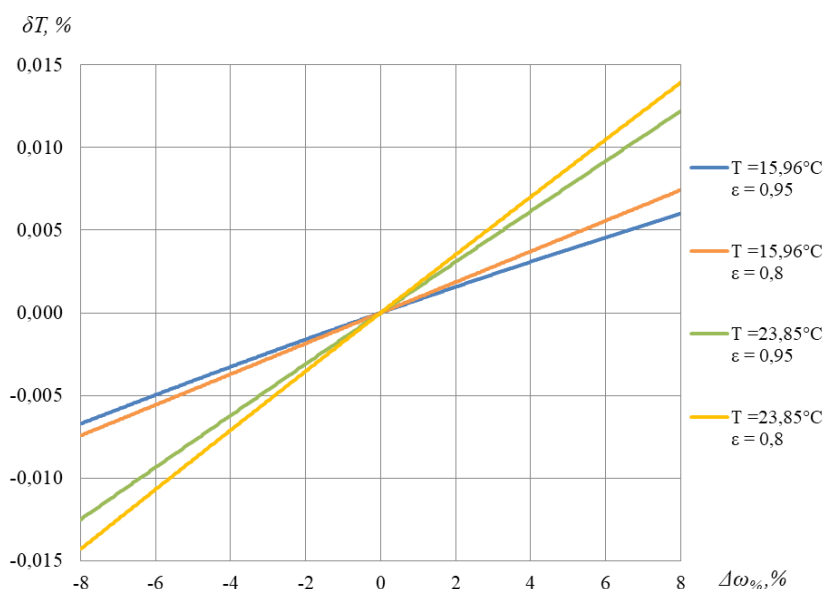
На фиг. 2.18. е показано изменението на относителната грешка на температурните отчети, под влиянието на зададената стойност на относителната влажност на въздуха.

От получените характеристики е видно, че:

- Температурата на околната среда не влияе съществено върху точността на измерванията – относителната грешка е 0,5%.
- Характеристиките на грешката в отчетената температура са слабо зависими от излъчвателната способност на обекта.
- Увеличаването на температурата на обекта предизвиква намаляване на относителната грешка в измерванията.

От характеристиките става ясно, че:

- Разстоянието до изследвания обект оказва значително влияние върху точността на измерванията – относителната грешка е над 0,65%.
- Зависимостите на грешката в отчетената температура са силно зависими от излъчвателната способност на обекта.
- Увеличаването на температурата на обекта предизвиква значимо нарастване на относителната грешка в измерванията.



Фиг. 2.18. Влияние на температурата на изследвания обект върху грешката, предизвиквана от зададената стойност на разстоянието до изследвания обект.

Анализът на получените характеристики показва, че:

- Относителната влажност на въздуха оказва незначително влияние върху точността на измерванията — относителната грешка е 0,014%.
- Грешката в отчетената температура, получавана вследствие зададената стойност на влажността на въздуха, е силно зависима от излъчвателната способност на обекта.
- Увеличаването на температурата на обекта предизвиква увеличаване на относителната грешка в измерванията.

2.4. Параметри и критерии за оценка на техническото състояние на електрообзавеждането при термовизионна диагностика

Трябва да се отбележи, че въпреки добре развитите регламенти, параметрите за оценка на техническото състояние се формират предимно на базата на експертни оценки от качествен характер.

Настоящият етап от развитието на термовизионния метод за диагностика на електрообзавеждането се характеризира с ниска степен на приложение на компютърното моделиране при решаване на диагностичните задачи, липса на диагностични модели на елементите на електрообзавеждането, които да се използват като основа за автоматизираното изчисление на агрегирани функции на състоянието на обектите, вземащи предвид връзката им с диагностичните параметри и различните смущаващи фактори.

Като количествен параметър на техническото състояние, заедно с използвания диагностичен параметър - температура на повърхността T , може да се използва и плътността на топлинния поток q (агрегирана функция на техническото състояние) - като непряк диагностичен параметър.

2.5. Особенности в представянето на резултатите от термовизионните измервания и техния анализ

Термографските изображения, чрез които се представят резултатите от термовизионните измервания, се отличават значително от цифровите изображения, тъй като освен матриците на цветовете координати съдържат и допълнителна информация касаеща пространствените разпределения на измерените температури, както и метаданни за термовизионната система.

Термографските изображения се характеризират с нисък (температурен) контраст, в рамките на наблюдавания обект, което затруднява визуалния анализ и интерпретацията на изображенията. За решаването на този проблем се налага допълнителна обработка на получаваните изображения.

2.5.1. Алгоритъм за обработка на термографски изображения

Съвременните начини за обработка на термографските изображения могат да се разделят в три основни операции: предварителна обработка, сегментация, извличане и редуциране на характерните особености на обектите.

Тези процедури за обработка на термографските изображения се реализират чрез честотна филтрация. Цифровата реализация на честотните филтри се основава на конволюцията на сигнала на входното изображение $f(x,y)$ и филтърната функция $A(m,n)$

$$\hat{f}(x,y) = tr \left\{ \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f(x-1,y-1) & f(x-1,y) & f(x-1,y+1) \\ f(x,y-1) & f(x,y) & f(x,y+1) \\ f(x+1,y-1) & f(x+1,y) & f(x+1,y+1) \end{bmatrix} \right\}. \quad (2.10)$$

За намаляване на шума в термографските изображения се използват нискочестотни филтри. Филтрите трябва да потискат високочестотните шумове, като в същото време запазват характерните черти и геометричните контури на обектите.

Нискочестотната филтрация се изпълнява чрез филтърни оператори за „осредняване“ на сигнала, базирани на различни статистически показатели и характеристики.

Гаусовият осредняващ оператор е двуизмерен конволюционен оператор, който се използва за "изглаждане" на изображенията и премахване на шума. Той използва филтърно ядро, което представлява формата на нормалното разпределение:

$$A_{Gauss}(m,n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} e^{-\frac{[(m-m_0)^2 + (n-n_0)^2]}{2\sigma^2}}. \quad (2.11)$$

Гаусовият осредняващ оператор с размерност 3×3 се описва със следната матрица

$$A_{Gauss} = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.12)$$

След филтрирането на шумовете, може да започне процедурата по извличане на характерните особености на заснетите обекти. В следствие на големите стойности на сигнала, характерните особености намиращи се в рамките на обекта остават скрити, поради по-малкия контраст в тези зони на изображението. За да се подчертаят характерните особености, с размери от порядъка на един пиксел, е необходимо да се приложи високо честотна филтрация.

Методите за високо честотна филтрация могат да се разделят в две основни групи: градиентни и Лапласови. При Лапласовите методи се търсят местата, в които втората производна на сигнала (2.13) е равна на нула

$$\nabla^2 f(x,y) = \frac{\partial^2 f(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x,y)}{\partial y^2}. \quad (2.13)$$

Филтрите реализирани по Лапласовия метод са изотопични. При тях се определя числената стойност на втората производна на сигнала, като за целта се използват следните операторни матрици:

$$L_1 = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}, L_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \text{ и } L_3 = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ -2 & 12 & -2 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}. \quad (2.16)$$

Извличането на характерните особености на обектите, с помощта на Лапласовите филтри, се базира на следното уравнение:

$$\hat{f}(x, y) = f(x, y) + c[\nabla^2 f(x, y)]. \quad (2.17)$$

2.5.2. Програма за обработка на термографски изображения

На основата на представената методика е разработена компютърна програма за обработка на термографски изображения с цел подобряване на визуалния анализ, като е използван функционалния пакет *Image Processing Toolbox* на софтуерния продукт MATLAB.

С помощта на разработената компютърна програма е извършена обработката на термографските изображения на разгледания в т. 2.3.5. асинхронен двигател (АД) с накъсосъединен ротор.

На фиг. 2.22 и фиг. 2.23 са представени термографските изображения получени след извършване на нискочестотна филтрация. Използвани са нискочестотен филтър реализиран чрез Гаусова филтърна функция с размерност 5×5 и стойност на средноквадратичното отклонение $\sigma=1$, и нискочестотен филтър на средната стойност реализиран с конволюционно ядро с размерност 3×3 .



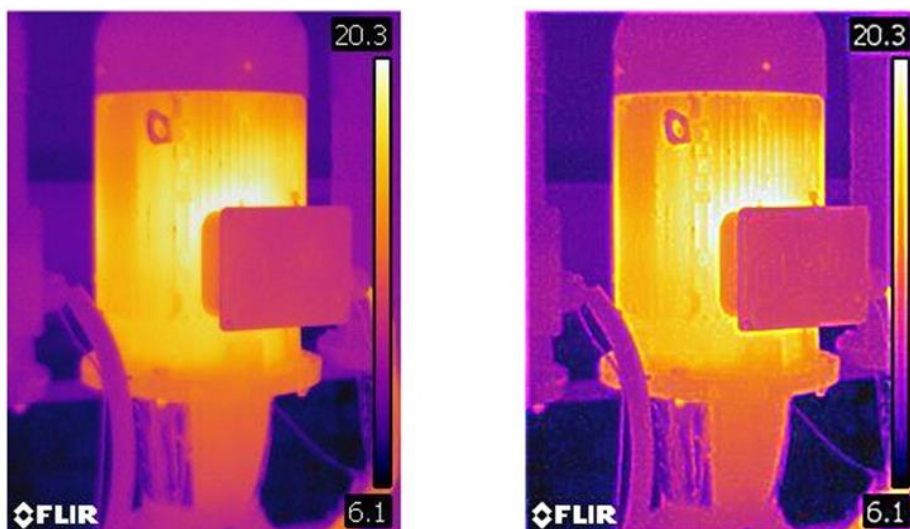
Фиг. 2.22. Термографско изображение след прилагане на Гаусовия нискочестотен филтър



Фиг. 2.23. Термографско изображение след прилагане на нискочестотен филтър на средната стойност

Последната стъпка от алгоритъма за обработка е прилагането на зависимост (2.17). Тя се изпълнява чрез наслагване (събиране или изваждане) на първоначалното изображение и изображението получено след високочестотната филтрация, в зависимост от знака на централния коефициент в операторната матрица на високочестотния филтър.

На фиг. 2.29 са показани началното термографско изображение (отляво) и изображенията получени при изпълнение на алгоритъма за обработка (отдясно), при прилагане на Лапласов филтър L_3 .



Фиг. 2.29. Начално термографско изображение и резултантно изображение при използване на Лапласов L_3 филтър

Резултатите от обработката на изображенията с разработената програма показват, че прилагането на високочестотни филтри, отчитащи производните на сигнала във всички направления, както и филтърни матрици с различаващи се теглови коефициенти за отделните направления, водят до значително увеличение на температурния контраст, детайлността и остротата на термографските изображения, което спомага за извършването на визуалният им анализ.

2.6. Изводи към ВТОРА ГЛАВА

1. Направена е класификация на факторите оказващи въздействие върху резултатите от термовизионните измервания. Въз основа на направената класификация са определени факторите, които оказват най-значително въздействие върху точността на термовизионните измервания.

2. Проведено е експериментално термовизионно изследване на електрообзавеждането на помпена станция, като са определени зависимостите на грешката в температурните измервания от стойностите на отделните параметри на измерване, зададени в настройките на термовизионната камера. Резултатите от експерименталното изследване показват, че по-голямата част от зависимостите на грешката в температурните измервания от стойностите на параметри на измерване са нелинейни. Най-значимо е влиянието на параметъра отразена температура, при което относителната грешка на температурните отчети достига до 20% .

3. Анализирано е влиянието на температурата на наблюдаваните обекти върху получените зависимости на грешката в температурните измервания. От резултатите е видно, че температурата на наблюдавания обект оказва значително влияние върху разглежданите зависимости. Резултатите доказват, че промяната на температурата на изследвания обект не предизвиква изменения на влиянието на излъчвателната способност върху зависимостите на относителната грешка. Отличен е факта, че за част от разглежданите зависимости (отразена температура и относителна влажност на въздуха) влиянието на температурата на обекта може да се опише с коефициент на взаимовръзка, който запазва стойността си и не зависи от излъчвателната способност.

4. Обоснована е необходимостта от прилагане на допълнителни интергрални критерии (агрегирани функции) за оценка на техническото състояние на

елементите на електрообзавеждането и е предложен такъв критерий - плътност на топлинния поток.

5. С цел подобряване на визуалният анализ, при ръчна обработка на резултатите от проведени термографски изследвания, са разработени методика и алгоритъм за обработка на термографски изображения на електрически съоръжения.

6. На базата на представената методика е разработена компютърна програма за обработка на термовизионни изображения, целяща подобряване на визуалната им интерпретация. Анализирани са влиянието на вида на високочестотните филтри и стойностите на коефициентите в операторните им матрици върху възможността за извличане на характерните особености на заснетите обекти. Като най-добри резултати, по отношение на извличането на характерните особености на обектите, се получават при използването на високочестотен филтър с операторна матрица $L3$.

7. Компютърната програма се използва в учебния процес при провеждането на практически занятия и при разработването на дипломни работи, свързани с анализиране на резултати от термовизионни изследвания на електрически съоръжения.

8. Разработената компютърна програма намира приложение в практиката при експлоатацията и термовизионната диагностика на помпени агрегати от две дружества работещи в тази област.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА НА МЕТОДИКИ, АЛГОРИТМИ И ПРОГРАМИ, ОБЕЗПЕЧАВАЩИ ТЕРМОВИЗИОННАТА ДИАГНОСТИКА НА ЕЛЕКТРООБЗАВЕЖДАНЕТО

3.1. Организация на термовизионната диагностика и провеждането на термовизионни измервания

Принципът на организация на термовизионната диагностика включва комплекс от взаимосвързани цикли, които определят последователността на операциите и количеството информация получавано от термовизионните проверки. Разработваните програми и инструкции, установяващи правилата и нормите за извършване на техническа диагностика на електрообзавеждането на основата на термовизионната техника, следва да включват в себе си решение на задачите за техническо диагностициране.

3.2. Алгоритъм и програма за обработка на резултатите и автоматизиране на анализа на термографските изображения

3.2.1. Предварителна обработка на входните данни

При предварителната обработка се изпълняват няколко основни операции, имащи за цел да преобразуват входните данни във вид удобен за понататъшна обработка.

Най-често входните данни се получават във вид на термографски изображения с различни цветови разпределения, които се преобразуват до изображение в сивата скала (*gray scale image*) чрез прилагане на зависимостта:

$$g(x, y) = 0.3R + 0.59G + 0.11B, \quad (3.1)$$

където R , G и B са цветовите координати на пиксел x, y .

Алтернативен начин на представяне на входните данни е чрез матрица на стойностите на температурата $T(x, y)$ или сигнала. В този случай данните първо се

нормализират по максималната стойност на температурата $T_{\max}$ или сигнала, а след това се преобразуват в изображение. Тази процедура се извършва, като се използва следното уравнение:

$$g(x, y) = L_{\max} \frac{(T(x, y) - T_{\min})}{(T_{\max} - T_{\min})}, \quad (3.2)$$

където: $L_{\max}$ – максимална стойност на интензитета на сивата скала.

3.2.2. Сегментация на изображението

Основната цел на сегментацията е да се определят зоните на изображението, в които се намира значимата информация. Процесът на сегментация може да се извършва полуавтоматично или автоматично.

3.2.2.1. Полуавтоматична сегментация

При полуавтоматичната сегментация се определя степента на сходство или различие на зоните от изображението. Тя се реализира чрез изчисление на нормираната взаимна корелация, която се определя чрез зависимостта:

$$\gamma(u, v) = \frac{\sum_{y=1}^k \sum_{x=1}^j [r(x, y) - \bar{r}][t(x+u, y+v) - \bar{t}]}{\sqrt{\sum_{y=1}^k \sum_{x=1}^j [r(x, y) - \bar{r}]^2 \sum_{y=1}^k \sum_{x=1}^j [t(x+u, y+v) - \bar{t}]^2}}, \quad (3.4)$$

където: $\bar{r}$ е математическо очакване в избрания регион; $t(x+u, y+v)$ - регион, за който се определя степента на сходство; $\bar{t}$ - математическо очакване в региона, за който се определя степента на сходство; u, v - отместване на сравнявания регион по съответната координата.

3.2.2.2. Автоматична сегментация

Процесът на автоматична сегментация е осъван на определяне на прагова стойност, спрямо която обработваното изображение се преобразува в бинарно изображение.

Най-често праговите стойности се получават на базата на хистограми или по метода на Отсу, при който праговата стойност k се подбира, така че дисперсията σ_B^2 между двата класа от пиксели да е максимална. За определяне на σ_B^2 се използва зависимостта:

$$\sigma_B^2 = \omega_0(\mu_0 - \mu_T)^2 + \omega_1(\mu_1 - \mu_T)^2. \quad (3.7)$$

3.2.3. Получаване на статистически показатели

За извличане на информацията съдържаща се в изображението се изчисляват статистически показатели, които могат да бъдат разделени в три групи.

3.2.3.1. Хистограмно базирани показатели

Показателите от тази група се използват за описание на разпределението на стойностите на интензитета g_i в цялото изображение. Тези показатели включват средна стойност μ , дисперсия σ^2 , средно квадратично отклонение σ , асиметрия *Skewness*, ексцес *Kurtosis* и ентропия H , определянето на които се извършва със следни зависимости:

$$\mu = \frac{1}{xy} \sum_{i=0}^{L-1} g_i h_i \quad (3.8) \quad \sigma^2 = \frac{1}{xy} \sum_{i=0}^{L-1} (g_i - \mu)^2 h_i \quad (3.9) \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{xy} \sum_{i=0}^{L-1} (g_i - \mu)^2 h_i} \quad (3.10)$$

$$\text{Skewness} = \frac{1}{xy\sigma^3} \sum_{i=0}^{L-1} (g_i - \mu)^3 h_i - 3 \quad \text{Kurtosis} = \frac{1}{xy\sigma^4} \sum_{i=0}^{L-1} (g_i - \mu)^4 h_i \quad H = - \sum_{i=0}^{L-1} p_i \log(p_i) \quad (3.11) \quad (3.12) \quad (3.13)$$

където h_i е броя на пикселите с i -то ниво на интензитет.

3.2.3.2. Показатели на матрицата на взаимното възникване на интензитетите

Двумерните статистически показатели, които могат да се определят на базата на матрицата на взаимното възникване на интензитетите, включват хомогенност, енергия, ентропия, контраст и коефициент на корелация. За определянето им се използват следните зависимости:

$$\text{Homogeneity} = \sum_{m=0}^{L-1} \sum_{n=0}^{L-1} \frac{p(m,n)}{1+|m-n|} \quad (3.14)$$

$$\text{Entropy} = - \sum_{m=0}^{L-1} \sum_{n=0}^{L-1} p(m,n) \log_2[p(m,n)] \quad (3.16)$$

$$\text{Energy} = \sum_{m=0}^{L-1} \sum_{n=0}^{L-1} p^2(m,n) \quad (3.15)$$

$$\text{Contrast} = \sum_{q=0}^{L-1} q^2 \sum_{m=0}^{L-1} \sum_{n=0}^{L-1} p(m,n), q = |m-n| \quad (3.17)$$

$$\text{Correlation} = \frac{\sum_{m=0}^{L-1} \sum_{n=0}^{L-1} p(m,n) - \mu_x \mu_y}{\sigma_x \sigma_y} \quad (3.18)$$

където: $p(m,n)$ е вероятността за поява на пиксели с интензитети m и n на зададено разстояние един от друг.

3.2.3.3. Компонентно базирани показатели на интензитета

Те са сходни на хистограмно базирани показатели, но се определят само за региона от изображението получен след процеса на сегментация. Най-често използваните компонентно базирани показатели са: минимален $g_{\min}$ и максимален $g_{\max}$ интензитет, среден интензитет μ_g , дисперсия σ_g^2 и средно квадратично отклонение σ_g . Формулите с които се определят тези показатели са:

$$g_{\max} = \max g_i \quad (3.19)$$

$$g_{\min} = \min g_i \quad (3.20)$$

$$\mu_g = \frac{1}{ab} \sum_{i=0}^{L-1} g_i h_i \quad (3.21)$$

$$\sigma_g^2 = \frac{1}{ab} \sum_{i=0}^{L-1} (g_i - \mu_g)^2 h_i \quad (3.22)$$

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{1}{ab} \sum_{i=0}^{L-1} (g_i - \mu_g)^2 h_i} \quad (3.23)$$

където a и b са размерите на региона получен при сегментацията.

3.2.4. Техники за машинно обучение

Вземайки предвид голямата сложност на физическите процеси, възникващи при заснемането на термографските изображения, става ясно, че в този случай използването на класическия подход за съставяне на математическите модели и алгоритмите за класификация на изображенията е нецелесъобразен. Това налага използването на техники за машинно обучение (*machine learning* и *deep learning*). При класификацията на изображения най-широко приложение са намерили

класическия модел k на брой съседни точки (*k-nearest neighbors k-NN*) и различни вариации на модела на опорните вектори (*support vector machine SVM*).

- Модел *k-nearest neighbors* – е непараметричен модел, използван за класификация и разпознаване на изображения. Независимо от броя на разглежданите съседни точки, моделът за класифициране *k-NN* може да бъде описан чрез следното уравнение:

$$a(j) = \arg \max_{y \in Y} \sum_{i=1}^m [x_{i,j} = y] w(i, j) \quad (3.25)$$

където: x_i е класа на най-близкия обект от данните за обучение; $w(i, j)$ - дадена теглова функция

- Модел *Support Vector Machine* – основава се на построяването на множество хипер-равнини в многомерното пространство, които могат да се използват за класификация на подаваните входни данни. При класификацията на термографски изображения за целите на техническата диагностика, модела за класифициране се записва със следната функция:

$$a(i) = \min \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \max(0, 1 - y_i(\vec{\alpha} \cdot x_i - b)) + \gamma \|\alpha\|^2 \right]. \quad (3.27)$$

3.2.5. Компютърна програма за автоматизирана обработка и класификация на термографски изображения на асинхронни двигатели

На базата на представеният алгоритъм е разработена програма, в софтуерната среда MATLAB, позволяваща класификацията на термографските изображения на асинхронни двигатели чрез два *machine learning* модела.

На основата на получените статистически показатели са разработени и обучени два модела (*kNN* и *SVM*) за машинно обучение, за класификация на термографски изображения.

За оценяване на действието на двата модела е направена класификация на един и същи набор от шестдесет на брой тестови изображения. Оценката на работата на моделите се прави на основата на относителната грешка при класификация и матрицата на нетоностите (фиг. 3.4. и фиг. 3.5.).

За модел *kNN* относителната грешка при класификация е 35,33%.

True Class	Bearing fault	2	8	
	Good	3	35	2
	Vent problem	6	4	
		Bearing fault	Good	Vent problem
		Predicted Class		

Фиг. 3.4. Матрица на нетоностите при класифициране на тестов набор изображения с *kNN* модел

За модел *SVM* относителната грешка при класификация е 16,7%.

True Class	Bearing fault	7	2	1
	Good	3	37	
	Vent problem	1	3	6
		Bearing fault	Good	Vent problem
		Predicted Class		

Фиг. 3.5. Матрица на нетоностите при класифициране на тестов набор изображения с *SVM* модел

3.3. Модел за описание на динамичните топлинни процеси в асинхронни двигатели с честотно регулиране

В основата на топлинните модели на АД стои баланса на енергийните загуби в машината:

$$m_m C_{meq} \frac{dT}{dt} = \Delta P - \dot{Q}_{tot}, \quad (3.28)$$

където: m_m е масата на двигателя; C_{meq} – еквивалентен специфичен топлинен капацитет на двигателя; $\dot{Q}_{tot}$ – обща топлинна мощност разсейвана в околната среда.

При асинхронните двигатели със самовентилация коефициентът на конвекционен топлообмен при принудителна конвекция h_f зависи от скоростта на движение на въздуха във вентилационните канали v_k . Следователно при регулируемите електрозадвижвания ще се наблюдава изменение на динамичното топлинно поведение на двигателя.

При по-голямата част от двигателите тип *TEFC*, каналите за вентилация са полуотворени, което не позволява директно използване на изразите за аеродинамичните и топлинни процеси. В този случай се използва емпирична зависимост за полуотворени канали:

$$h_f = \frac{\rho_a c_{pa} D v_k}{4L} (1 - e^{-m}), \quad (3.32)$$

където: D – хидравличен диаметър на вентилационния канал; L – дължина на канала; ρ_a и c_{pa} – плътност и специфичен топлинен капацитет на въздуха.

Получената стойност на коефициента на конвекционен топлообмен при принудителна конвекция трябва да се умножи по коефициент на турбулентност, чиято стойност не зависи от скоростта на движение на въздуха във вентилационния канал и е между 1,7 и 1,9.

Изменението на температурата на корпуса на двигателя във времето може да се получи чрез

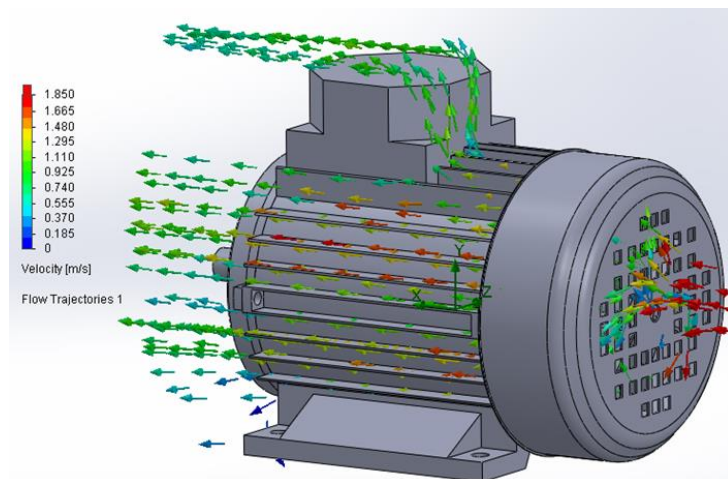
$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{m_m C_{meq}} [\Delta P(t) - (\dot{Q}_{nconv}(t) + \dot{Q}_{fconv}(t) + \dot{Q}_{rad}(t))], \quad (3.35)$$

където: $\dot{Q}_{rad}$, $\dot{Q}_{nconv}$ и $\dot{Q}_{fconv}$ са мощностите разсейвана чрез лъчение естествена и принудителна конвекция.

Направено е експериментално заснемане на процесите на загряване на трифазен АД с накъсо съединен ротор тип АТ71 В4, при различни честоти на въртене на двигателя. Двигателят има номинална мощност 0,37 kW и номинална честота на въртене 1360 min⁻¹. Управлението му се реализира с честотен регулатор ELDI/B, с мощност 0,55 kW, който осигурява изменение и поддържане на оборотите на двигателя в границите от 160 до 2000 min⁻¹, при реализиране на закон за честотно регулиране $U/f = const$. Измерванията на температурата на двигателя се извършват с термовизионна камера FLIR E60. Продължителността на измерването при снемането на кривата на загряване е 40min, като стойностите на температурата се отчитат на всеки 0,13s. Заснеманията на кривата на загряване на асинхронния двигател се извършват при работа му в режим на празен ход с оглед на възможността за директно определяне на загубите на мощност ΔP в двигателя.

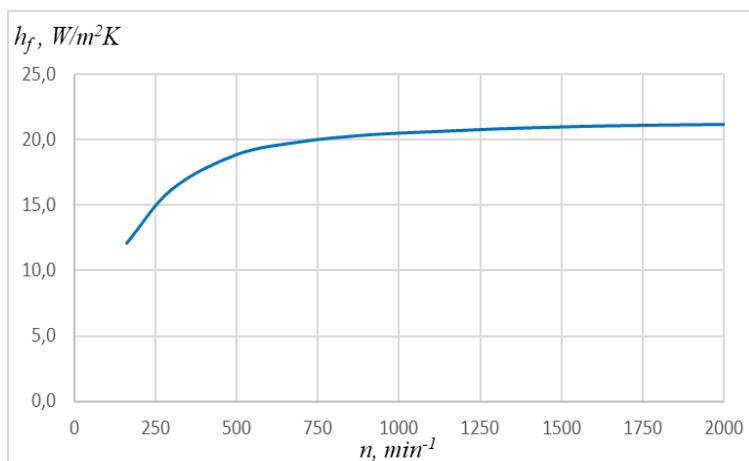
За определяне на неелектрическите величини – температура на околната среда и скорост на движение на въздуха, се използва термоанемометър.

На основата на техническата документация на изследвания двигател е разработен точен 3D модел на двигателя, като е използван програмния продукт SolidWorks. Проведени са симулации, от които е получено разпределението на въздушния поток около двигателя при отделните стойности на обемния дебит т.е. при работа с различни честоти на въртене. Резултатите от симулациите на разпределението на въздушния поток при максималната честота на въртене на двигателя са представени на фиг. 3.7.



Фиг. 3.7. Разпределение на въздушния поток около двигателя при честота на въртене 2000 min^{-1}

На базата на получените скорости на въздушния поток във вентилационните канали са изчислени стойностите на коефициента на конвекционен топлообмен от принудителна конвекция. Изменението му, в зависимост от честотата на въртене на двигателя, е показано на фиг. 3.10.



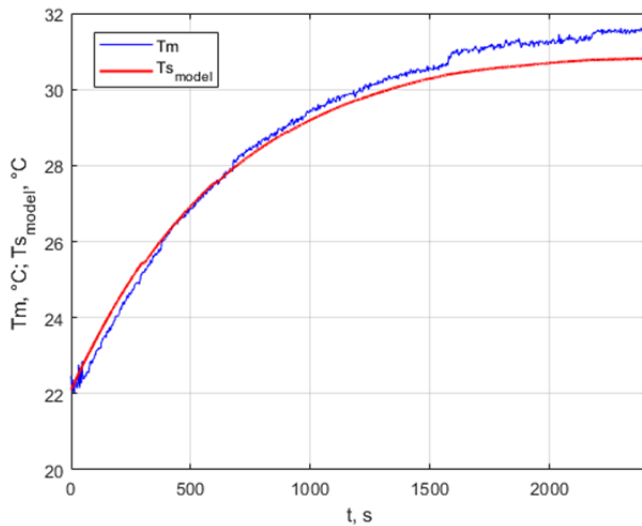
Фиг. 3.10. Изменение на коефициентът на конвекционен топлообмен при принудителна конвекция, в зависимост от честотата на въртене

Стойността на коефициента на конвекционен топлообмен от принудителна конвекция остава относително неизменна до около 700 min^{-1} , след което рязко започва да намалява.

Стойността на коефициента на конвекционен топлообмен при естествена конвекция е $h_{nat} = 4,149 \text{ W} / \text{m}^2\text{K}$ и е получена по опитен път от кривата на охлаждане на двигателя.

След заснемане на кривата на загряване на двигателя, получените данни се импортират в MATLAB за извършване на понататъшната обработка. На получените данни за стойностите на температурата се извършва нискочестотна филтрация за намаляване на шума, като за целта се използва метода на пълзящото осредняване. На основата на стойностите на температурата се изчисляват мощностите разсейвани чрез лъчение и естествена и принудителна конвекция по време на преходния процес. След като всички елементи на модела, представен с уравнение (3.35), и началните условия са известни се пристъпва към определяне на теоретичната стойност на температурата на корпуса на двигателя и нейното изменение във времето – получаване на теоретична крива на загряване.

Резултатите от моделирането на теоретичната крива на загряване на двигателя при работа с 1300 min^{-1} са показани на фиг. 3.16.



Фиг. 3.16. Резултати от моделирането на топлинния преходен процес в двигателя

3.4. Топлинен диагностичен модел на асинхронен двигател в установен режим на работа

Диагностичният модел позволява да се изчислят параметрите на техническото състояние, т.е. температурата на намотката на двигателя въз основа на анализа на пространственото разпределение на температурното поле.

За еднородна изотропна среда изменението на температурата в пространството и времето се изразява с диференциалното уравнение на топлопроводимостта:

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + q_{in} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.36)$$

$$\frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_{in}}{\rho c} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.37)$$

При установен (стационарен) режим на работа на двигателя температурата в отделните точки не се променя, т.е. $\partial T / \partial t = 0$. Решението на диференциалното уравнение на стационарна топлопроводимост в рамата на АД има вида:

$$\frac{h_t t_{0b}}{q_s} = \frac{Bi_l + \sqrt{Bi_f} th N_f}{\sqrt{Bi_l} th N_l + \sqrt{Bi_f} th N_f}, \quad (3.42)$$

където: t_{0b} е температурният потенциал в основата на ребрата; Bi_l , Bi_f - число на Био за реброто и рамата; N_l , N_f - характеристичен размер на реброто и рамата

Плътноста на топлинния поток q_s , който преминава през основата на елемента може да се определи като:

$$q_s = \vartheta_{\Delta H} \sqrt{\frac{h_t \lambda u}{f}} th(m \Delta H), \quad (3.45)$$

където: u и f - периметърът и напречното сечение на изследвания елемент; h_t - обобщен коефициент на топло-отдаване от повърхността на ребрата; $\vartheta_{\Delta H}$ - прегряване в края на топлопроводящият елемент

При преминаване на топлинния поток през структурните елементи на двигателя се реализират падове на температурен потенциал.

3.4.1. Анализ на термографско изображение на асинхронен двигател

На фиг. 3.19 е представено термографско изображение на изследвания асинхронен двигател, върху който са отчертани зоните за снемане на данни за температурата при анализа на термограмата. Термограмата е заснета в установен топлинен режим на работа на двигателя, 60 минути след началото на работата му.

Сравнението на моделираните и измерените криви на загряване на двигателя може да се прилага като критерий за оценка на техническото му състояние при извършването на термо-визионна диагностика, както и за оценка на експлоатационните му режими при работа с ниски честоти на въртене.

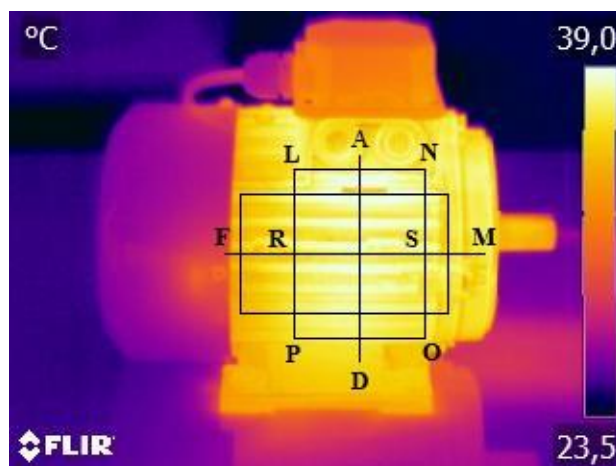
Разработеният модел на топлинните процеси отчита работата при променливи условия на охлаждане.

Анализът на разпределението на температурата в зоната, маркирана с правоъгълника LNOR показва, че температурата на повърхността варира в диапазона от 34.5 до 39.6°C при температура на околната среда $T_{amb} = 22,5^\circ\text{C}$.

Въз основа на термографското изследване се определят температурите и се изчислява експерименталната стойност на съотношението $\vartheta_f / \vartheta_l$. При това може да се запишат следните зависимости за експериментално определяне на коефициента на топлоотдаване h_{t_exp} и стойността на плътността на топлинния поток q_{sr} .

$$h_{t_exp} = \frac{m_{exp}^2 \lambda f}{u} \quad (3.48)$$

$$q_{sr} = \frac{h_{t_exp} \vartheta_l}{k} \quad (3.49)$$



Фиг. 3.19. Термографско изображение на асинхронен двигател с обозначени зони за снемане на данни за температурата

3.4.2. Параметрична идентификация и валидиране на топлинния диагностичен модел на асинхронен двигател

Линейните топлинни съпротивления на отделните слоеве на конструкцията се определят по следните изрази:

$$R_{L_f} = \frac{\ln[(D_{n1} + 2\delta_{ag} + 2\delta_f) / (D_{n1} + 2\delta_{ag})]}{2\lambda_f} \quad (3.51)$$

$$R_{L_ag} = \frac{\ln[(D_{n1} + 2\delta_{ag}) / (D_{n1})]}{2\lambda_a} \quad (3.52)$$

$$R_{L_s} = \frac{\ln[D_{n1} / (D_{n1} - 2h_s)]}{2\lambda_s} \quad (3.53)$$

$$R_{L_ins} = \frac{\ln[D_C / (D_C - 2b_1)]}{2\lambda_{ins}} \quad (3.54)$$

където: D_{n1} , δ_{ag} , δ_f , h_s , b , D_C - конструктивни размери на АД показани в Таблица 3.5

При преминаване на топлинния поток през структурните елементи на двигателя се реализират изменения на температурата, които могат да се определят с:

$$\Delta\tau_f = \frac{q_l R_{L_f}}{\pi} \quad (3.55) \quad \Delta\tau_{ag} = \frac{q_l R_{L_ag}}{\pi} \quad (3.56) \quad \Delta\tau_s = \frac{q_l R_{L_s}}{\pi} \quad (3.57) \quad \Delta\tau_{ins} = \frac{q_l R_{L_ins}}{\pi} \quad (3.58)$$

Резултатите от изчисленията на линейната плътност на топлинния поток и температурата на

отделните елементи са представени в Таблица 3.8.

С цел валидиране и проверката на точността на разработения модел е създаден модел на разглеждания двигател с програмен продукт Motor-CAD, който позволява симулирането на различни типове полета в електрически

Таблица 3.8.

Параметър	Означение	Стойност
Линейна плътност на топлинния поток	q_l , W/m	2084,983
Изменение на температурата в рамата	$\Delta\tau_f$, °C	0,177517
Изменение на температурата в междината между рамата и магнитопровода	$\Delta\tau_{ag}$, °C	1,840136
Изменение на температурата в магнитопровода	$\Delta\tau_s$, °C	1,716254
Изменение на температурата в каналната изолация	$\Delta\tau_{ins}$, °C	1,563441
Температура на намотката на двигателя	T_w , °C	43,59

двигатели. Резултатите от симулацията на топлинното поле показват, че максималната температура на намотката е $T_{w \max} = 42,31^{\circ}C$.

3.5. Изводи към ТРЕТА ГЛАВА

1. Разработена е инженерна методика за автоматизиране на процесите на обработка и анализ на термографски изображения и получаване на статистическите показатели на изображенията.

2. На основата на формулираната инженерна методика е разработена компютърна програма, в програмна среда MATLAB R2019b, за определяне на необходимите статистически показатели на термовизионните изображения и класифицирането им чрез използване на техники за машинно обучение. Разработени са и са обучени два machine learning модела за класифициране на техническото състояние на асинхронни двигатели представени на термовизионните изображения.

3. Изследвана е приложимостта и точността на двата типа модели за машинно обучение (kNN и SVM), при класифициране на техническото състояние на асинхронни двигатели. Резултатите от изследването показват, че SVM моделът е по-подходящ за класификацията на термовизионни изображения на асинхронни двигатели, тъй като осигурява по-малка грешка (16,7%) при прогнозиране на техническото състояние на двигатели и успешно отличава характеристиките съответстващи на различните технически състояния. Моделът kNN има над два пъти по-голяма грешка при прогнозиране на техническото състояние (35,33%) и не е в състояние да отличи характеристиките съответстващи на част от повредите в двигателя.

4. Компютърната програма може успешно да се прилага и за други типове електрически съоръжения. За целта е необходимо единствено преобучаване на моделите за откриване на повредите, чрез тренировъчен набор от предварително класифицирани изображения на дадения тип съоръжение.

5. Разработен е модел за описание на динамичните топлинни процеси в асинхронни двигатели при променливи условия на охлаждане. Моделът е приложим за напълно затворени двигатели със самовентилация, с различни конфигурации.

6. Проведено е експериментално изследване на регулируемо електрозадвижване с асинхронен двигател, при което са получени стойностите на необходимите електрически, аеродинамични и топлинни величини. Създаден е 3D модел на машината и са извършени симулации на разпределението на въздушния поток около двигателя при различни честоти на въртене. Изследвано е изменението на коефициентът на топлоотдаване чрез принудителна конвекция, в зависимост от честотата на въртене на двигателя и е показано, че за честоти на въртене под 700 min^{-1} се наблюдава рязко влошаване на условията на охлаждане на двигателя.

7. Разработен е топлинен диагностичен модел за асинхронни двигатели, работещи в установен топлинен режим, целящ определянето на температурата на намотките на двигателя чрез резултатите от термовизионните изпитвания.

8. Проведена е обработка и анализ на термографски изображения на асинхронен двигател и чрез разработения модел е определена температурата на намотките на двигателя. С цел валидиране на резултатите от модела са проведени симулации на топлинното поле в двигателя със специализиран софтуер Motor-

CAD, като симулационните резултати се отличават с 3,025% от резултатите получени чрез разработения топлинен диагностичен модел.

ГЛАВА 4. ОПТИМИЗАЦИЯ НА ДИАГНОСТИЧНИТЕ ПРОЦЕСИ ЧРЕЗ ПРОГНОЗИРАНЕ НА НАДЕЖНОСТНИТЕ ПОКАЗАТЕЛИ НА ЕЛЕКТРООБЗАВЕЖДАНЕТО

4.1. Съвременни похвати за моделиране, оценка и прогнозиране на надеждностните показатели на електрообзавеждането

Съществуват редица техники за оценка на надеждността. Приложението им зависи от типа на системата, времето и разходите за прилагането им, и вида на необходимите резултати.

4.1.1. Анализ на вида и влиянието на отказа (*Failure Modes and Effects Analysis FMEA*)

FMEA анализът се състои в разделяне на системата на компоненти, за да се прецени кои елементи могат да откажат, как и защо настъпват отказите. FMEA се фокусира върху оценката на въздействието, което отказът има върху производителността и безопасността на системата.

4.1.2. Анализ на дървото на отказите (*Fault Tree Analysis FTA*)

FTA анализът е един от най-широко разпространените инструменти за причинно-следствен анализ на възникването на определени събития. Този тип модели се използват за диагностика и оценка на надеждностните показатели на големи, сложни и динамично изменящи се технически системи.

4.1.3. Моделиране и прогнозиране на надеждностните показатели на регулируемо електрозадвижване с асинхронен двигател

Анализът на надеждностните показатели на регулируемо електрозадвижване с асинхронен двигател се извършва като се прилага комбиниран подход, съчетаващ FMEA и FTA модели.

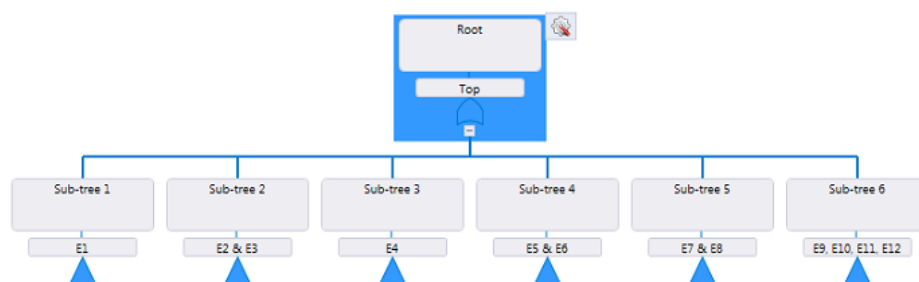
При FMEA анализът регулируемото електрозадвижване е разделено на 12 отделни елемента, разгледани са 23 възможни повреди. Резултатите касаещи честотния регулатор са показани в Таблица 4.4.

Таблица 4.4.

<i>FMEA таблица за честотен регулатор</i>		
<i>Елемент</i>	<i>Тип на повредата</i>	<i>Причина за повредата</i>
Е9 Изправител	F18 - Повреди на полупроводниковите елементи (пробиви или прекъсвания)	C3 - Прегряване; C16 - Повишено захранващо напрежение; C17 - Токово претоварване
Е10 Междинно DC звено	F19 - Повреди в кондензатора на междинното DC звено	C3 - Прегряване; C16 - Пошено захранващо напрежение; C18 - Стареење на кондензатора
Е11 Инвертор	F20 - Повреди на електронните ключове; F21 - Загуба на управляващ сигнал	C3 - Прегряване; C16 - Пошено захранващо напрежение; C17 - Токово претоварване; C20 - Неизправност на блока за генериране на управляващи сигнали; C21 - Загуба на оперативно захранване
Е12 Система за управление на честотния регулатор	F22 - Липса на обратна връзка; F23 - Повреда в микропроцесорната система	C13 - Грешки в производствените процеси; C21 - Загуба на оперативно захранване

За моделиране на дървото на отказите на регулируемото електрозадвижване се използва софтуерният продукт TopEvent FTA.

Дървото на отказите на регулируемото електрозадвижване, построено на базата на проведения FMEA анализ, е показано на фиг. 4.2.



Фиг. 4.2. Дърво на отказите на регулируемо електрозадвижване с асинхронен двигател

Реализацията на модела чрез отделни под-системи позволява оценката на различни конструкции или топологии на електрозадвижването.

С оглед постигане на висока точност при прогнозирането на надеждностните характеристики се използва комбинация от методики за определяне на вероятностите за отказ или безотказна работа на компонентите на системата.

4.1.3.1. Лагерни възли

Вероятността за отказ, причинен от лагерния възел, за даден момент от време се подчинява на закона на разпределение на Вейбул:

$$Q_b(t) = e^{\left(-\frac{t}{6,84L_h}\right)^{1,17}}, \quad (4.10)$$

където L_h е 90%-та експлоатационна дълготрайност на лагера.

Вероятността за безотказна работа на двата лагерни възела на двигателя по отношение на конструктивната надеждност се определя като:

$$P_b(t) = 1 - Q_{b1}(t)Q_{b2}(t). \quad (4.15)$$

4.1.3.2. Междунавивкова изолация

Най-широко приложение при моделирането на надеждността на междунавивковата изолация е намерил моделът на „най-слабото звено“. Този метод на изчисление позволява да се оцени вероятността за безотказна работа на междунавивковата изолация за период от време, през който не настъпва интензивно стареене на изолацията.

Надеждността (вероятността за безотказна работа) на междунавивковата изолация може да се определи по зависимостта:

$$R(t) = P(t) = [1 - q(U_{mv})]^N, \quad (4.16)$$

където: U_{mv} – амплитудна стойност на фазното напрежение, с отчитане на възникващите комутационни пренапрежения; N – брой на единичните участъци на междунавивковата изолация в намотката (брой на навивките за фаза).

Вероятността за възникване на пробив в междунавивковата изолация за период от време t се определя като:

$$q(U_{mv}) = p^2 \lambda \int_0^{U_{mv}} \Phi\left(\frac{U - \bar{U}_2}{\sigma_2}\right) e^{-\lambda U} \left(1 - \frac{U}{U_{mv}}\right) dU, \quad (4.17)$$

където: U е действителната стойност на напрежението, с което работи двигателя; p – вероятност за повреда в елементарен участък от изолацията на проводника; λ –

параметър на експоненциалния закон на разпределение на пробивното напрежение; $\bar{U}_2$ - средна стойност на пробивното напрежение; σ_2 - средно квадратично отклонение на пробивното напрежение; Φ - нормирана функция на Лаплас.

4.1.3.3. Главна изолация

Деградацията на изолацията се получава в резултат на нагряване, механично натоварване (вибрации, натиск, удар), влиянието на влага, агресивни среди и други фактори. Основният надеждностен показател за оценка и моделиране на състоянието на изолацията е нейната експлоатационна дълготрайност.

Преобладаващата част от пробивите настъпващи в главната изолация на електрическите машини са топлинни пробиви. Температурната устойчивост се определя от скоростта на стареене на изолацията при повишени температури.

За оценка на влиянието на температурата върху експлоатационната дълготрайност на изолацията може да се използва формулата:

$$\tau = \tau_0 \cdot 2^{\frac{T}{\Delta T}}, \quad (4.22)$$

където: T – работна температура на двигателя; ΔT – нарасване на температурата, предизвикващи намаляване на експлоатационния срок с 2 пъти.

Механичните натоварвания също силно влияят върху експлоатационния срок на изолацията. Те са резултат от електродинамични сили, които възникват в машината. В този аспект експлоатационният срок на изолацията може да се дефинира като времето необходимо за механично разрушаване на изолацията под действието на електродинамичните сили. В такъв случай експлоатационният срок на полимерна изолация се определя по следната аналитична зависимост:

$$\tau = \tau_0 e^{(U_0 - \kappa \sigma)}, \quad (4.23)$$

където: U_0 - енергия на активиране на разрушаването на адхезивните връзки; κ – коефициент, зависещ от повърхностния слой и дебелината на изолацията; σ – вътрешно механично напрежение в полимера.

4.1.3.4. Честотен регулатор

За оценка на надеждността на честотните регулатори най-често се използва средната отработка до отказ, която може да се определи на базата на интензивностите на отказ на отделните компоненти, използвайки зависимостта:

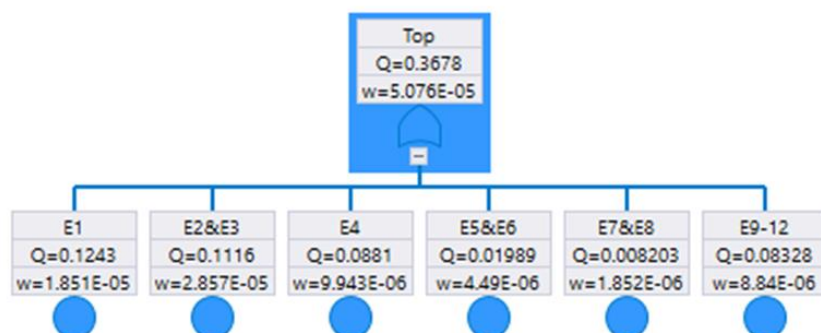
$$MTTF_{FC} = \frac{1}{6\lambda_D + \lambda_C + 6\lambda_T}, \quad (4.24)$$

където λ_D , λ_C и λ_T са интензивностите на отказ на диодите, кондензаторите и IGBT транзисторите.

4.1.3.5. Резултати от симулацията на надеждностните показатели

Резултатите за вероятността за настъпване на отказ, в електрозадвижването и за отделните под-системи, получен при провеждането на симулация с програмният продукт *TopEvent FTA*, за времеви период на оценяване $t_{est} = 10000h$ е показан на фиг. 4.5.

Отличителна черта на FTA метода е възможността за опреде-



Фиг. 4.5. Резултати от симулацията на надеждностните показатели.

ляне на коефициентите на т.нар. важност на компонента, които класифицират компонентите по отношение на тяхното влияние върху надеждността на системата. За определяне на коефициентите на важност се използват следните уравнения:

$$I^B(i|t) = \frac{\partial h(p(t))}{\partial p_i(t)} \quad (4.25) \quad DIF_i(t) = \frac{q_i(t) \cdot Q(t) \big|_{q_i(t)=1}}{Q(t)} \quad (4.26) \quad I^{RRW}(i|t) = \frac{Q(t)}{Q(t) \big|_{q_i(t)=0}} \quad (4.28)$$

$$MIF = \frac{\partial Q(t)}{\partial q_i(t)} = Q(t) \big|_{q_i(t)=1} - Q(t) \big|_{q_i(t)=0} \quad (4.29) \quad CIF = \frac{q_i(t) MIF_i(t)}{Q(t)} = \frac{Q(t) - Q(t) \big|_{q_i(t)=0}}{Q(t)} \quad (4.30)$$

В Таблица 4.7 са представени резултатите за надеждностите характеристики на отделните елементи, степента на принос на елементите в цялостното намаляване на надеждността и коефициентите на важност на елементите.

Таблица 4.7.

<i>Минимално сечение</i>	<i>E1</i>	<i>E2&E3</i>	<i>E4</i>	<i>E5&E6</i>	<i>E7&E8</i>	<i>E9-12</i>
Вероятност за отказ $Q(t)$	0,1243	0,1116	0,0881	0,01989	0,008203	0,08328
Принос на сечението	0,33565	0,24764	0,20237	0,03827	0,01578	0,16027
Коефициент на гранична важност MIF	0,69479	0,65832	0,64101	0,58525	0,57835	0,62571
Коефициентът на критична важност CIF	0,28421	0,19868	0,15809	0,0273	0,01112	0,12221
Стойност за намаляване на риска RRW	1,39705	1,24794	1,18778	1,02807	1,01120	1,13923
Коефициентът на диагностична важност DIF	0,40906	0,30179	0,24663	0,04664	0,01923	0,19532

Резултатите, получени при определяне на коефициентите на важност на компонентите и диагностичния коефициент на отделните елементи, могат да бъдат използвани при проектирането на встроените технически средства за диагностика и при разработката на оптимална програма на диагностичния процес.

4.2. Определяне и оптимизация на периодичността на провеждане на термовизионни изпитвания на електрообзавеждането

Основната цел на извършването на изпитванията е да се ограничи времето на престой. Това налага провеждането на проверките да има определена периодичност (честота), отговаряща на конкретните експлоатационни условия и икономически фактори.

4.2.1. Определяне на периодичността на диагностициране при поддържане на вероятността за безотказна работа

Много често при определянето на периодичността на диагностициране, освен поддържането на надеждностните показатели, се налага да се отчитат и икономическите фактори.

При наличие на статистическа информация за средната отработка между отказите на системата, отработката до първата диагностика се определя от равенството на разходите за диагностициране C_D и възстановяване на работоспособността C_P за периода от време до първата диагностика, т.е.

$$C_D = \xi C_P. \quad (4.37)$$

където ξ е коефициент на съвременното изпълнение на първата диагностика.

Отклонението на оптималното време за работа до първата диагностика t_i , от средната отработка на възела до отказ, се определя от зависимостта:

$$\Phi\left(\frac{t_i}{\sigma_t}\right) = 1 - \xi. \quad (4.38)$$

На основата на уравнение (4.38) може да се запише, че оптималното време за провеждане на първа диагностика се определя като:

$$t_{Д1} = T_{cp} - t_i. \quad (4.39)$$

Обосновката на последващите моменти (периодичността) на диагностика се основава на статистическата обработка на данни за характера на зависимостта на диагностичния параметър (параметър на техническото състояние) от времето на работа.

Решението на задачата за оптимизиране на честотата на диагностика се свежда до разглеждане на два случая. В първият случай съоръженията не се диагностицират, а възстановяването на техническото им състояние се извършва в момента t_{np} . Във вторият случай броят, а също така и моментите на диагностициране се избират, като се вземат предвид най-добрите икономически показатели.

При първият случай математическото очакване на загубите от непълно или прекомерно използване на ресурса на елементите на системата се определя като

$$J_0 = \int_{\alpha}^{\beta} g(t - t_{np}) \mu(t) dt. \quad (4.41)$$

Във вторият случай при проведени k диагностицирания по време на работа, в моментите $\alpha \leq t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_k \leq \beta$, е възможно да се запише следния израз

$$P(t_1, \dots, t_k) = \int_{\alpha}^{t_1} g(t - t_1) \mu(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} g[D(t_1, t)] \mu(t) dt + \dots + \int_{t_k}^{\beta} g[D(t_k, t)] \mu(t) dt. \quad (4.42)$$

Тъй като всеки интеграл от горния израз представлява математическо очакване на загубите от непълно или прекомерно използване на ресурса на елементите, то (4.42) е математическото очакване на загубите при k на брой диагностицирания в моментите $t_1, t_2, \dots, t_k$, без отчитане на разходите за диагностика. Оптималната стойност на зависимостта (4.42) се определя като:

$$P_k = \min\{P(t_1, \dots, t_k); \alpha \leq t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_k \leq \beta\}. \quad (4.43)$$

При това математическото очакване на загубите при k на брой диагностицирания, с отчитане на разходите за диагностика, се определя със зависимостта:

$$J_k = P_k + C_{Дk}. \quad (4.44)$$

Тъй като $C_{Д} > 0$, съществува такова естествено число n , при което $nC_{Д} \geq J_0$. За всички естествени числа в границите $1 \leq k \leq n$ се изчислява J_k и се определя минималната стойност $J_m = \min\{J_k; k = 0, 1, \dots, n\}$. Оттук става ясно, че е икономически най-оправдано да се провеждат m на брой диагностични процеса в моментите $t_1, t_2, \dots, t_m$, за които е изпълнено условието $P(t_1, \dots, t_m) = P_m$.

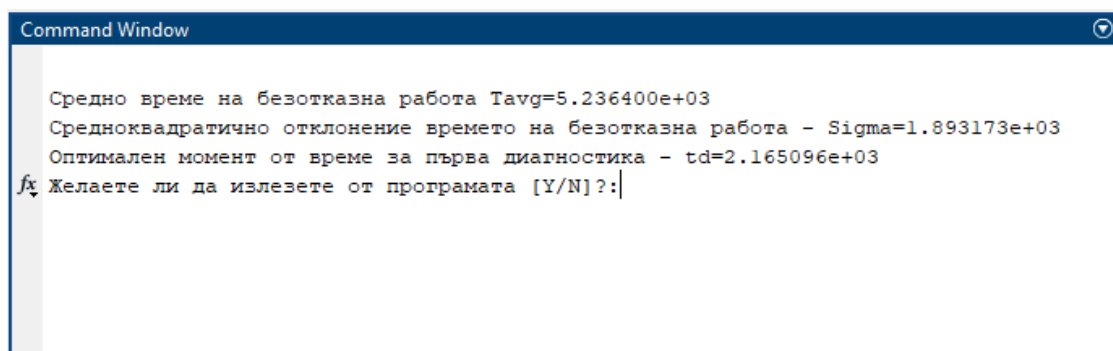
4.2.3. Изследване на моделите за оптимизация на диагностичния процес на електрообзавеждането

Разглежда се работата на алгоритмите за определяне на периодичността на диагностициране при оптимизиране на диагностичния процес на нововъведени и намиращи се в експлоатация помпени агрегати. При съставянето на програмата за определяне на периодичността на извършване на диагностичните процеси се решават следните основни задачи:

- Определяне на момента от време за извършване на първия диагностичен процес;
- Определяне на оптималните брой и моменти от време за извършване на диагностичните процеси.

За решаването на задачата е съставена програма за изчисление на оптималното време за извършване на първия диагностичен процес, като е използван програмен продукт MATLAB R2019b.

Резултатите от работата на програмата са показани на фиг. 4.8, като от тях става ясно, че оптималния момент от време за извършване на първа диагностика за разглеждания тип помпени агрегати е $t_D = 2165 \text{ h}$.



```
Command Window

Средно време на безотказна работа Tavg=5.236400e+03
Средноквадратично отклонение времето на безотказна работа - Sigma=1.893173e+03
Оптимален момент от време за първа диагностика - td=2.165096e+03
Желаете ли да излезете от програмата [Y/N]?:
```

Фиг. 4.8. Резултати за статистическите показатели и оптималния момент за извършване на първа диагностика

В резултат от изследването може да се заключи, че има две отличителни особености в работата на алгоритъма.

- Получаване на отрицателни стойности за оптималният момент за първа диагностика.

В случаите, когато поради особеностите на разглежданите производствени агрегати или особеностите на средата, в която те се експлоатират, във входните данни има голяма разнородност, т.е. стойността на средноквадратичното отклонение е съизмерима с математическото очакване на времето на безотказна работа, оптималното време за извършване на първа диагностика има отрицателна стойност.

- Получаване на оптимален момент за извършване на първа диагностика съизмерим със средното време на безотказна работа.

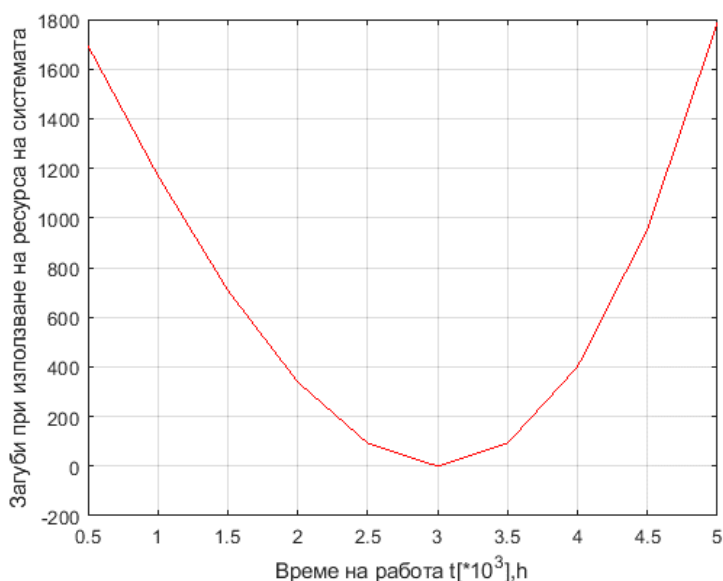
Тази особеност възниква в случаите, когато себестойността на извършвания диагностичен процес е значителна част от цената за възстановяване на работоспособността на системата. Тук коефициентът на своевременното изпълнение на първата диагностика има значителна стойност.

За решаването на втората основна задача е разработена програма за изчисление на оптималните брой и моменти от време за извършване на диагностичните процеси, като е използван програмен продукт MATLAB R2019b.

За разглежданият тук случай минимална и максимална стойност на случайната величина t_{np} са съответно $\alpha = 2000\text{ h}$ и $\beta = 4000\text{ h}$. При това максималният брой на диагностичните процеси за този времеви интервал е $N = 7$.

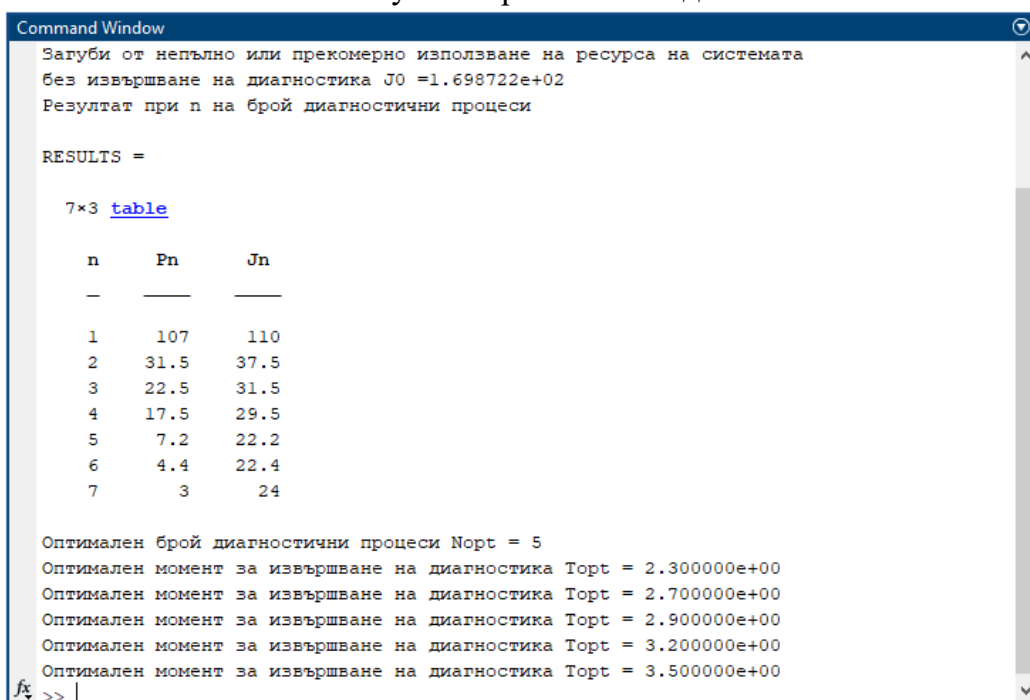
На фиг. 4.13 е представено изменението на загубите от непълното или прекомерното използване на техническия ресурс на системата при липса на техническа диагностика.

От нея е видно, че минимумът на функцията на загубите от непълното или прекомерното използване на техническия ресурс се постига при време на работа $t_{np} = 3000\text{ h}$.



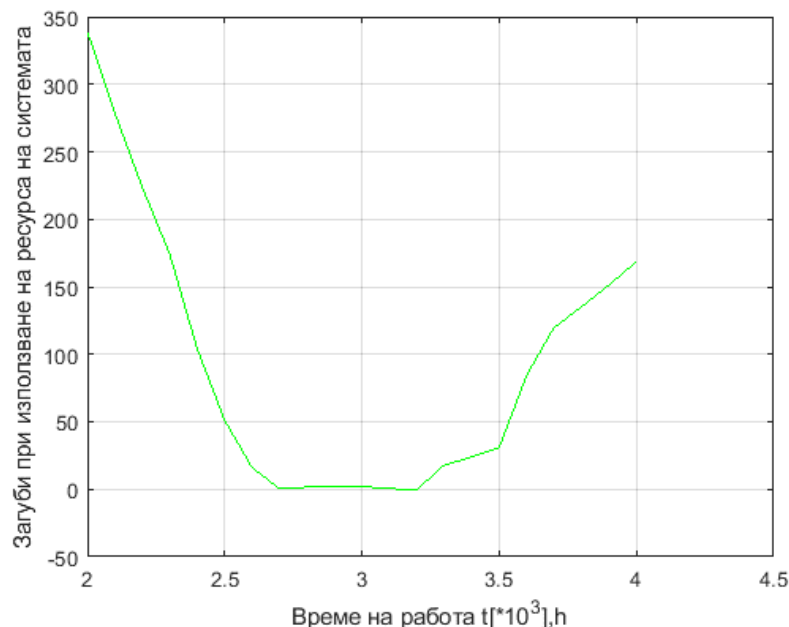
Фиг. 4.13. Загуби от непълното или прекомерното използване на техническия ресурс на системата

Резултатите получени от програмата за определяне на оптималния брой и моменти за извършване на диагностика са показани на фиг. 4.14. Вижда се, че в оптималният брой на диагностичните процеси в интервала от време от 2000 до 4000 часа е $N_{opt} = 5$. Стойността на математическото очакване на загубите при извършване на оптимален брой диагностични процеси е над 7 пъти по-малка от математическото очакване на загубите при липса на диагностика.



Фиг. 4.14. Резултати за оптималните брой и моменти за извършване на диагностика

Изменението на загубите от непълното или прекомерното използване на техническия ресурс на системата, при прилагане на получения оптимален план за диагностика, е показано на фиг. 4.15.



Фиг. 4.15. Резултати за оптималните брой и моменти за извършване на диагностика

Разработените програми за определяне на броя и моментите от време за извършване на диагностични изпитвания на помпени агрегати са намерили практическо приложение при експлоатацията на този тип системи.

4.3. Изводи към ЧЕТВЪРТА ГЛАВА

1. Класифицирани са съвременните подходи за анализ и прогнозиране на надеждността на технически системи, които същевременно осигуряват възможности за оценка на безопасността и рисковете при експлоатацията на тези системи.

2. Чрез специализиран програмен продукт е разработен модел от типа дърво на отказите, който позволява анализирането и прогнозирането на надеждностните показатели на регулируеми електрозадвижвания. Моделът позволява определянето на надеждностните показатели на електрозадвижването по елементи, което осигурява възможност за оценка на различни топологии на изграждане на електрозадвижването, режими на работа и експлоатационни условия. Освен това е възможно определянето на групата коефициенти на важност, които оказват значително влияние при проектирането на встроените технически средства за диагностика и при разработката на оптимална програма за организация на диагностичните процеси.

3. Разработена е серия от алгоритми за определяне на оптимални, от гледна точка на периодичността на провеждане на изпитванията, програми за диагностика. Разработените алгоритми позволяват оптимизиране на програмите за диагностика по критерии: поддържане на надеждностните показатели в определени граници и отчитане на икономическите показатели на експлоатационните разходи. Алгоритмите за оптимизиране на периодичността на диагностициране са приложими за нововъвеждащи се и намиращи се в експлоатация технически системи.

4. На основата на тези алгоритми са разработени компютърни програми, в софтуерната среда MATLAB R2019b, за определяне на оптималния момент от време за извършване на първа диагностика, както и за определяне на оптималните брой и моменти от време за извършване на последващите диагностични процеси.

5. С цел определяне на влиянието на изменението на надеждностните показатели върху подходите и програмите за диагностика е изследвана работата на тези алгоритми. Изведени са резултати свързващи статистическите характеристики за безотказност на електрообзавеждането и стратегиите за извършване на техническа диагностика на производствените системи.

6. Определени са оптималните периоди за диагностика на даден тип помпени агрегати. Показано е, че приложението на стратегия за прекъсната диагностика, с извършване на диагностични изпитвания, в получените оптимални моменти от време, води до намаляване на математическото очакване на загубите от непълно или прекомерно използване на ресурса на агрегатите с над 7 пъти.

7. Разработените компютърни програми намират приложение в практиката при експлоатацията на помпени агрегати от две дружества работещи в тази област.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

В дисертационният труд приносите могат да бъдат класифицирани като научно-приложни и приложни.

Научно-приложни приноси са:

1. Разработени са методика, алгоритъм и компютърна програма за обработка на термографски изображения на електрически съоръжения, целящи подобряване на визуалният им анализ.

2. Разработени са инженерна методика и компютърна програма за автоматизиране на процесите на обработка, анализ и класифициране на термографски изображения на базата на техники за машинно обучение.

3. Разработен е модел за описание на динамичните топлинни процеси в асинхронни двигатели при променливи условия на охлаждане.

4. Разработен е топлинен диагностичен модел за асинхронни двигатели, работещи в установен топлинен режим, целящ определянето на температурата на намотките на двигателя чрез резултатите от термовизионните изпитвания.

5. Разработена е серия от алгоритми и компютърни програми позволяващи оптимизиране на програмите за диагностика по критерии: поддържане на стойностите на надеждностните характеристики и отчитане на икономическите показатели на експлоатационните разходи.

Приложни приноси са:

1. Проведено е експериментално термовизионно изследване на електрообзавеждането на помпени агрегати, като са определени зависимостите на грешката в температурните измервания от стойностите на отделните параметри на измерване, зададени в настройките на термовизионната камера.

2. Изследвана е приложимостта и точността на двата типа модели за машинно обучение (kNN и SVM) при класифициране на техническото състояние на асинхронни двигатели и е показано, че SVM моделът е по-подходящ за класификацията на термовизионни изображения на асинхронни двигатели.

3. Изследвано е изменението на коефициентът на топлоотдаване чрез принудителна конвекция в зависимост от честотата на въртене на двигателя и е показано, че за честоти на въртене под 700 min⁻¹ се наблюдава рязко влошаване на условията на охлаждане на двигателя.

4. Проведена е обработка и анализ на термографски изображения на асинхронен двигател и чрез разработения топлинен диагностичен модел е определена температурата на намотките на двигателя.

5. Чрез специализиран програмен продукт TopEvent FTA е създаден модел от типа дърво на отказите, който позволява анализирането и прогнозирането на надеждностните показатели на регулируеми електрозадвижвания и осигурява възможност за оценка на различни топологии на изграждане на електрозадвижването, режими на работа и експлоатационни условия.

6. Чрез изследване на работата на разработените алгоритми за оптимизация на програмите за диагностика са изведени резултати, свързващи статистическите характеристики за безотказност на електрообзавеждането и стратегиите за извършване на техническа диагностика на производствените системи.

7. Разработените компютърни програми намират приложение в практиката при експлоатацията на помпени агрегати от две дружества работещи в тази област.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Lozanov Y., Tzvetkova, S., Processing of thermographic images, 2018 10th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), 2018, DOI: 10.1109/BULEF.2018.8646939, pp 1-6, ISBN: 978-1-5386-7565-6.

2. Lozanov, Y., Tzvetkova, S., Petleshkov, A., Influence of the measurement parameters in thermographic study of electrical equipment, 2018 10th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), 2018, DOI: 10.1109/BULEF.2018.8646940, pp 1-6, ISBN: 978-1-5386-7565-6.

3. Lozanov Y., Tzvetkova S., A methodology for processing of thermographic images for diagnostics of electrical equipment, 2019 11th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), DOI: 10.1109/BulEF48056.2019.9030699, pp 1-4, ISBN: 978-172812697-5.

4. Lozanov Y., Tzvetkova S., Petleshkov A., Faults in photovoltaic modules and possibilities for their detection by thermographic studies, 2019 11th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), ISBN: 978-172812697-5, DOI: 10.1109/BulEF48056.2019.9030795, pp 1-5, ISBN: 978-172812697-5.

5. Lozanov Y., Reliability assessment of variable speed induction motor drive with fault tree analysis, 2020 21st International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, SIELA 2020, DOI: 10.1109/SIELA49118.2020.9167095, pp 1-7, ISBN: 978-172814346-0.

6. Lozanov Y., Petleshkov A., Tzvetkova S., Capabilities for diagnostics of pump system's electrical equipment via frequency converters, 2020 21st International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, SIELA 2020, DOI: 10.1109/SIELA49118.2020.9167080, pp 1-5, ISBN: 978-172814346-0.

7. Lozanov Y., Tzvetkova S., Petleshkov A., Modeling of thermal transient processes in frequency-controlled induction motor, 2020 21st International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, SIELA 2020, DOI: 10.1109/SIELA49118.2020.9167160, pp 1-6, ISBN: 978-172814346-0.

8. Lozanov Y., Tzvetkova S., Petleshkov A., Use of machine learning techniques for classification of thermographic images, 2020 12th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), DOI: 10.1109/BulEF51036.2020.9326046, pp 1-4, ISBN:978-1-7281-9439-4.

9. Lozanov Y., Tzvetkova S., Petleshkov A., Determination of the periodicity for thermographic tests of the electrical equipment, 2021 17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), 2021, DOI: 10.1109/ELMA52514.2021.9502984, pp 1-3, ISBN:978-1-6654-3582-6.

10. Lozanov Y., Tzvetkova S., Petleshkov A., Thermal diagnostic model of induction motor operating in steady state mode, 2021 13th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), DOI: 10.1109/BulEF53491.2021.9690841, pp 1-6, ISBN:978-1-6654-4192-6.

Изказвам благодарност на научния си ръководител доц. д-р инж. Светлана Цветкова за осъществяването на този дисертационен труд. Благодаря също така на всички колеги от катедра “Електроснабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт” за помощта и съдействието, които са ми оказали.

TECHNICAL DIAGNOSTICS OF THE ELECTRICAL EQUIPMENT IN THE INDUSTRY

MSc. Eng. Yavor Yordanov Lozanov

Summary: The first chapter of the thesis presents a study and analysis of the achievements in the field of technical diagnostics. The purpose of the dissertation is formulated and the tasks to be performed are set. Chapter two is devoted to the issues related to the thermal imaging diagnostics of the electrical equipment and the increase in its reliability. A classification of the factors influencing the results of the thermal imaging measurements has been made. The influence of the measurement parameters on the measurement accuracy is studied. A methodology, algorithm, and computer program for processing thermographic images of electrical equipment to improve their visual analysis have been developed. Chapter three aims the development of methodologies, algorithms, and programs that provide thermal imaging diagnostics of electrical equipment. A methodology and a computer program for automating the analysis and interpretation of thermographic images based on machine learning techniques have been developed. A model for describing the dynamic thermal processes in induction motors under variable cooling conditions has been developed. A thermal diagnostic model for induction motors operating in a steady-state thermal model has been developed. The aim of the model is to determine the temperature of the motor windings using the results of thermal imaging tests. The fourth chapter discusses the modeling of the reliability of electrical equipment using modern techniques. An algorithm and a program for determining the optimal periods for diagnostics of electrical equipment have been developed. The contributions of the thesis can be summarized as scientific-applied and applied.