



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

**Електротехнически факултет
Катедра "Електрически апарати"**

Маг. инж. Емил Петров Мечков

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЗАГРЯВАНЕТО НА СИЛОВИ МАСЛЕНИ
ТРАНСФОРМАТОРИ**

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: Електрически апарати

Научни ръководители: Проф. д-р Райна Ценева, Проф. д.т.н. Иван Ячев

СОФИЯ, 2020 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Електрически апарати“ към Електротехнически факултет на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 17.02.2020 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 29.06.2020 г. от 13:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.2-45 / 10.03.2020 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. Проф. д.т.н. Илиана Маринова – председател
2. Проф. д-р Райна Ценева – научен секретар
3. Проф. д-р Иван Миленов
4. Проф. д-р Бохос Апрахамян
5. Доц. д-р Петър Държанов

Рецензенти:

1. Проф. д.т.н. Илиана Маринова
2. Проф. д-р Иван Миленов

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Електротехнически факултет на ТУ-София, блок № 12, кабинет № 12222.

Дисертантът е задочен докторант към катедра „Електрически апарати“ на Електротехнически факултет. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора.

Автор: маг. инж. Емил Петров Мечков

Заглавие: Изследване на загряването на силови маслени трансформатори

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Трансформаторите заемат важен дял в капиталовите инвестиции на електроенергийните системи, което означава, че прекъсвания, поради повредата им, имат значително икономическо въздействие върху функционирането на електроенергийните системи. Максималната температура във вътрешността на трансформатора е важен параметър, влияещ на работата и продължителността на експлоатацията му. От гледна точка на потребителя, температурата в трансформатора е важна за определянето на възможното претоварване и за оценка въздействието на работата при различни температури върху експлоатационния му срок. За конструкторите на трансформатори, прогнозирането на температурата в различни точки се изисква от повишената конкуренция на пазара.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Целта на дисертационната работа е да се изследва, чрез компютърно моделиране и експериментално, загряването в силови маслени трансформатори.

За постигане на целта са изпълнени следните задачи:

1. Създаване на триизмерен модел с помощта на софтуерния 3D-CAD продукт Solid Edge на трансформатор 160 kVA.
 - а. На активната част.
 - б. На активната част с казана.
2. Създаване на триизмерен модел с помощта на софтуерния 3D-CAD продукт Solid Edge на трансформатор 630 kVA.
 - а. На активната част.
 - б. На активната част с казана.
3. Решаване на линейна електромагнитна задача – за моделите на активната част без и с казана и за двата трансформатора.
4. Решаване на нелинейна електромагнитна задача – за моделите на активната част без и с казана за трансформатор 160 kVA.
5. Решаване на смесена задача топлинно поле-механика на флуидите – за модела на активната част с казана за трансформатор 160 kVA.
6. Експериментални изследвания:

- а. Измерване на загубите на празен ход и под товар.
- б. Измерване на прегряването на маслото в горния слой по метода на късо съединение.
- в. Определяне на средното прегряване на намотката по метода на късо съединение.
- г. Определяне на температурата в най-горещото място.
- д. Заснемане с термовизионна камера.
7. Сравнение между резултатите получени от компютърното моделиране и експериментално получените.

Като числен метод за решаване на поставените задачи е използван метода с крайни елементи. При измерване на температурата са използвани контактни и безконтактни методи.

Научна новост

Разработени са компютърни модели за решаване на задачи за анализ на тримерно електромагнитно и топлинно поле на силови маслени трансформатори чрез метода с крайни елементи и готов програмен продукт.

Практическа приложимост

Създадените компютърни модели са внедрени в процесите на проектиране и развойна дейност в завода за производство на трансформатори „Елпром Трафо СН“ АД, гр. Кюстендил.

Апробация

Основните резултати от дисертационния труд са докладвани на национални и международни конференции и са публикувани в периодични издания:

- Materials Science Forum, ISSN: 0255-5476, Vol. 856;
- Годишник на Технически Университет – София, ISSN 1311-0829, т. 66, кн. 1, 2016; т. 67, кн. 1, 2017; т. 68, кн. 1, 2018;
- 2016 19th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA);
- 2017 15-th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA);
- 2018 International Conference on High Technology for Sustainable Development (HiTech).

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в седем научни статии, от които една самостоятелна и шест в колектив с други автори. Пет от статиите са на английски език, другите две на български. Четири от публикациите са на международни конференции, индексирани по Scopus, и три в Годишника на Технически Университет - София.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 143 страници, като включва въведение, 6 глави за решаване на формулираните основни задачи, заключение, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 111 литературни източници, като 94 са на латиница и 17 на кирилица. Работата включва общо 67 фигури и 14 таблици. Номерата на уравненията, фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. ПРЕГЛЕД НА ИНФОРМАЦИОННИТЕ ИЗТОЧНИЦИ. ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИЯТА

1.1. Област на приложение и класификация на трансформаторите.

Трансформаторът е статично електромагнитно устройство, което има две и повече индуктивно свързани намотки, предназначено за преобразуване чрез електромагнитна индукция на една или няколко променливотокови системи в една или няколко други системи с други стойности на напрежението и тока.

Разгледани са основните класификации на трансформаторите: в зависимост от тяхното предназначение; според вида на магнитопровода; по отношение на броя на намотките; според вида на магнитната система; според начина на охлаждането.

Независимо от голямото разнообразие на видовете трансформатори основните електромагнитни и топлинни процеси в тях са еднакви.

1.2. Режими на работа на трансформаторите.

Работният процес се изразява чрез трите основни режима, в които се намира даден трансформатор: 1) празен ход, 2) късо съединение, 3) работа при натоварване.

От опита на празен ход се определят стойностите на следните важни величини за трансформатора: коефициент на трансформация, намагнитващ ток, загуби на празен ход (в стоманата).

Ако късото съединение се създава при понижено първично напрежение, то може да се използва, както и празният ход за изследване на трансформатора. Затова се извършва опит на късо съединение, чрез който се определят редица важни параметри на един трансформатор. От него се определят: напрежение на късо съединение и загуби на късо съединение.

Състоянието на натоварване може да се разглежда като резултат от наслаgването на работните състояния на празен ход и на късо съединение.

1.3. Изпитвания на трансформаторите.

Изпитванията, на които трябва да бъдат подложени трансформаторите са посочени подробно в *БДС EN 60076-1:2011 - Силови трансформатори. Част 1: Общи положения* и най-общо включват: контролни (рутинни) изпитвания, типови изпитвания, специални изпитвания.

Прегряването на трансформатора е важен параметър при проектирането и изпитването, определящ неговите характеристики. Съгласно *БДС EN 60076-2:2011 - Силови трансформатори. Част 2: Прегряване на трансформатори*,

потопени в течност, и по практични причини, стандартния метод за определяне на прегряванията в установен режим на изпитвателната площадка, е еквивалентното изпитване при свързване на късо като едно от типовите изпитвания на трансформаторите.

По време на това изпитване трансформаторът не е подложен едновременно на обявеното напрежение и обявения ток, а на изчислените общи загуби, получени преди това чрез две отделни определяния на загубите, наименувани загуби при товар при референтна температура и загуби при празен ход.

Целта на изпитването е да се установи: прегряването в горните слоеве и средното на маслото в установен режим с разсейване на общите загуби; средното прегряване на намотките при обявен ток за средното прегряване на маслото; прегряване на намотките в най-горещата точка при обявен ток и за прегряването в горните слоеве на маслото.

Това се постига в две стъпки на изпитване: инжектиране (прокарване) на общите загуби - изпитването продължава, докато се постигне установено състояние на температурата на маслото; инжектиране (прокарване) на обявения ток - изпитването продължава с изпитвателен ток, намален до обявения ток за 1 h.

1.4. Източници на топлина в трансформаторите.

Източниците на топлина в трансформаторите основно са: загуби в проводниците и загуби в магнитопроводите.

Загубите в проводниците са едни от най-важните източници на топлина. Те се определят от закона на Джаул. При променлив ток, поради повърхностния ефект и ефекта близост се получават допълнителни загуби.

При синусоидален поток и шихтован от листов електротехническа стомана магнитопровод загубите се дължат на циклично пренамагнитване на материала (загуби от хистерезис) и поява на вихрови токове (токове на Фуко). Променливите магнитни полета около тоководещите контури на силовите трансформатори и разсеяните потоци на магнитопроводите създават загуби и във феромагнитни и неферомагнитни конструктивни елементи, като медни, месингови или бронзови болтове, гайки, шайби и др., и могат да повишат температурата до недопустими стойности.

1.5. Охладителни системи на трансформаторите.

Методите за охлаждане на трансформаторите са дефинирани *БДС EN 60076-2:2011 - Силови трансформатори. Част 2: Прегряване на трансформатори, потопени в течност*.

В зависимост от мощността на трансформаторите се използват различни казани: казани с гладки стени (без допълнителни охлаждателни устройства); казани с вълниста повърхност, при които стените са от тънка стоманена ламарина надиплена на вълни; казани с отделни охлаждателни радиатори.

1.6. Основи на топлопrenaсянето в трансформатори.

Най-общо казано, топлопrenaсянето в трансформаторите, става чрез топлопроводимост и конвекция, подпомагана от лъчение.

1.7. Топлинни процеси в трансформаторите.

Разгледани са топлинните процеси в трансформаторите при установен режим.

Топлината, породена от загубите в алуминия (медта) и стоманата, се отдава по различни пътища до външната охлаждаща повърхност. При маслени трансформатори топлината се отвежда през маслото и се предава на казана, а оттам във въздуха (само незначителна част се предава чрез топлопроводимост на казана). Поради загряването на маслото от активния материал и охлаждането му от повърхността на казана в маслото се предизвиква циркулация, която е необходима за бързото пrenaсяне на топлината от източника ѝ към охлаждащата повърхност.

1.8. Смесена задача електромагнитно-топлинно поле.

Разгледано е влиянието между електромагнитното и топлинното поле, както и методите за решаване на смесената задача – директен и индиректен.

В много от анализираниите литературни източници по темата е направен анализ на температурно зависимите характеристики на силов маслен трансформатор посредством решаването на смесената задача електромагнитно-топлинно поле. Решавайки електромагнитната задача са получени загубите, които зависят от температурата. След това тези загуби са използвани като входна информация при определянето на температурното прегряване.

В други са решени енергийните уравнения и уравненията на Навие-Стокс с помощта на числения метод с крайни разлики. За да се определят загубите в намотките и магнетопровода е използвана смесената задача топлинно поле – динамика на флуидите – електромагнитно поле.

1.9. Експериментални методи за измерване и изследване на температурите в трансформатора.

1) Контактни методи.

При контактните методи обмяната на енергия между средата и термометричното вещество става чрез топлопроводимост.

Термодвойка тип К се препоръчва за повечето приложения с общо предназначение. Тя предлага широк температурен обхват, ниска стандартна грешка и има добра корозионна устойчивост. Всъщност много цифрови мултиметри могат да измерват температура чрез присъединяването на термодвойка от К тип със стандартен конектор.

Чрез прилагането на *фиброоптични сензори* за измерване на вътрешната температура на трансформатора, може директно да се получи истинската

стойност с висока точност, стабилност и преодоляване на недостатъците на традиционните електрически сензори. Този метод не е практичен за прилагане в съществуващи трансформатори, и освен това създава трудности при обосноваването на допълнителни разходи, което ограничава използването му и в нови трансформатори.

2) Безконтактни методи.

При безконтактните методи обмяната на енергия между средата и термометричното вещество става чрез радиация и топлинно излъчване.

Инфракчервените лъчи, които се излъчват от всички тела в природата, могат да бъдат уловени и измерени от инфрачервените измервателни *термографски камери* с цел да бъде установена температурата, излъчвана от тези тела. Инфрачервената светлина може да се използва за откриване наличието на прекомерно загряване или охлаждане в част на машина, апарат или химична реакция. Технологиите на инфрачервените камери напредва бързо, с по-голяма производителност, в по-малки корпуси, на по-ниска цена, която позволява използването им в много нови приложения. Има три основни предимства, които правят използването на термографията полезно: безконтактно измерване, двумерна е, използва се в реално време. Ограничения и недостатъци: Качествените камери с висока разделителна способност имат много висока цена; трудно могат да се интерпретират точно картини, които са на обекти с непостоянни температури, въпреки че проблемът е редуциран с активно топлинно визуализиране.

1.10. Анализ на резултатите от литературния обзор на проблема.

- Трансформаторите са важна част от функционирането, надеждността и капиталовите разходи на електроенергийните системи.
- Чрез използване на познатите експерименталните методи за определяне на температурите на трансформатора може да бъде проверена верността на изчислителните методи и реалните стойности, единствено при произвеждане на опитен образец.

Недостатък на използване на експерименталните методи в развойната дейност са необходимостта от влагане на много средства за опитни образци и бавното и трудно оптимизиране на параметрите.

- Начин за преодоляване на тези сериозни недостатъци е използването на триизмерни модели, които да се решават с помощта на софтуерни пакети, работещи по метода с крайните елементи.

В настоящата дисертационна работа ще бъде използвани програмните продукти Ansys® и Comsol®.

1.11. Цел и задачи на дисертационната работа.

В този раздел са изложени целта и задачите на дисертацията.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧНИ МОДЕЛИ И ИЗПОЛЗВАНИ ЧИСЛЕНИ МЕТОДИ

2.1. Електромагнитно поле в трансформаторите.

Електромагнитното поле на силовите трансформатори се описва с опростената система уравнения, дадена в литературата за квазистационарно електромагнитно поле.

2.2. Топлинно поле в трансформаторите.

При моделиране на топлинното поле в трансформаторите, решавайки задачата за установен топлинен анализ е използвано уравнението на Поасон, а при преходен топлинен анализ – това на топлопроводимостта. При свързано топлопренасяне математическия модел за определяне на разпределението на температурата в трансформатора се описва с уравненията на Навие-Стокс, на непрекъснатостта и на топлопроводимостта.

2.3. Числени методи.

Основните методи за анализ на полета са: Метод с крайни разлики, Метод с крайни елементи и Метод с гранични интегрални уравнения.

Основните характеристики на Метода с крайните елементи са:

- Структурата на модела съответства на структурата на физическата задача;
- Могат да бъдат изследвани области с произволна геометрия;
- Методът е приложим за решаване на нелинейни задачи;
- Извършва се дискретизация на цялата изследвана област;
- Методът води до решаване (един или повече пъти) на система линейни алгебрични уравнения от висок порядък, която е разреждана.
- Методът е подходящ за решаване на смесени задачи.

Поради това в настоящият дисертационен труд е избран Метода с крайни елементи.

ГЛАВА 3. МОДЕЛИРАНЕ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНО ПОЛЕ

3.1. Въведение.

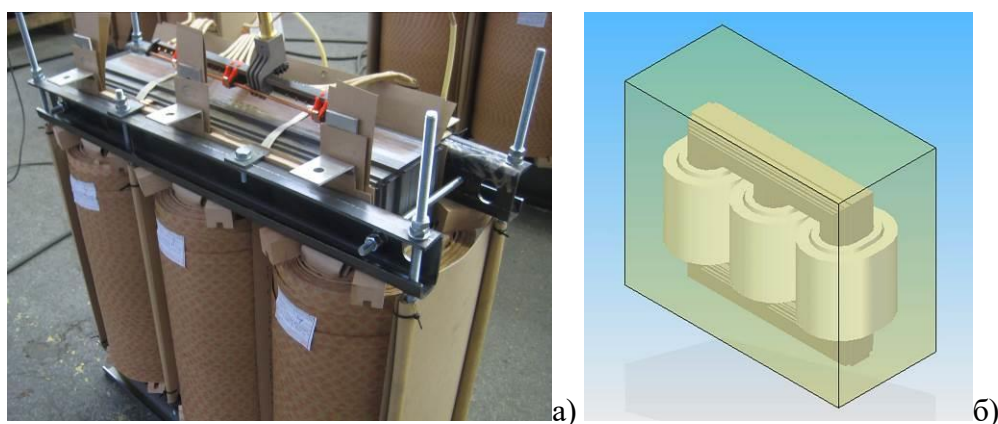
Моделирането на електромагнитното поле е необходимо, за да може да бъде получено разпределението на полето със стойности на магнитната индукция, а също така да бъдат изчислени и Джауловите загуби. С цел оценяване влиянието на казана са изследвани два варианта на моделите – без и с казан. Моделите представени в тази глава са създадени чрез използването на метода с крайни елементи и готовия програмен продукт Ansys®. Изследванията са проведени при режим на номинално натоварване.

3.2. Линейна електромагнитна задача.

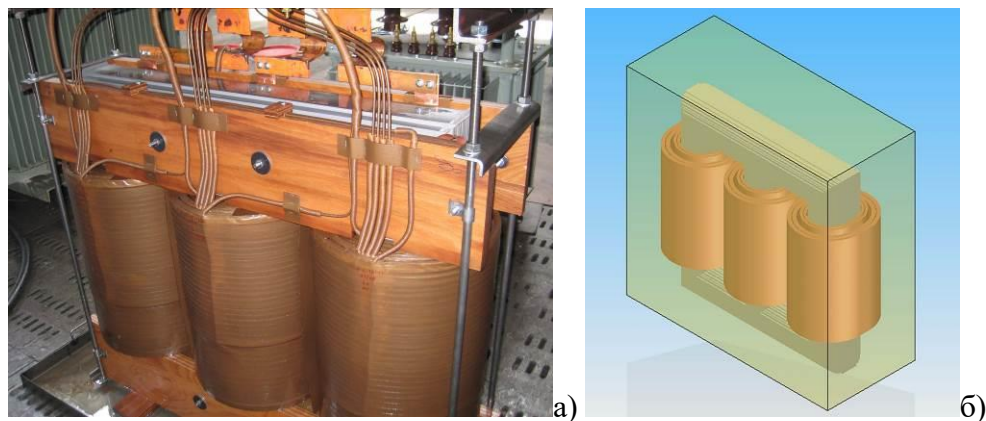
1) Описание на изследването.

Обекти на изследването са маслени разпределителни трансформатори с обявена мощност 160 kVA, коефициент на трансформация 10/0,4 kV и група на свързване $Y_{un}0$, и 630 kVA, коефициент на трансформация 20/0,4 kV и група на свързване $D_{un}5$, производство на „Елпром Трафо СН“ АД, гр. Кюстендил, България.

За създаване на триизмерната геометрия на гореспоменатите трансформатори е използван CAD софтуера Solid Edge (фиг. 3.1 и фиг. 3.2), която е импортирана в Ansys® от файл с разширение .sat. За моделиране на електромагнитното поле на активната част са взети реалните размери на изделията с някои опростения, които не влияят на изследването.



Фиг. 3.1. Геометрия на активната част на реалния трансформатор 160 kVA (а) и създадена в Solid Edge (б).



Фиг. 3.2. Геометрия на активната част на реалния трансформатор 630 kVA (а) и създадена в Solid Edge (б).

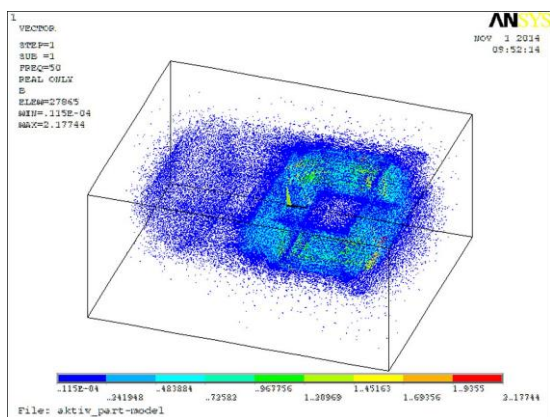
На съответните обеми са присвоени материали с характеристиките дадени в дисертацията. При определяне на свойствата на материала на магнитопровода са зададени стойностите за относителната магнитна проницаемост, определящи анизотропията.

Генерирана е мрежата от крайни елементи. Зададен е хармоничен анализ с комплексно (с реална и имагинерна част) визуализиране на резултатите при

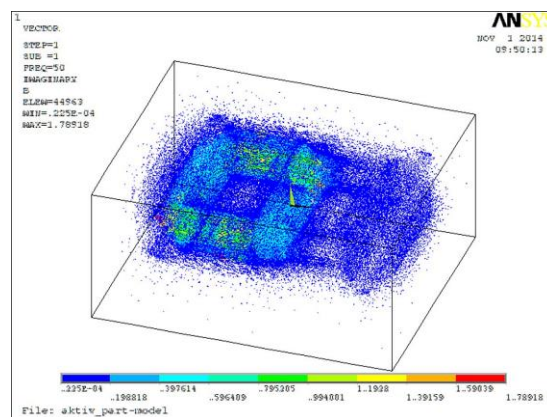
честота 50 Hz. Като източник на полето са зададени токовете плътности за всяка намотка, от първичната страна 1099018 A/m^2 и от вторичната страна 1720070 A/m^2 за трансформатор 160 kVA и съответно 1914795 A/m^2 и 2571973 A/m^2 за трансформатор 630 kVA, дефазирани на 120° между отделните фази. Като гранични условия са зададени условия за успоредност на магнитния поток спрямо границата на областта.

2) Резултати.

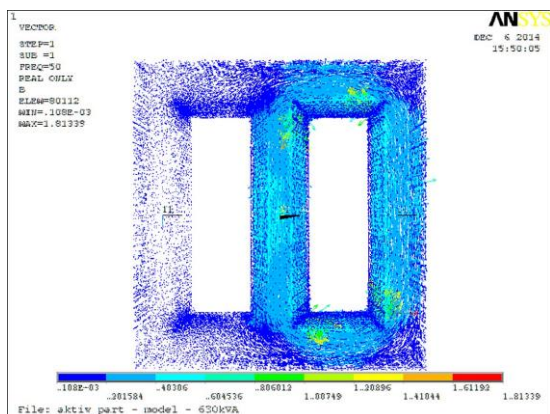
Получени са следните резултати:



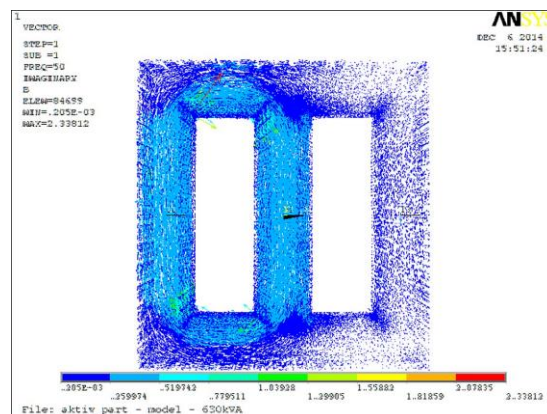
Фиг. 3.6. Разпределение на електромагнитното поле в определен момент от времето с реални стойности на магнитната индукция (T) за модела без казан за трансформатор 160 kVA.



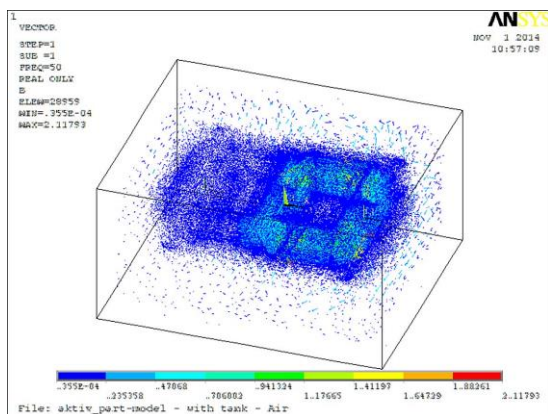
Фиг. 3.7. Разпределение на електромагнитното поле в определен момент от времето с имагинерни стойности на магнитната индукция (T) за модела без казан за трансформатор 160 kVA.



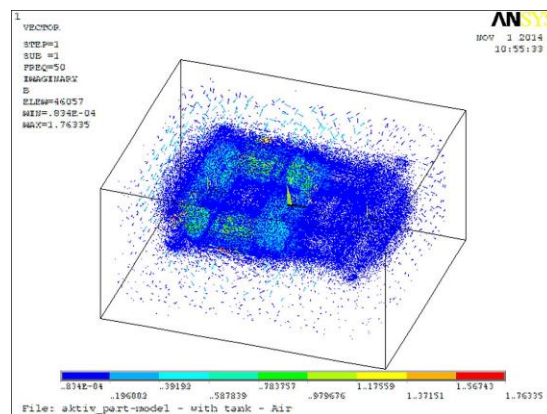
Фиг. 3.8. Разпределение на електромагнитното поле в определен момент от времето с реални стойности на магнитната индукция (T) за модела без казан за трансформатор 630 kVA.



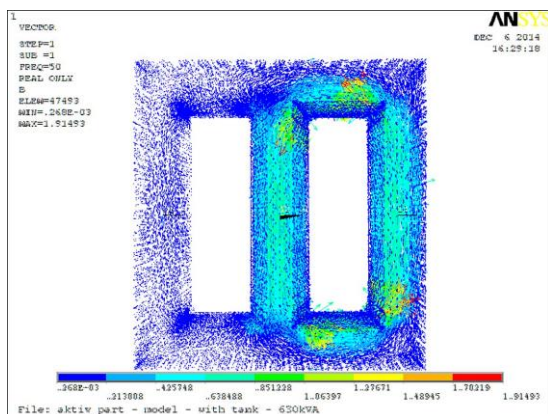
Фиг. 3.9. Разпределение на електромагнитното поле в определен момент от времето с имагинерни стойности на магнитната индукция (T) за модела без казан за трансформатор 630 kVA.



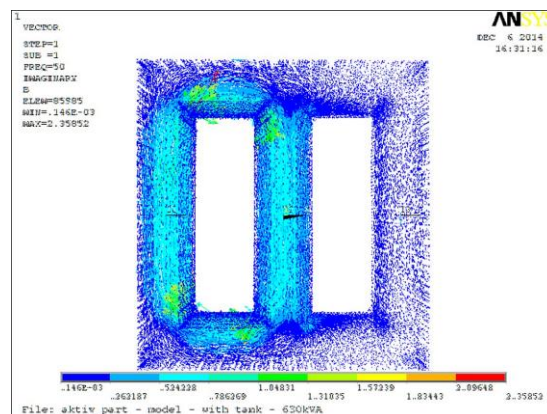
Фиг. 3.10. Разпределение на електромагнитното поле в определен момент от времето с реални стойности на магнитната индукция (T) за модела с казан за трансформатор 160 kVA.



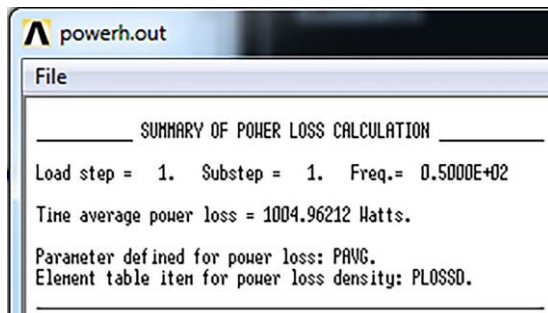
Фиг. 3.11. Разпределение на електромагнитното поле в определен момент от времето с имагинерни стойности на магнитната индукция (T) за модела с казан за трансформатор 160 kVA.



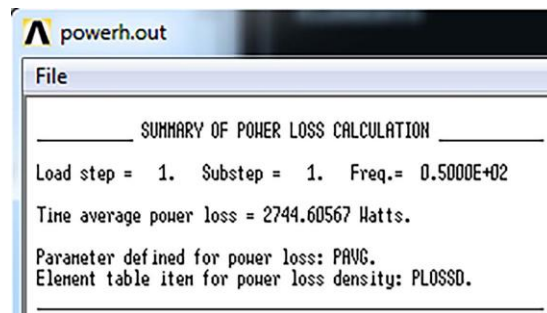
Фиг. 3.12. Разпределение на електромагнитното поле в определен момент от времето с реални стойности на магнитната индукция (T) за модела с казан за трансформатор 630 kVA.



Фиг. 3.13. Разпределение на електромагнитното поле в определен момент от времето с имагинерни стойности на магнитната индукция (T) за модела с казан за трансформатор 630 kVA.



Фиг. 3.14. Разпечатка от резултатите получени в Ansys® за Джауловите загуби (W) за трансформатор 160 kVA.



Фиг. 3.15. Разпечатка от резултатите получени в Ansys® за Джауловите загуби (W) за трансформатор 630 kVA.

- Разпределение на полето на активната част на маслените разпределителни трансформатори в определен момент от времето с реална и имагинерна стойности на магнитната индукция за двата варианта на модела – без казан (фиг. 3.6, фиг. 3.7, фиг. 3.8 и фиг. 3.9) и с казан (фиг. 3.10, фиг. 3.11, фиг. 3.12 и фиг. 3.13);

- Числени стойности за Джауловите загуби, еднакви за двата варианта на моделите (фиг. 3.14 и фиг. 3.15);

3.3. Нелинейна електромагнитна задача.

1) Описание на изследването.

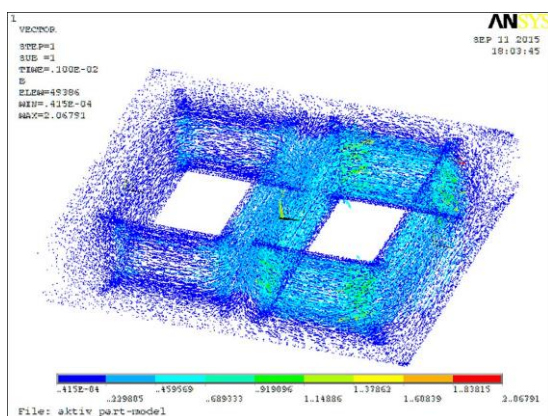
Обект на изследването е маслен разпределителен трансформатор с обявена мощност 160 kVA, коефициент на трансформация 10/0,4 kV и група на свързване Yyn0, производство на „Елпром Трафо СН“ АД, гр. Кюстендил, България (същият като описаният в т. 3.2 1).

Използвана е вече създадената триизмерна геометрия показана на фиг. 3.1. На съответните обеми са присвоени материали с характеристиките дадени в дисертацията. При дефиниране на характеристиките на материала за магнитопровода е зададена В-Н кривата на силициевата ламарина.

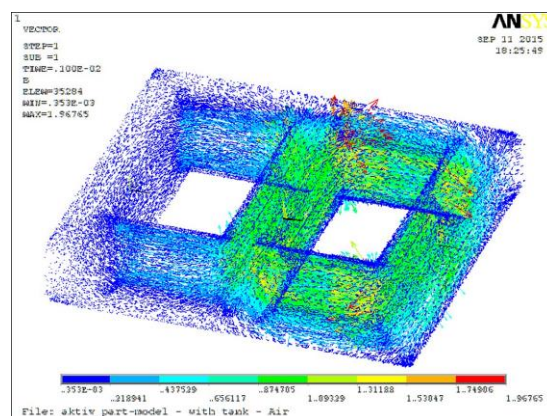
Генерирана е мрежата от крайни елементи. Зададен е преходен анализ за един цикъл и двадесет времеви стъпки в цикъла при честота 50 Hz. Като източник на полето са зададени токовете плътности за всяка намотка, от първичната страна 1099018 A/m^2 и от вторичната страна 1720070 A/m^2 , дефазирани на 120° между отделните фази. Като гранични условия са зададени условия за успоредност на магнитния поток спрямо границата на областта.

2) Резултати.

Получени са следните резултати:



Фиг. 3.18. Разпределение на електромагнитното поле в определен момент от времето със стойности на магнитната индукция (Т) за модела без казан.



Фиг. 3.19. Разпределение на електромагнитното поле в определен момент от времето със стойности на магнитната индукция (Т) за модела с казан.

- Разпределение на полето на активната част на масления разпределителен трансформатор в определен момент от времето със стойности на магнитната индукция за двата варианта на модела – без казан (фиг. 3.18) и с казан (фиг. 3.19);

3.4. Изводи.

Чрез разработените триизмерни компютърни модели за анализ на електромагнитното поле на трансформатори на основата на CAD система с общо предназначение и готов програмен продукт по метода с крайни елементи е решена линейната и нелинейна електромагнитна задача. Получени са разпределението на електромагнитното поле с максимална индукция до 2 Т и Джауловите загуби – 1005 W (за трансформатор с мощност 160 kVA) и 2745 W (за трансформатор с мощност 630 kVA), които могат да се използват като източници на топлина при дефиниране на топлинната задача.

При сравняване разпределението на електромагнитното поле за двата варианта на моделите – без казан и с казан – се вижда, че наличието на казан в близост до активната част на трансформаторите, не влияе на стойностите на магнитната индукция.

ГЛАВА 4. МОДЕЛИРАНЕ НА ТОПЛИННО ПОЛЕ

4.1. Въведение.

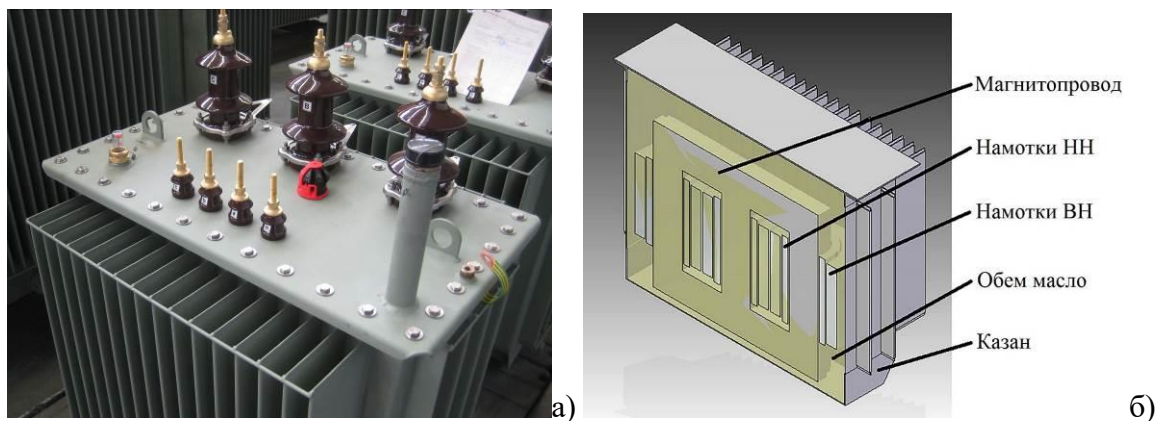
В настоящата глава е използван методът с крайни елементи за числено решаване на поставената задача. Изследванията са проведени при режим на номинално натоварване.

4.2. Установен топлинен анализ.

1) Описание на изследването.

Обект на изследването е маслен разпределителен трансформатор с обявена мощност 160 kVA, коефициент на трансформация 10/0,4 kV и група на свързване Yyn0, производство на „Елпром Трафо СН“ АД, гр. Кюстендил, България (същият като описаният в т. 3.2 1)).

За създаване на триизмерната геометрия на гореспоменатия трансформатор е използван CAD софтуера Solid Edge, която е импортирана в Ansys® от файл с разширение .sat. Структурата на компонентите на трансформатора е доста сложна, поради което след направени допускания, може да бъде прието, че той е съставен от пет основни компонента: магнитопровод, намотки НН, намотки ВН, обем на маслото и казан. Геометрията на тези компоненти, създадени за модела съвпада напълно с реалната геометрия. Фиг. 4.1 представя геометрията на трансформатора.



Фиг. 4.1. Геометрия на реалния трансформатор 160 kVA (а) и създадена в Solid Edge (б).

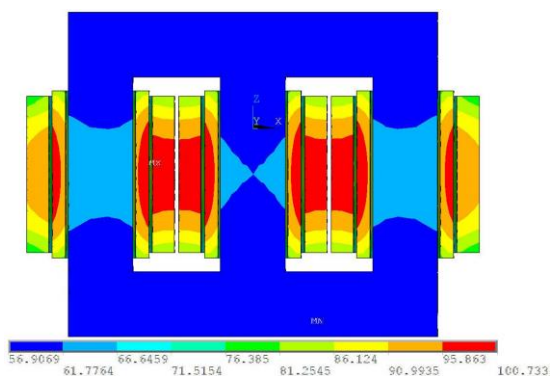
На съответните компоненти от геометрията на трансформатора са присвоени материали с характеристиките дадени в дисертацията.

Казанът на този трансформатор е херметичен с вълниста повърхност, произведен от студено валцована стоманена ламарина тип DC01, която спада към стоманите за студена обработка. Методът на охлаждане е ONAN (Естествен термосифонен поток на маслото като вътрешна охлаждателна среда и естествена конвекция на въздуха като външна охлаждателна среда). Трансформаторното масло е минерално инхибирано.

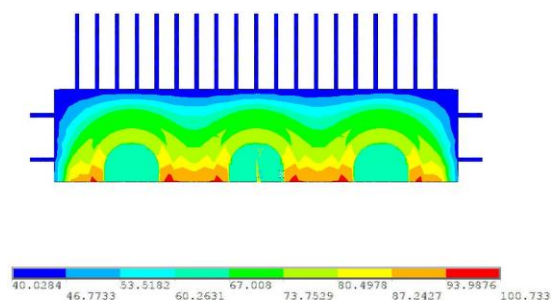
За изследване разпределението на температурата, в резултат от генерирането на топлина в намотките и магнитопровода, е създаден компютърен модел на масления разпределителен трансформатор на базата на МКЕ и е решена топлинната задача за установен режим.

Пренебрегнати са ефектите от генериране на топлина поради вихрови токове и в механични части като греди, болтове, казан и капак. Цифровата симулация на топлопренасянето е направена със софтуера Ansys®. Използваните гранични условия са посочени в Глава 2.

2) Резултати.



Фиг. 4.5. Разпределение на температурата (°C) в централното сечение на трансформатора.



Фиг. 4.6. Разпределение на температурата (°C) в хоризонталното сечение на трансформатора.

Фиг. 4.5 – разпределението на температурата ($^{\circ}\text{C}$) в централното сечение на трансформатора и фиг. 4.6 – разпределението на температурата ($^{\circ}\text{C}$) в хоризонталното сечение на трансформатора.

4.3. Преходен топлинен анализ.

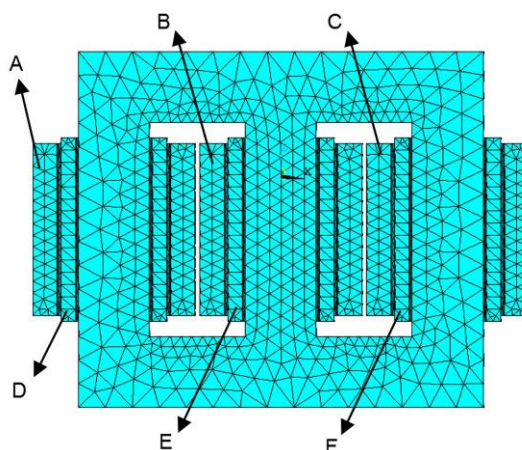
1) Описание на изследването.

Обект на изследването е маслен разпределителен трансформатор с обявена мощност 160 kVA, коефициент на трансформация 10/0,4 kV и група на свързване $Y_{un}0$, производство на „Елпром Трафо СН“ АД, гр. Кюстендил, България (същият като описаният в т. 4.2 1).

Използвана е вече създадената триизмерна геометрия описана в т. 4.2 1), която е импортирана в Ansys® от файл с разширение .sat.

Численото решение на преходния топлинен процес е извършено със софтуера Ansys®.

За улеснение при представяне на резултатите са възприети условни означения за някои от компонентите на трансформатора: А – намотка ВН, фаза А; В – намотка ВН, фаза В; С – намотка ВН, фаза С; D – намотка НН, фаза А; Е – намотка НН, фаза В; F – намотка НН, фаза С (фиг. 4.8).



Фиг. 4.8. Условни означения.

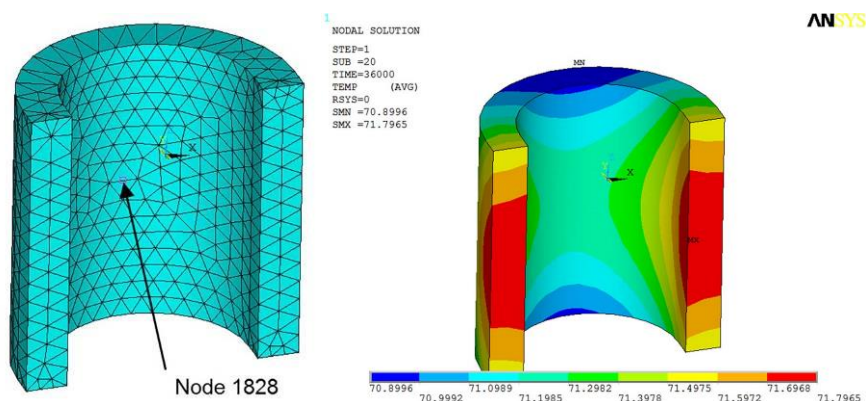
Зададен е преходен анализ. При дефиниране на модела са направени следните допускания: зададените материални характеристики са константи спрямо температурата; зададена е начална температура от 20°C на целия трансформатор.

Първоначално задачата е решена при задаване на 15 часа за преходния режим с отчитане на стойностите на температурата през 1 час. От резултатите се вижда, че установен режим се достига в края на 8 час. Поради тази причина задачата е решена повторно за 8 часа през 15 минути.

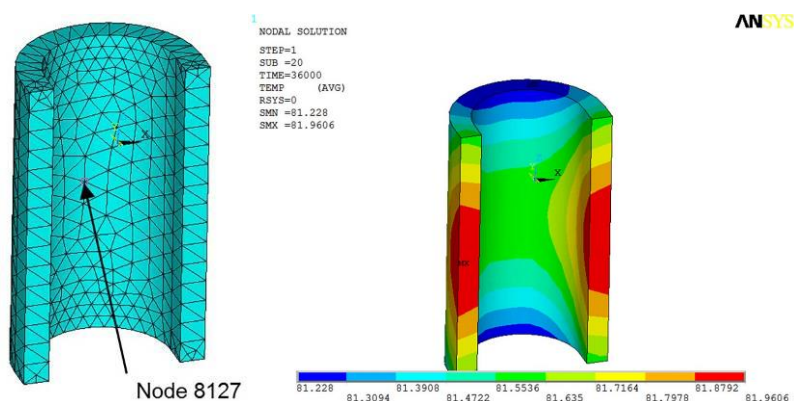
Използваните гранични условия са посочени в Глава 2.

2) Резултати.

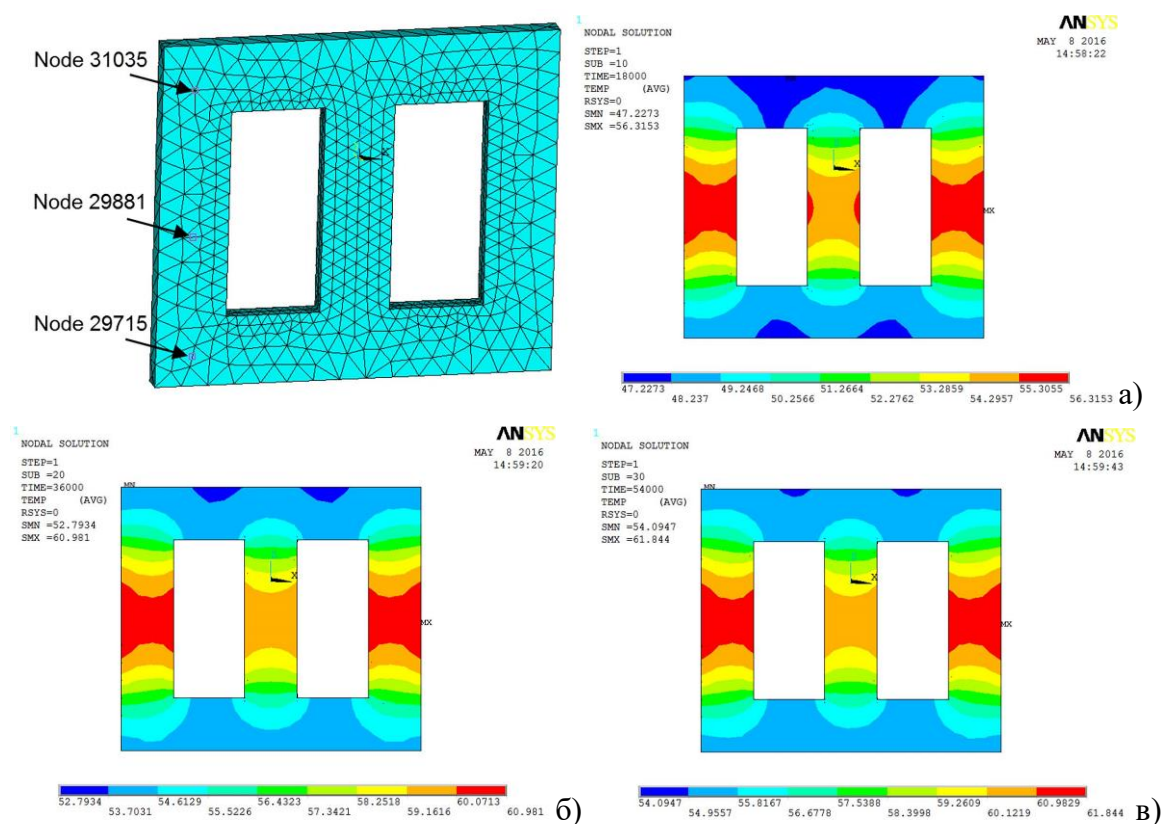
Получени са следните резултати:



Фиг. 4.9. Разпределение на температурата ($^{\circ}\text{C}$) в компонент В след 10 часа.



Фиг. 4.10. Разпределение на температурата ($^{\circ}\text{C}$) в компонент Е след 10 часа.



Фиг. 4.11. Разпределение на температурата ($^{\circ}\text{C}$) в обема на магнитопровода след 5 часа (а), след 10 часа (б) и след 15 часа (в).

- Отчетена е температурата във възел № 1828 от компонент В. Температурата във възлите от обема на В варира в границите $0,5 \div 1$ °C (фиг. 4.9);
- Отчетена е температурата във възел № 8127 от компонент Е. Температурата във възлите от обема на Е варира в границите $0,5 \div 1$ °C (фиг. 4.10);
- Отчетена е температурата във възли №№ 29715, 29881 и 31035 от обема на магнитопровода. Температурата тук варира в широки граници (фиг. 4.11);

4.4. Анализ чрез свързано топлопренасяне.

1) Описание на изследването.

Обект на изследването е маслен разпределителен трансформатор с обявена мощност 160 kVA, коефициент на трансформация 10/0,4 kV и група на свързване Yyn0, производство на „Елпром Трафо СН“ АД, гр. Кюстендил, България (същият като описаният в т. 4.2 1).

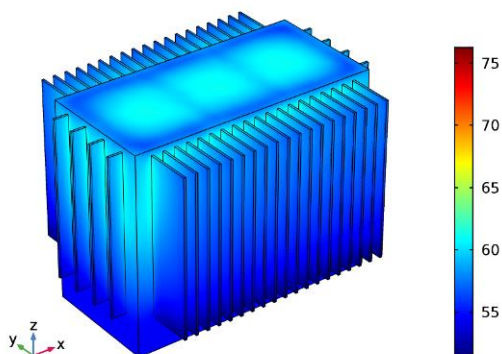
За създаване на триизмерната геометрия на гореспоменатия трансформатор е използвана графичната среда на софтуера Comsol®. Структурата на компонентите на трансформатора е доста сложна, поради което след направени допускания, може да бъде прието, че той е съставен от пет основни компонента: магнитопровод, намотка НН, намотка ВН, обем на маслото и казан. Геометрията на тези компоненти, създадени за модела съвпада напълно с реалната геометрия (фиг. 4.1).

На съответните компоненти са присвоени материали с характеристиките дадени в дисертацията. Трансформаторното масло има характеристики силно зависими от температурата, както е представено в дисертацията, където тази зависимост е най-силно изразена за динамичния вискозитет.

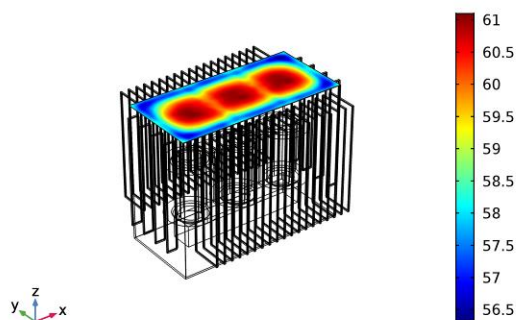
Пренебрегнати са ефектите от генериране на топлина поради вихрови токове и в механични части като греди, болтове, казан и капак. Като параметър е зададена околна температура $T_0 = 27,4$ °C (еднаква с тази от експерименталното изследване). Избран е анализ на топлинното поле чрез свързано топлопренасяне. Свързаното топлопренасяне отговаря на комбинацията от топлопренасяне в твърди тела и топлопренасяне във флуиди (в конкретния случай - ламинарен поток). За да се направи това свързване е избран неизотермен поток. Като източници на топлина са зададени обемните загуби за всеки един от компонентите на трансформатора.

Коефициента на конвекция по горната повърхност на казана на трансформатора е зададен да бъде константа и е равен на $50 \text{ W/m}^2\text{K}$, а по останалите повърхности е дефиниран чрез метода на критериалните уравнения на подобие.

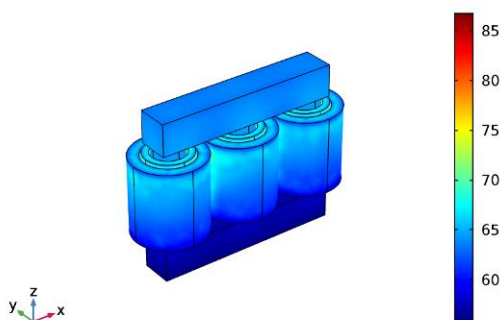
2) Резултати.



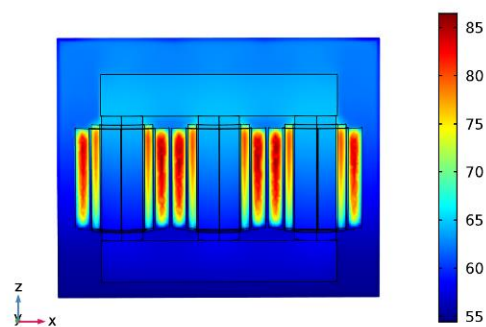
Фиг. 4.16. Разпределение на температурното поле ($^{\circ}\text{C}$) в казана и ребрата на трансформатора.



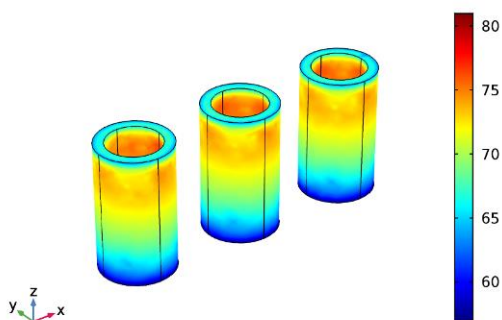
Фиг. 4.17. Разпределение на температурното поле ($^{\circ}\text{C}$) в горните слоеве на маслото при 3D изглед на трансформатора.



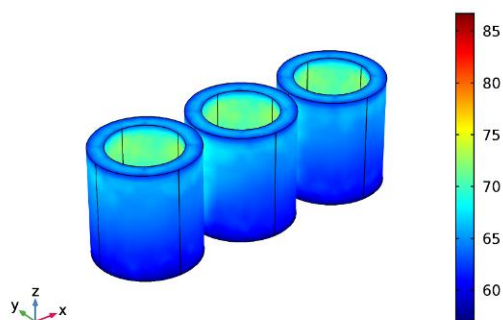
Фиг. 4.20. Разпределение на температурното поле ($^{\circ}\text{C}$) в намотките и магнитопровода на трансформатора при 3D изглед.



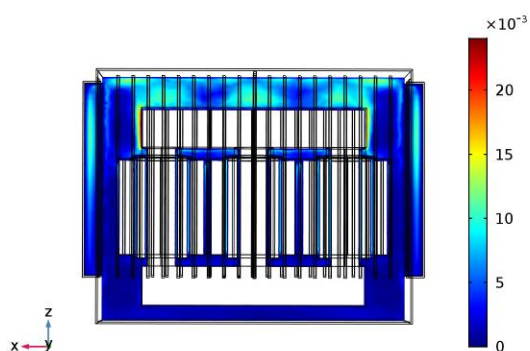
Фиг. 4.22. Разпределение на температурното поле ($^{\circ}\text{C}$) по сечение на трансформатора.



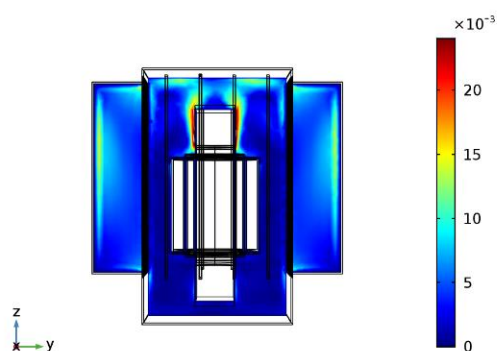
Фиг. 4.23. Разпределение на температурното поле ($^{\circ}\text{C}$) в намотки ниско напрежение.



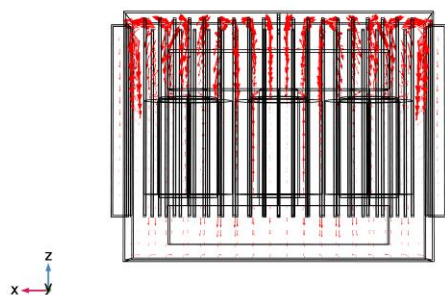
Фиг. 4.24. Разпределение на температурното поле ($^{\circ}\text{C}$) в намотки високо напрежение.



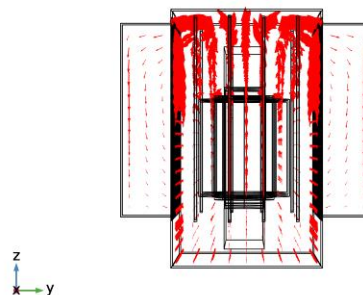
Фиг. 4.25. Разпределение на скоростното поле (m/s) на маслото в казана и ребрата по дългата страна на трансформатора.



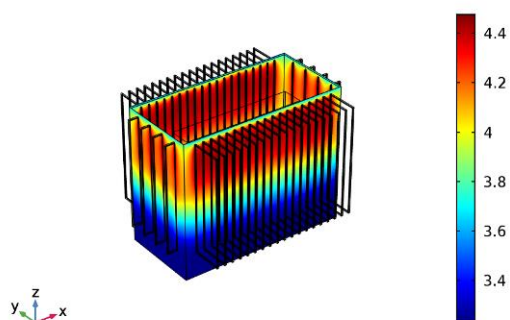
Фиг. 4.26. Разпределение на скоростното поле (m/s) на маслото в казана и ребрата по късата страна на трансформатора.



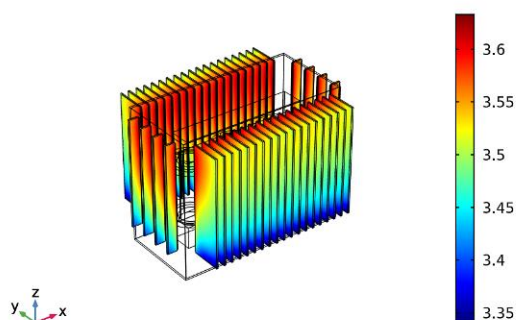
Фиг. 4.27. Изменение на скоростното поле на маслото в казана и ребрата по дългата страна на трансформатора.



Фиг. 4.28. Изменение на скоростното поле на маслото в казана и ребрата по късата страна на трансформатора.



Фиг. 4.29. Изменение на коефициента на конвекция ($W/m^2.K$) на страничните повърхности на казана на трансформатора.



Фиг. 4.30. Изменение на коефициента на конвекция ($W/m^2.K$) на ребрата на казана на трансформатора.

Фиг. 4.16 до фиг. 4.24 показват разпределението на температурното поле ($^{\circ}C$), фиг. 4.25 до фиг. 4.28 – скоростното поле на маслото (m/s) и фиг. 4.29 и фиг. 4.30 – изменението на коефициентите на конвекция ($W/m^2.K$).

4.5. Изводи.

Разработени са компютърни модели за решаване на задачи за анализ на тримерно топлинно поле на трансформатори чрез метода с крайни елементи и готов програмен продукт при установен режим, при преходен режим и чрез свързано топлопренасяне.

От проведеното компютърно моделиране на топлинното поле на маслен трансформатор 160 kVA са получени резултати за температурите на компонентите в характерни точки от конструкцията. Определени са топлинните времеконстанти на намотките и магнитопровода.

Създадените компютърни модели са внедрени в процесите на проектиране и развойна дейност в завода за производство на трансформатори „Елпром Трафо СН“ АД, гр. Кюстендил.

ГЛАВА 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

5.1. Въведение.

В настоящата глава е описано изследване, за което е избран методът с изпитване при свързване на късо за двунамотъчни трансформатори.

5.2. Избор на инструменти за измерване на температурата.

Основавайки се на направения литературен обзор, както и на проучване на пазара, за директно измерване на температурата са избрани термодвойки тип К. Като безконтактен метод е предпочетен термовизионният метод с използването на термографска инфрачервена камера FLIR P640.

5.3. Описание на изследването.

1) Обект на изследването.



Фиг. 5.1. Опитна постановка на изследването.

Обект на изследването е маслен разпределителен трансформатор с обявена мощност 160 kVA, коефициент на трансформация 10/0,4 kV и група на свързване Yyn0, производство на „Елром Трафо СН“ АД, гр. Кюстендил, България (същият като описаният в т. 4.2 1)).

2) Изпитване на прегряване.

Изпитването на прегряване е извършено съгласно т. 7.3.2 от *БДС EN 60076-2:2011 - Силови трансформатори. Част 2: Прегряване на трансформатори, потопени в течност*. Опитната постановка е показана на фиг. 5.1.

Трансформаторът е захранен с 1,3 пъти обявения ток за първите два часа, за да се демонстрира неговата способност за претоварване, след това с общите измерени загуби (2445 W) от неговата страна ВН, а страна НН е свързана на късо. Превключвателя е на положение 3 (10000 V). След като е достигнат установен режим на прегряването в горните слоеве на маслото, изпитвателният ток е редуциран до обявената му стойност (9,24 A) за 1 час. След изключване са измерени съпротивленията на намотките през интервали от 1 минута. Средното прегряване на намотките в момента на изключване е определено чрез екстраполиране на кривите на охлаждане.

а. Околна температура (Θ_a).

Температурата на охлаждащата среда при изпитването на загряване се основава на околната температура в случай на трансформатор с метод на охлаждане ONAN. Околната температура, осреднена от измерванията на четири термометъра, е 27,4 °C. Термометрите са разположени около трансформатора на около 2 m разстояние от казана и на ниво около половината височина на охладителните ребра.

б. Температура в горните слоеве на маслото (Θ_0).

Температурата в горните слоеве на маслото се определя конвенционално чрез термометър потопен в масло в джоб на капака. Температурата в горните слоеве на маслото е измерена докато са били приложени общите загуби. Изпитването е преустановено, когато промяната на прегряването в горните слоеве на маслото, е паднала под 1 K/h и се е запазила такава за период от 3 часа. Температурата в горните слоеве на маслото (Θ_0) е 58,2 °C при обявена мощност и прегряването в горните слоеве на маслото ($\Delta\Theta_0$) е 30,8 °C, което е температурната разлика между температурата в горните слоеве на маслото и околната температура. Това удовлетворява изискването за лимит на прегряването в горните слоеве на маслото от 60 K.

в. Температура в долните слоеве (Θ_b) и средна температура (Θ_{0m}) на маслото.

Температурата в долните слоеве на маслото (Θ_b), определена чрез термодвойка (виж фиг. 5.4) е 43,6 °C и прегряването в долните слоеве на маслото ($\Delta\Theta_b$) е 16,2 K, което е температурната разлика между температурата в долните слоеве на маслото и околната температура. Средната температура на маслото (Θ_{0m}) принципно е определена да бъде средната температура на маслото в намотките и е изчислена на 50,9 °C.

И средното прегряване на маслото ($\Delta\Theta_m$) е 23,5 K, което е температурната разлика между средната температура на маслото и околната температура.

г. Средна температура на намотките (Θ_2).

Средната температура на намотката е определена чрез измерване на нейното съпротивление. В установен режим е направено референтно измерване ($R_{1BH} = 7,104 \Omega$; $R_{1HH} = 0,010415 \Omega$) на съпротивлението на всички намотки при околна температура. Когато е измерено съпротивлението (R_2) след изключване на захранването, екстраполирано до момента на спиране, това дава стойността на температурата: $\Theta_{2BH} = 81,1^\circ\text{C}$, $\Theta_{2HH} = 78,4^\circ\text{C}$

д. Средно прегряване на намотките ($\Delta\Theta_w$).

Средното прегряване на намотките е определено чрез използване на стойността на съпротивлението в момента на изключване, получено по начина описан по-горе. Стойностите на средната температура на намотките трябва да бъдат увеличени със същото количество, с което средната температура на маслото е спаднала в края на едночасовото захранване с обявен ток. Коригираното средно прегряване на намотките ($\Delta\Theta_w$), тогава е: $\Delta\Theta_{wBH} = 54,2 \text{ K}$, $\Delta\Theta_{wHH} = 51,5 \text{ K}$. Това удовлетворява изискването за ограничение на средното прегряване на намотките от 65 K.

е. Среден градиент на намотката спрямо маслото (g).

Средният градиент на намотката спрямо маслото (g) се определя като разлика между некоригираната средна температура на намотката Θ_2 и средната температура на маслото Θ_{0m} при изключване: $g_{BH} = 30,2^\circ\text{C}$, $g_{HH} = 27,5^\circ\text{C}$.

ж. Прегряване в най-горещата точка на намотката ($\Delta\Theta_h$).

- Определяне чрез изчисления.

Прегряването в най-горещата точка на намотката се определя чрез използването на дадената в дисертацията формула: $\Delta\Theta_{hBH} = 64 \text{ K}$, $\Delta\Theta_{hHH} = 61 \text{ K}$.

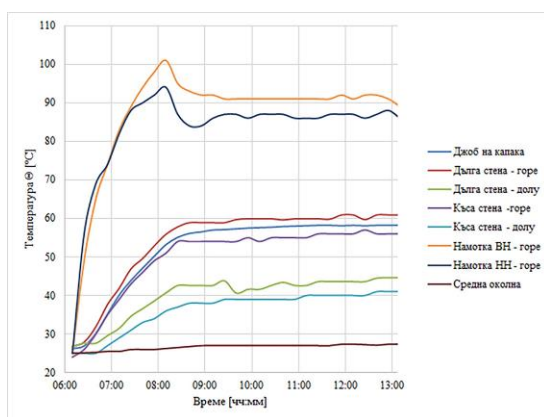
- Определяне чрез директно измерване по време на изпитването на прегряване.

Монтирани са редица термодвойки в горната и долната част на охладителните ребра и вътре в намотките, на места където се предполага че се намират точките с най-висока температура (виж фиг. 5.3).



Фиг. 5.3. Инсталиране на термодвойките.

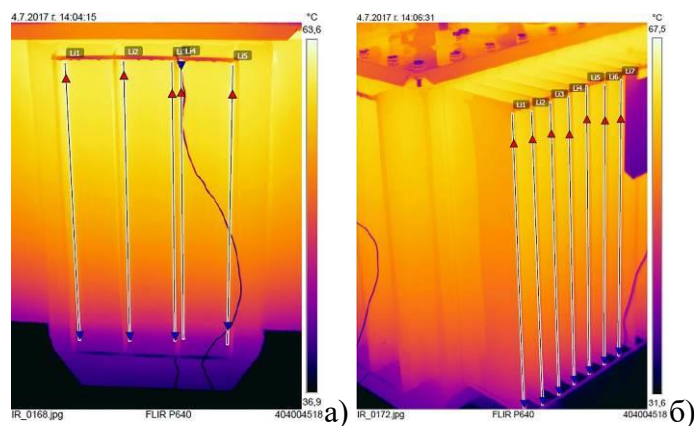
з. Графично представени резултати за всички измерени температури чрез термодвойки по време на изпитването.



Фиг. 5.4. Температури в зависимост от времето.

и. Резултати за температурите заснети с инфрачервена камера в края на изпитването.

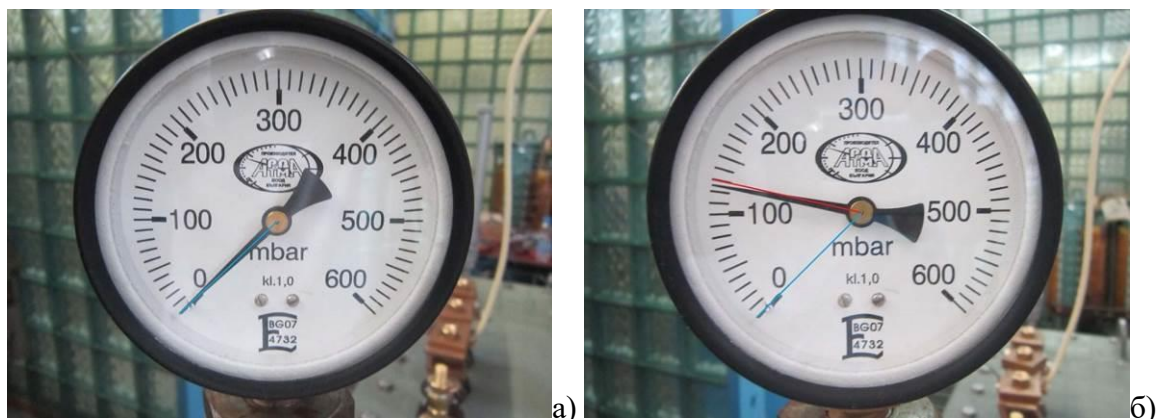
Заснети са температурите по височина на охлаждащите ребра в края на изпитването с помощта на горепосочения тип термографска инфрачервена камера. Зададен е коефициент на абсорбция на лъчението 0,95. Термографската снимка на късата страна на казана е показана на фиг. 5.5 а), а на дългата – на фиг. 5.5 б).



Фиг. 5.5. Термографски снимки на късата (а) и дългата страна (б) на казана.

к. Налягане в казана.

При херметично затворените трансформатори ребрата на нагънатия казан имат основна роля в охлаждането и понасянето на колебанията в налягането. По време на изпитването на прегряване е получено налягането в казана, както е показано на фиг. 5.7.



Фиг. 5.7. Промяна на налягането в казана по време на изпитването на прегряване – в началото (а), в края (б).

5.4. Изводи.

Предложена е методика за експериментално изследване на маслени трансформатори базирана на стандарта БДС EN 60076-2:2011 Силови трансформатори. Част 2: Прегряване на трансформатори, потопени в течност, като е направено надграждане чрез използването на термодвойки за директно измерване на температурата на маслото и на намотките и чрез заснемане с инфрачервена термографска камера.

Получените резултати от направеното експериментално изследване, показват че изследваният трансформатор отговаря на изискванията на стандарта.

5.5. Потвърждаване коректността на създадените компютърни модели.

Резултатите са проверени и потвърдени за тяхната автентичност чрез експериментално изследване на прегряването на реален модел на същия трансформатор, описано в настоящата глава. При сравняването на температурата в горните слоеве на маслото и прегряването в най-горещата точка на намотка ВН и НН, определени чрез експерименталното изследване и тези, получени от компютърния модел (Таблица 5-2), се вижда че относителната грешка за температурата на маслото е около 2 %, а тази за температурата на намотките е между 3,9 и 8,7 %. Основавайки се на това, може да се заключи, че предложеният модел с МКЕ има достатъчна точност за целите на проектирането и поддръжката на трансформатори и може да бъде приложен при изследването и проектирането и на други конструкции маслени разпределителни трансформатори.

Стойност	Компютърен модел	Експериментално изследване	Абсолютна грешка	Относителна грешка (%)
Температура в горните слоеве на маслото (°C)	59,3	58,2	1,1	1,9
Средна температура в намотка ВН (°C)	74,1	81	6,9	8,5
Средна температура в намотка НН (°C)	72,7	78,4	5,7	7,3
Прегряване в н. г. т. на намотка ВН (K)	59,3	61,7	2,4	3,9
Прегряване в н. г. т. на намотка НН (K)	53,5	58,6	5,1	8,7

Таблица 5 2. Сравнение на резултатите от компютърния модел и експерименталното изследване.

ГЛАВА 6. ИЗСЛЕДВАНЕ ПРИЛОЖЕНИЕТО НА ИНФРАЧЕРВЕНАТА ТЕРМОГРАФСКА ТЕХНИКА В ЕКСПЛОАТАЦИЯТА НА ТРАНСФОРМАТОРИ В РАЗПРЕДЕЛИТЕЛНАТА МРЕЖА

6.1. Въведение.

В тази глава са представени резултатите и техния анализ, от изследване с инфрачервената камера, описана в т. 5.1, на няколко трансформаторни станции на територията на едно от електроразпределителните дружества в България.

6.2. Описание на изследването.

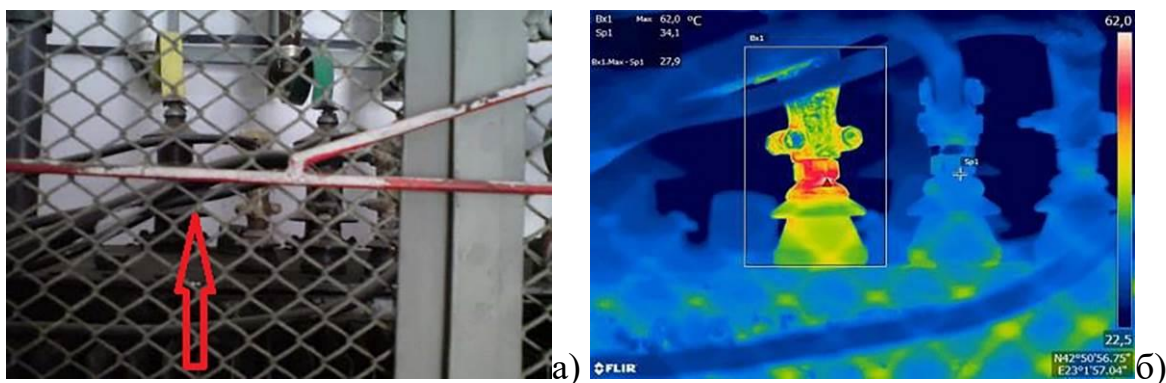
За класификация на топлинните аномалии, по време на представените по-долу изследвания, са приети ΔT критериите, които са описани и анализирани в т. 1.9 2) а).

6.3. Резултати и анализи.

За по-добро представяне на резултатите са въведени следните означения: T (°C) – околна температура, $Ar1$ (°C) – измерена максимална температура, $Sr1$ (°C) – измерена температура на съседния обект, ΔT (°C) – разлика между $Ar1$ и $Sr1$. Въз основа на това, за всеки отделен случай е определен приоритет и е препоръчано коригиращо действие.

1) Обект на изследване № 1.

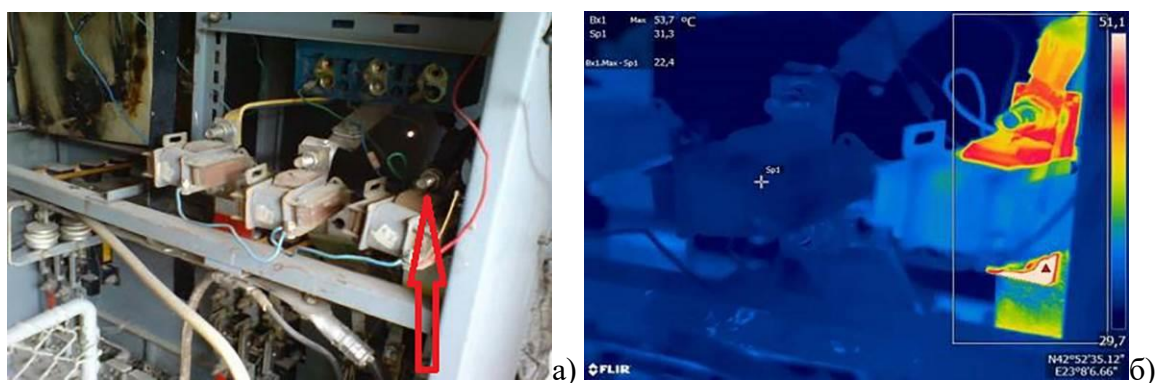
Открито е място с висока температура между гайка и шпилка на извод НН на фаза „с“ на трансформаторът, както е показано на фиг. 6.1. Т е 15 °С, Ar1 е 62 °С, Sp1 е 34,1 °С и ΔT е 27,9 °С. Температурната стойност на този извод се различава от тази на извода в близост до него с 27,9 °С и е с 47 °С над атмосферния въздух. В съответствие с Таблица 1-1 този проблем попада в приоритет 1, а препоръчителното действие е "незабавен ремонт". Причината за този проблем е слабо затегнатата гайка в сглобения извод.



Фиг. 6.1. Обект на изследване № 1 – а) фотографско изображение, б) инфрачервено изображение.

2) Обект на изследване № 2.

Установено е разхлабване на електрическите връзки в болтовото съединение между фиксираната част и шината на горната и долната част на токовия трансформатор на фаза "с", както е показано на фиг. 6.2. Т е 30 °С, Ar1 е 65 °С, Sp1 е 37 °С и ΔT е 28 °С. Температурната стойност на този токов трансформатор се различава от тези в близост до него с 28 °С и е с 35 °С над атмосферния въздух. В съответствие с Таблица 1-1 повредата попада в приоритет 2, а препоръчителното действие е "да се наблюдава, докато коригиращите мерки не бъдат изпълнени".



Фиг. 6.2. Обект на изследване № 2 – а) фотографско изображение, б) инфрачервено изображение.

6.4. Изводи.

Направен е преглед на класификацията на топлинните аномалии, резултатите и техния анализ, от изследване посредством инфрачервена

термография на няколко трансформаторни станции на територията на едно от електроразпределителните дружества в България.

Във всички изследвания, описани в тази глава, откритата повреда е резултат от недобре затегнати болтови съединения.

В заключение, инспекциите с инфрачервени камери на трансформаторните станции, които са част от разпределителната мрежа на всяко едно електроразпределително предприятие, могат да помогнат за намаляване на броя на скъпите и катастрофални излизания от строя на трансформаторите и непредвидени спирания, което води до подобряване на ефективността на системата и качеството на електроенергията.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящия дисертационен труд е изследвано чрез компютърно моделиране и експериментално загряването в силови маслени трансформатори.

Чрез разработените триизмерни компютърни модели за анализ на електромагнитното поле на трансформатори на основата на CAD система с общо предназначение и готов програмен продукт по метода с крайни елементи е решена линейната и нелинейна електромагнитна задача.

При сравняване разпределението на електромагнитното поле за двата варианта на моделите – без казан и с казан – се вижда, че наличието на казан в близост до активната част на трансформаторите, не влияе на стойностите на магнитната индукция.

Разработени са компютърни модели за решаване на задачи за анализ на тримерно топлинно поле на трансформатори чрез метода с крайни елементи и готов програмен продукт при установен режим, при преходен режим и чрез свързано топлопренасяне.

От проведеното компютърно моделиране на топлинното поле на маслен трансформатор 160 kVA са получени резултати за температурите на компонентите в характерни точки от конструкцията.

Създадените компютърни модели са внедрени в процесите на проектиране и развойна дейност в завода за производство на трансформатори „Елпром Трафо СН“ АД, гр. Кюстендил.

Предложена е методика за експериментално изследване на маслени трансформатори базирана на стандарта БДС EN 60076-2:2011 Силови трансформатори. Част 2: Прегряване на трансформатори, потопени в течност, като е направено надграждане чрез използването на термодвойки за директно измерване на температурата на маслото и на намотките и чрез заснемане с инфрачервена термографска камера.

Резултатите от създадените компютърни модели са проверени и потвърдени за тяхната автентичност чрез експериментално изследване на прегряването на реален трансформатор, описано в Глава 5. При сравняването на температурата в горните слоеве на маслото и прегряването в най-горещата точка на намотка ВН и НН, определени чрез експерименталното изследване и тези, получени от компютърния модел, се вижда че относителната грешка за температурата на маслото е около 2 %, а тази за температурата на намотките е между 3,9 и 8,7 %. Основавайки се на това, може да се заключи, че предложения модел с МКЕ има достатъчна точност за целите на проектирането и поддръжката на трансформатори и може да бъде приложен при изследването и проектирането и на други конструкции маслени разпределителни трансформатори.

Направен е преглед на класификацията на топлинните аномалии, резултатите и техния анализ, от изследване посредством инфрачервена термография на няколко трансформаторни станции на територията на едно от електроразпределителните дружества в България.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. Научно-приложни приноси.

1.1. Разработени са триизмерни компютърни модели за анализ на електромагнитното поле на трансформатори на основата на САD система с общо предназначение и готов програмен продукт по метода с крайни елементи, чрез решаване на линейната и нелинейна електромагнитна задача. Получените загуби от решаването на електромагнитната задача се използват като източници на топлина при топлинната задача.

1.2. Разработени са компютърни модели за решаване на задачи за анализ на тримерно топлинно поле на трансформатори чрез метода с крайни елементи и готов програмен продукт при установен режим, при преходен режим и чрез свързано топлопренасяне. Резултатите от тези модели показват много добре термичното състояние на компонентите на трансформатора. Този факт позволява още в етапа на проектиране да бъдат предвидени последствията, намаляващи експлоатационния срок на трансформатора, като екстремното влошаване на изолацията например.

2. Приложни приноси.

2.1. Направен е преглед на класификацията на топлинните аномалии, резултатите и техния анализ, от изследване посредством инфрачервена термография на няколко трансформаторни станции на територията на едно от електроразпределителните дружества в България.

2.2. Предложена е методика за експериментално изследване на маслени трансформатори базирана на стандарта БДС EN 60076-2:2011 Силови трансформатори. Част 2: Прегряване на трансформатори, потопени в

течност, като е направено надграждане чрез използването на термодвойки за директно измерване на температурата на маслото и на намотките и чрез заснемане с инфрачервена термографска камера.

2.3. Създадените компютърни модели са внедрени в процесите на проектиране и развойна дейност в завода за производство на трансформатори „Елпром Трафо СН“ АД, гр. Кюстендил. В резултат на това значително са намалени разходите за производството на опитни образци и е повишена конкурентоспособността на дружеството.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. **Mechkov E.**, Tzeneva R., Mateev V., Yatchev I., Electromagnetic field modelling using FEM of the active part of oil-immersed transformers, Materials Science Forum, ISSN: 0255-5476, Vol. 856, pp 184-189, doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.856.184, © 2016 Trans Tech Publications, Switzerland.

2. Матеев В., Ценева Р., **Мечков Е.**, Ячев И., Моделиране на електромагнитното поле на активната част на маслен трансформатор с МКЕ, Годишник на Технически Университет – София, ISSN 1311-0829, т. 66, кн. 1, 2016, стр. 527-532, © 2016 Publishing House of Technical University of Sofia.

3. **Mechkov E.**, Tzeneva R., Mateev V., Yatchev I., Thermal analysis using 3D FEM model of oil-immersed distribution transformer, 2016 19th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), doi: 10.1109/SIELA.2016.7543027, IEEE, 978-1-4673-9522-9/16/\$31.00 ©2016 IEEE.

4. Ценева Р., Славчев Я., **Мечков Е.**, Матеев В., Преходен топлинен анализ на маслен разпределителен трансформатор с МКЕ, Годишник на Технически Университет – София, ISSN 1311-0829, т. 67, кн. 1, 2017, с. 301-310, © 2017 Publishing House of Technical University of Sofia.

5. **Mechkov E.**, Application of Infrared Thermography Technique in Transformers Maintenance in Distribution Network, 2017 15-th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), pp. 354-357, doi: 10.1109/ELMA.2017.7955462, IEEE, 978-1-5090-6690-2/17/\$31.00 ©2017 IEEE.

6. **Mechkov E.**, Stoimenov N., Experimental temperature rise investigation of an oil-immersed distribution transformer, Proceedings of the Technical University of Sofia, ISSN 1311-0829, Vol. 68, Issue 1, 2018, pp. 365-374, © 2018 Publishing House of Technical University of Sofia.

7. Hadzhiev I., Yatchev, I., **Mechkov E.**, Conjugate Heat Transfer Analysis Using 3D FEM Model of an Oil-immersed Distribution Transformer, 2018 International Conference on High Technology for Sustainable Development (HiTech), pp. 82-85, DOI: 10.1109/HiTech.2018.8566619, 978-1-5386-7039-2/18/\$31.00 ©2018 IEEE.

SUMMARY

RESEARCH ON THE HEATING OF POWER OIL-IMMERSED TRANSFORMERS

Emil Petrov Mechkov, M.Sc.E.E.

Temperature field distribution in the active components, as well as oil velocity variation in the tank are essential response parameters of power oil-immersed transformers that influence the lifetime of their operation. From designers and users point of view these parameters are crucial when evaluating the possibility of overloading and the consequences on transformers lifetime at different operating temperatures.

The goal of this thesis is to do a research on the heating of power oil-immersed transformers using computer modeling and experimental methods.

Three-dimensional computer models of a transformer electromagnetic field have been analyzed by the help of a general purpose CAD system and a finite element analysis software. Linear and nonlinear electromagnetic problems have been solved. The losses, obtained from the electromagnetic problem solution, have been used as heating sources for investigating the thermal response of the transformer by the help of properly constructed steady-state, transient and conjugate heat transfer models.

The model results of the transformer components thermal condition have been confirmed as consistent with the experiment which allows for predicting, as early as the design stage, the consequences of a reduced transformer life, e.g. due to extreme degradation of insulation.

Moreover, oil and windings hot-spot temperature rises have been determined by performing temperature distribution tests with the actual transformer along with numerical calculations. A comparative analysis of the test and calculated results has revealed a relative hot-spot oil temperature error of about 2 %, and windings relative temperature error between 3.9% and 8.7 %. Based on this, it has been concluded that the proposed FEM model is an adequate approximation and could be applied for the purpose of transformers designing and maintenance.

Several transformer stations on the premises of a Bulgarian utility company have been observed. An overview, classification and analyses have been performed of their thermal results and abnormalities.

A new methodology has been proposed for experimental investigation of oil-immersed transformers, based on the IEC 60076-2:2011 standard. It encompasses the use of thermocouples and an infrared thermal camera for direct measurement of oil and windings temperature.

The developed computer models have been implemented successfully in the R&D processes at the transformer production plant "Elprom Trafo CH" AD, Kyustendil. As a result, the cost of producing prototypes has been significantly reduced and the competitiveness of the company has been increased.