

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ГР. ВАРНА

маг. инж. Марин Тодоров Маринов

АВТОРЕФЕРАТ

На дисертационен труд за присъждане на ОНС „Доктор“ на
тема:

„ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТОПЛИННИТЕ РЕЖИМИ НА ЧЕСТОТНО УПРАВЛЯЕМ АСИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ“

По професионално направление

5.2. “Електротехника, електроника и автоматика”

по докторска програма „Електрически машини и апарати“

Ръководители: 1) доц. д-р инж. Марин Славов Маринов

2) доц. д-р инж. Майк Юрген Щреблау

Варна, 2026 г.

Рецензенти:

1.
2.
3.

Дисертационният труд е обсъден на 22.05.2026г. на разширен катедрен съвет на катедра „Електротехника и електротехнологии“ и е насочен за защита.

Докторантът работи в катедра „Електротехника и електротехнологии“

Автор: маг. инж. Марин Тодоров Маринов
Заглавие: ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТОПЛИННИТЕ РЕЖИМИ
 НА ЧЕСТОТНО УПРАВЛЯЕМ АСИНХРОНЕН
 ДВИГАТЕЛ

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ГР. ВАРНА

маг. инж. Марин Тодоров Маринов

АВТОРЕФЕРАТ

На дисертационен труд за присъждане на ОНС „Доктор“ на
тема:

„ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТОПЛИННИТЕ РЕЖИМИ НА ЧЕСТОТНО УПРАВЛЯЕМ АСИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ“

По професионално направление
5.2. “Електротехника, електроника и автоматика”
по докторска програма „Електрически машини и апарати“

Ръководители: 1) доц. д-р инж. Марин Славов Маринов
2) доц. д-р инж. Майк Юрген Щреблау

Варна, 2026 г.

Дисертационния труд съдържа 136 страници, от които 120 страници основен текст, 155 фигури и 17 таблици материалът, е оформен в 5 глави, завършващи с обобщени изводи и приноси. Библиографията включва 122 заглавия, от които 9 на кирилица, 103 на латиница и 10 интернет източника. Допълнително към дисертацията има приложения в размер на 95 страници.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на
от ч. в „Конферентна зала“ в корпус НУК към ТУ-Варна,
на открито заседание на жури, сформирано със заповед на
Ректора на ТУ-Варна №.....

МАТЕРИАЛИТЕ ПО ЗАЩИТАТА (ДИСЕРТАЦИОНЕН ТРУД,
ПИСМЕНИ РЕЦЕНЗИИ И СТАНОВИЩА) СА НА
РАЗПОЛОЖЕНИЕ ВЪВ ФД „ДОКТОРАНТИ“ КЪМ ТУ-ВАРНА,
НАМИРАЩ СЕ ВЪВ СТАЯ 318 НУК

СЪДЪРЖАНИЕ

СЪДЪРЖАНИЕ	1
ОБЩАХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД	3
Актуалност на проблема.	3
Цел и задачи на дисертацията	3
Обект, предмет и място на изследване	4
Методи за изследване	4
Научна и практическа новост	4
Апробация на резултатите	5
Структура и обем на дисертацията	5
СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД	6
ГЛАВА ПЪРВА. ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР	6
ГЛАВА ВТОРА. МЕТОДИКА ЗА МОДЕЛИРАНЕ НА ТЕМПЕРАТУРНО ПОЛЕ В АСИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ	7
I. Дефиниране на обекта за изследване.	7
II. Определяне параметрите на Т-образна заместваща схема.	8
III. Аналитично определяне на загубите.	8
IV. Аналитично определяне на работните характеристики.	9
V. Топлинен модел на асинхронен двигател.	9
VI. Изводи.	11
ГЛАВА ТРЕТА. СИМУЛАЦИОННО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТЕМПЕРАТУРНО ПОЛЕ В ЧЕСТОТНО-УПРАВЛЯЕМ АСИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ	12
I. Изследване на стационарен топлинен процес.	13
II. Изследване на топлинен преходен процес на загряване.	13
III. Изводи.	14
ГЛАВА ЧЕТВЪРТА. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЧЕСТОТНО - УПРАВЛЯЕМ АСИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ	15
I. Стъпки при изграждане на експерименталния стенд.	15
II. Избор на термосензори. Изследване на термосензорите за монтаж в изследвания асинхронен двигател.	15
III. Пренавиване на статорната намотка и монтаж на термосензори в нея. Монтаж на термосензори в роторното тяло.	16

IV.	Експериментално изследване на работни характеристики на асинхронен двигател.	16
V.	Хармоничен анализ на захранването подавано от честотния преобразувател, към асинхронния двигател.	17
VI.	Изграждане на интегрирана система за измерване и събиране на данни за температурното разпределение в асинхронния двигател.	17
VII.	Експериментално изследване на температурното поле на асинхронен двигател в режими на празен ход и натоварване.	18
VIII.	Изводи.	20
ГЛАВА ПЕТА. СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОТ ЕКСПЕРИМЕНТ И МОДЕЛ		20
I.	Сравнение на работните характеристики, получени от Т-образната заместваща схема с експериментално получените.	20
II.	Сравнение на температурното разпределение, получено от симулацията на стационарния топлинен режим с експерименталните резултатите.	21
III.	Сравнение на температурното разпределение, получено от преходния топлинен режим с експерименталните резултати.	21
IV.	Изводи.	22
ОСНОВНИ ИЗВОДИ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ		23
НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ В ДИСЕРТАЦИЯТА		24
СПИСЪК НА НАУЧНИТЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД		25
АБСТРАКТ НА АНГЛИЙСКИ ЕЗИК		26

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Развитието на съвременната индустрия е свързано с масовото внедряване на регулируеми електрозадвижвания, базирани на индукционни (асинхронни) двигатели. Тяхната опростена конструкция, ниска производствена цена и висока експлоатационна надеждност ги определят като основен консуматор на електроенергия в промишления сектор. Оптимизацията на работните им процеси в съвременната практика се постига чрез системи за честотно управление. Многобройни изследвания доказват, че този подход повишава енергийната ефективност и коефициента на полезно действие на масови индустриални обекти като помпени, вентилаторни и компресорни уредби. Навлизането на полупроводниковата преобразователна техника обаче поставя нови предизвикателства пред диагностиката и надеждността на задвижванията. Честотното регулиране променя до-голяма степен характера на електромагнитните и топлинните процеси в машината. Промяната на честотата определя скоростта на въртене, което при двигатели със собствено охлаждане рефлектира директно върху интензивността на топлоотдаването. Същевременно избраният закон на управление, в съчетание с присъствието на висши хармоници в захранващото напрежение, променя нелинейно структурата на загубите в статора и ротора. Всички тези фактори формират сложно и динамично температурно разпределение по конструктивните елементи на двигателя, чисто прецизно аналитично определяне и прогнозиране е сериозно научно и практическо предизвикателство. Тъй като превишаването на допустимите термични граници води до ускорена деградация на изолацията и аварии, изследването на тези специфични температурни режими е от критично значение.

Цел и задачи на дисертацията

Цел: Да се изследва пространственото разпределение на температурното поле в честотно - управляем асинхронен двигател при различни режими на работа.

Задачи:

1. Да се синтезира методика за моделиране на температурното поле в честотно управляем асинхронен двигател

2. Да се извърши теоретично изследване на разпределението на температурното поле в честотно-управляем асинхронен двигател при:
 - стационарен режим
 - преходен режим на нагряване
3. Да се предложи подход и да се реализира стенд за експериментално изследване на температурното поле в честотно-управляем асинхронен двигател
4. Да се извърши сравнителна оценка върху резултатите получени от симулация и експеримент.

Обект, предмет и място на изследване

Изследван е асинхронен двигател тип AO2-41-4, захранен посредством честотен преобразувател EMERSON SP2401. Изследванията са извършени на територията на ТУ-Варна. За симулация на топлинните режими е използван софтуерен продукт COMSOL Multiphysics v5.3. Лицензът е предоставен от катедра ЕТЕТ към ТУ-Варна.

Методи за изследване

За изследванията в дисертационния труд са използвани:

- ❖ Метод на крайните елементи, посредством софтуерен продукт COMSOL Multiphysics.
- ❖ Анализ на Т-образна заместваща схема.
- ❖ Класически методи за пресмятане на електрически вериги.
- ❖ Контактно измерване на температура, посредством терморезистори.
- ❖ Аналогово отчитане на показанията на термосензорите, посредством АЦП – АТМega328.
- ❖ Безжично предаване на сигнали, посредством Bluetooth 3.0.

Научна и практическа новост

Реализирано е температурното разпределение, в целия обем, на изследвания асинхронен двигател при различни честоти на захранващото напрежение и при различни работни режими.

Апробация на резултатите

Разработката по всяка от задачите на дисертацията са докладвани на научни форуми. Направени са общо четири публикации, които са представени на международни конференции в България.

Структура и обем на дисертацията

Дисертационния труд съдържа 136 страници, от които 120 страници основен текст, 155 фигури и 17 таблици материалът, е оформен в 5 глави, завършващи с обобщени изводи и приноси. Библиографията включва 122 заглавия, от които 9 на кирилица, 103 на латиница и 10 интернет източника. Допълнително към дисертацията има приложения в размер на 95 страници.

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА ПЪРВА ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР

Направена е класификация на неизправностите при експлоатация на асинхронни двигатели. Изведени са неизправностите, предизвикани от наличието на честотно управление в системата на двигателя и са разгледани са източниците на топлина в асинхронния двигател.

Направен е анализ на методите за моделиране и изследване на асинхронни двигатели. Разгледани са най-често използваните софтуерни продукти при изследване на асинхронни двигатели..

Направеният литературен обзор и сравнителен анализ водят до следните изводи:

- Анализът на литературните източници в т. I показва, че честотното управление на асинхронни двигатели е директно свързано с някои от най-често срещаните неизправности при тяхната експлоатация.
- От разгледаното разпределение на неизправностите, се забелязва, че почти половината от всички неизправности, породени от честотно управление водят до изменение на температурния режим на двигателя.
- При изследване на разпределението на загубите в асинхронните двигатели се забелязва, че честотното управление има директно влияние върху стойностите им.
- За да се изследва влиянието на честотата върху температурно поле на асинхронен двигател, е необходимо да се изгради адекватен модел. Сравнявайки методите за моделиране на температурното поле в асинхронни двигатели, методът на крайните елементи се откроява, като относително точен и често използван за електромагнитни и топлинни пресмятания.
- От разгледаните софтуерни приложения, за моделиране на температурното поле на асинхронни двигатели, посредством метод на крайните елементи, най-използвани за този тип задачи са ANSYS Maxwell, COMSOL Multiphysics и Elmer.
- Анализът на методите за измерване на температура показва, че методът за безконтактното измерване има много предимства пред контактното, но и един основен недостатък – не позволява визуализация на топлинното поле вътре в измерваното устройство. Поради тази причина температурното поле в дисертационния труд е необходимо да

се снемے експериментално посредством контактно измерване на температурата вътре в двигателя.

- От всички разгледани сензори термисторите са най-подходящи да се използват за проследяване на температурното поле в конструкцията на асинхронните двигатели.

ГЛАВА ВТОРА. МЕТОДИКА ЗА МОДЕЛИРАНЕ НА ТЕМПЕРАТУРНО ПОЛЕ В АСИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ.

Предложена е методика за моделиране на температурното поле в асинхронен двигател, съчетаваща Т-образна заместваща схема и модел, изграден на база метода на крайните елементи (М.К.Е.) – Фиг. 2-1.



Фиг. 2-1. Алгоритъм за моделиране на температурното поле в асинхронен двигател.

1. Дефиниране на обект за изследване.

Обектът на изследване е асинхронен двигател тип АО2-41-4 с номинални параметри: Скорост на въртене 1450 min^{-1} , Мощност от 5,5 kW, Ток : 11,5/16 A, Напрежение 380/220 V. Фактор на мощността - 0,86; К.П.Д- 86,3 % .

II. Определяне на параметрите на Т-образна заместваща схема.

Параметрите по Т-образната заместваща схема за дефинирания асинхронен двигател са определени по методологията за проектиране на електрически двигатели.

При анализа се правят следните допускания:

- Напрежението е чисто синусоидално;
- Използва се само една стойност на магнитната проницаемост на стоманата, отговаряща на номинално натоварване;
- Активните съпротивления на статора и ротора са константни, приведени към температура на намотка от 90 °С;
- Пренебрегват се зъбните хармоници на полето във въздушната междина;
- Двигателят работи в диапазон на натоварване от празен ход до номинален товар.

При пресмятането на параметрите на заместващата схема е необходимо да се отчете влиянието на закона за управление, използван от честотния преобразувател върху входните величини на заместващата схема. За изследванията в разработката е използван закон за управление, определен от условието за оптимална работа на асинхронен двигател, описан с уравнение (2-1):

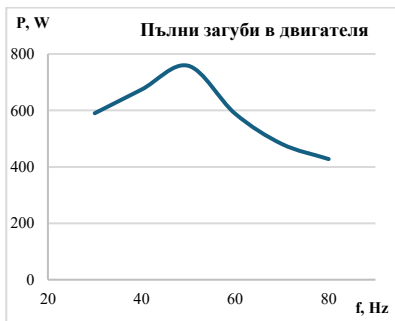
$$\frac{U_1}{U_n} = \frac{f_1}{f_n} \cdot \sqrt{\frac{M_1}{M_n}} \quad (2-1)$$

III. Аналитично определяне на загубите.

На база на получените резултати се използват закономерностите от методологията за проектиране на асинхронни двигатели за изчисление на всичките загуби в двигателя при промяна на честотата на захранващото напрежение, а именно:

- ❖ Електрически загуби в статорната и роторна намотки.
- ❖ Допълнителни загуби.
- ❖ Механични загуби.
- ❖ Загуби в магнитопроводите на статора и ротора на двигателя.

Общите загуби в двигателя в зависимост от честотата са представени на фиг. 2.2:



Фиг. 2-2. Изменение на пълните загуби, при спазване на условието за устойчива работа на двигателя.

IV. Аналитично определяне на работните характеристики.

Аналитичното пресмятане на Т-образната заместващата схема може да се използва също и за определяне на работните характеристики на двигателя. При промяна на активното съпротивление на ротора във втория клон на веригата, може да се симулират различни стойности на натоварването на двигателя.

V. Топлинен модел на асинхронен двигател.

Създаването на температурен модел в програмна среда COMSOL Multiphysics е свързано с:

- ❖ Изграждане на геометричен модел на обекта;
- ❖ Дефиниране областите в геометрията на обекта;
- ❖ Дефиниране на топлинните източници в геометрията на обекта;
- ❖ Дефиниране на началните и граничните условия на модела.

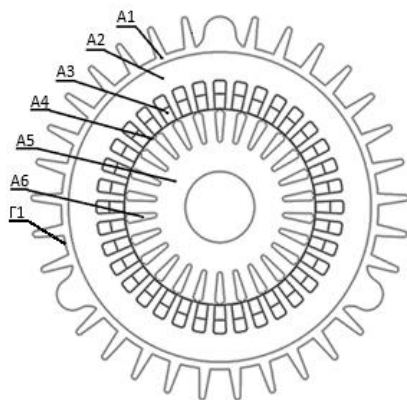
Системата уравнения използвана в числения компилатор на софтуерно приложение COMSOL Multiphysics има следния вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} d_z \rho C_p \frac{dT}{dt} + d_z \rho C_p \mathbf{u} \nabla_T + \nabla \cdot \mathbf{q} = d_z Q + q_0 \\ \mathbf{q} = -d_z k \nabla_T \end{array} \right. \quad (2-2)$$

където: d_z , m – габаритен размер в направление, перпендикулярно на равнината на геометрията на модела; ρ , kg/m^3 – плътност на материала; C_p , $J/kg.K$ – специфичен топлинен капацитет при постоянно налягане; $\mathbf{u}$, m/s – вектор на скоростта на флуида; $\mathbf{q}$, W/m – вектор на линейната плътност на топлинния поток; Q , W/m^3 – обемен източник на топлина; q_0 , W/m^2 – топлинен поток, определен от конвективния топлообмен

между външната границата на модела (повърхността на корпуса) и околната среда. t, s – време на процеса.

Обектът на изследване е асинхронен двигател, за който е изготвен пълен геометричен модел с дефинирани области, представен на фиг. 2-3.

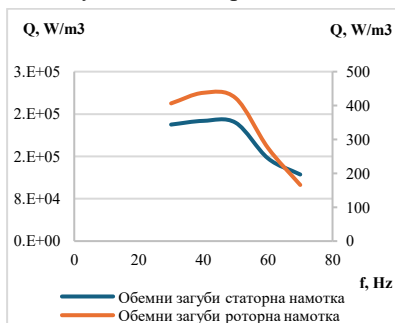


Фиг. 2-3. Геометрия на топлинния модел на асинхронен двигател:
 A1 – корпус, изработен от чугун;
 A2 – статорен магнитопровод;
 A3 – статорна намотка;
 A4 – въздушна междина;
 A5 – роторен магнитопровод;
 A6 – роторна намотка;
 Г1 – външна граница на геометричния модел.

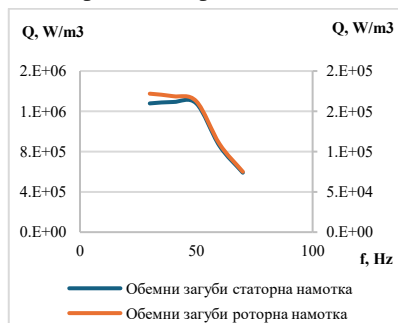
На представения геометричен модел, източници са областите A2, A3, A5 и A6.

Източниците на топлина в модела се задават, посредством тяхната обемна плътност на мощността - Q . На база изчислените загуби и стойностите за обемите на елементите в асинхронния двигател се определят обемните загуби в двигателя.

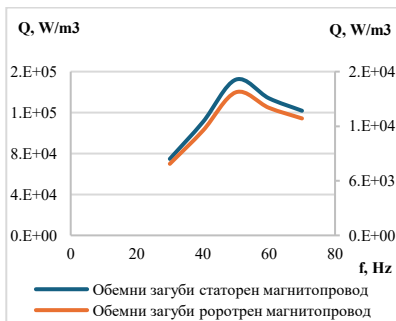
Резултатите са представени на фиг. 2-4, фиг. 2-5 и фиг. 2-6:



Фиг. 2-4. Изменение на обемните загуби в намотките на статора и ротора, при промяна на захранващата честота, в режим на празен ход.



Фиг. 2-5. Изменение на обемните загуби в намотките на статора и ротора, при промяна на захранващата честота, в режим на натоварване



Фиг. 2-6. Изменение на обемните загуби в магнитопроводите на статора и ротора.

След дефиниране на източниците на топлина в модела се задават началните и гранични условия на модела. И при двата типа изследване се задава начална температура от 20°C на всички области в обекта.

При изследваните на топлинното поле в симулираните работни режими е отчетен въздушния поток, преминаващ между ребрата на двигателя, породен от вентилаторна перка. Това се постига, като външните граници на модела, представен на фиг. 2-6 се дефинират посредством външна принудителна конвекция. Основен параметър на принудителната конвекция е скоростта на обухващия флуид, която се определя по зависимост (2-3).

$$v = \frac{S_1}{S_2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \frac{f}{p} \cdot (1 - s) \quad [m/s] \quad (2-3)$$

където : r , m – радиус на перката; S_1 , m^2 – площ на отвора, през който се засмуква въздуха; S_2 , m^2 – площ на отвора през който излиза въздуха; v , m/s – скорост на обдухване върху ребрата на двигателя; s , – хлъзгане на двигателя; p , $бр.$ – брой на чифтовете полюси.

VI. Изводи

- Изведената закономерност за скоростта на обухващата перка, позволява добро прогнозиране на скоростта на охлаждащия флуид за избрания честотен диапазон.
- Разработен е топлинен модел по метода на крайните елементи, използващ за източници на топлина загубите, получени посредством Т-образната заместваща схема.
- Съчетанието на класическата Т-образна схема с изчислителен модел, съставен по МКЕ, позволява изследване на температурните процеси в двигателя.

- Основен недостатък на този подход е необходимостта от някои каталожни параметри на двигателя за точното пресмятане на параметрите на заместващата схема.
- От представеното разпределение на индуктивностите в заместващата схема се забелязва, че тяхната стойност остава постоянна при изменение на честотата на захранващото напрежение.
- В направеното разпределение на загубите в двигателя се забелязва, че при избраният закон за управление най-голяма е стойността на загубите при номинална честота. Понижените загуби при честоти различни от номиналната се дължат на два отделни фактора:
 - При честоти по-ниски от номиналната за спазване на съотношението $U/f = \text{const}$ стойностите и на двата параметъра са понижени. Това води до намалени загуби в магнитопроводите на двигателя. Също така ниската честота води до ниска скорост на въртене на вала на двигателя и от там до понижаване на механичните загуби.
 - При честоти по-високи от номиналната и при поддържане на константна стойност на захранващото напрежение е необходимо да се намали товарния момент върху вала на двигателя. Това води до намаляване на амплитудите на токовете в намотките, а от там до намаляване на електрическите загуби. Промененото съотношение U/f също така намалява стойността на магнитната индукция в магнитопроводите, което независимо от увеличеното влияние на честота върху загубите на магнитопровода, води до цялостно намаляване на загубите в магнитопроводите на двигателя.
- Въпреки, че захранването на двигателя е през честотен преобразувател, от снетите работни характеристики се забелязва, че стойностите им са в очакваните диапазони.

ГЛАВА ТРЕТА. СИМУЛАЦИОННО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТЕМПЕРАТУРНО ПОЛЕ В ЧЕСТОТНО-УПРАВЛЯЕМ АСИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ

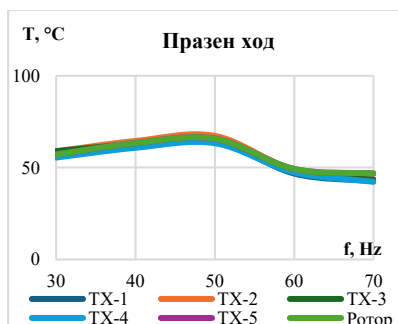
Разгледани са резултатите от симулационните изследвания, извършени посредством описания в глава втора модел. Видовете симулации биват: стационарен топлинен и преходен процес на нагряване на двигателя. И двата процеса са пресметнати за режими на работа – празен ход и номинално натоварване, при честоти на захранващото напрежение: 30Hz, 40Hz, 50Hz, 60Hz и 70Hz.

I. Изследване на стационарен топлинен процес.

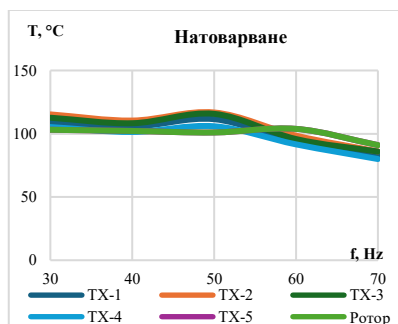
За подробно изследване на температурите в двигателя са снети резултатите в точки, в които е възможно да се постави термо- сензор с цел сравняване на резултатите. Избраните места са:

- 1) В дъното на статорния канал, под намотката – TX-1;
- 2) Между двата слоя на статорната намотка – TX-2;
- 3) Между зъб на статорния магнетопровод и намотката – TX-3;
- 4) Върху статорния зъб на статорния магнетопровод – TX-4;
- 5) Върху вала на ротора – Ротор.

На фиг. 3-1 и фиг. 3-2 са представени резултатите от тези точни за целия честотен диапазон.

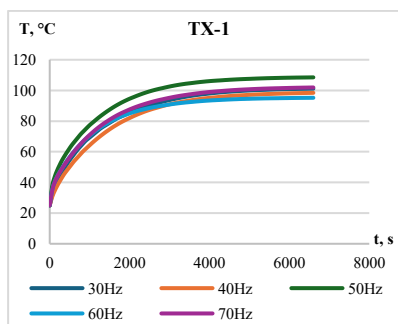


Фиг. 3-1. Симулационни резултати за температурното разпределение в двигателя при различни честоти и режим на празен ход

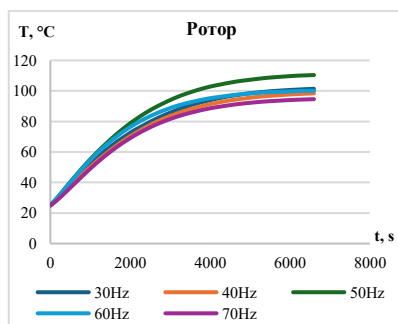


Фиг. 3-2. Симулационни резултати за температурното разпределение в двигателя при различни честоти и режим на натоварване

II. Изследване на топлинния преходен процес на загряване.



Фиг. 3-3. Изменение на температурата в статора в TX-1 при натоварване



Фиг. 3-4. Изменение на температурата в ротора, при натоварване

Симулацията се провежда за същия честотен диапазон и режими на работа (празен ход и натоварване), както при разглеждане на стационарния топлинен процес. За краткост на фиг. 3-3 и фиг. 3-4 частично са представени топлинните преходни процеси възникващи в двигателя за режим на натоварване. Резултатите са за две от определените в точка I точки на изследване, а именно ТХ-1 и Ротор.

III. Изводи.

- Средством описания в глава втора топлинен модел са извършени успешни симулации на електродвигателя. Получено е температурното разпределение в двигателя, при установен режим на работа, както и температурния преходен процес за отделни елементи от геометрията му.
- От представените температурни полета, се забелязва, че при режими на празен ход и натоварване, в честотен диапазон от 30 Hz до 50 Hz, двигателят е достигнал значително по-висока температура, отколкото в честотен диапазон от 60 Hz до 70 Hz.
- Забелязва се също, че най-високата достигната температура в режим на празен ход и в режим на натоварване е при стойност на честотата на захранващото напрежение от 50 Hz.
- По-ниската стойност на температурата при честоти от 30 Hz и 40 Hz, спрямо 50 Hz се дължи на значително по-малките стойности на загубите в магнетопроводите на двигателя.
- По-ниската стойност на температурата при честоти от 60 Hz и 70 Hz, спрямо 50 Hz се дължи на по-малките стойности на загубите в магнетопроводите на двигателя, по-малките стойности на загубите в намотките на двигателя, както и от повишената охлаждаща способност на охладителната перка.
- От топлинните преходни процеси при режим на празен ход се наблюдават сходни процеси на нагряване на статора и ротора в честотен диапазон от 30 Hz до 50 Hz и сравнително по-ниски температури в честотен диапазон от 60 Hz до 70 Hz.
- Сходността на топлинните процеси в режим на празен ход се дължи на едновременното изменение на загубите в магнетопровода и охлаждащата способност на охлаждащата перка.
- От топлинните преходни процеси при режим на натоварване се наблюдават сходни процеси на нагряване на статора и ротора в целия изследван честотен диапазон, като само температурите при стойност на честотата на захранващото напрежение от 50 Hz са забележимо по-високи.

ГЛАВА ЧЕТВЪРТА. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЧЕСТОТНО-УПРАВЛЯЕМ АСИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ

Разгледано е изграждането на експериментален стенд за изследване на температурното поле на асинхронен двигател. Моделът е дал ясни резултати за температурното разпределение в целия двигател, следователно експерименталния стенд е необходимо да може да осигури същата информация. Това прави изработения стенд изключително значим при потвърждаването на теоретичните резултати.

I. Стъпки при изграждане на експерименталния стенд.

Стъпките за изграждане на предложения стенд са следните:

1. Определяне на начина на монтаж на термосензори и избор на такива;
2. Пренавиване на статорната намотка и монтаж на термо-сензорите в нея. Монтаж на термосензори в роторното тяло;
3. Проверка на изправността на двигателя след пренавиване на статорната намотка;
4. Изграждане на устройство за събиране на информацията от монтираните сензори в статорната намотка и роторното тяло.

II. Избор на термосензори. Изследване на термосензорите за монтаж в изследвания асинхронен двигател.

За полагане в намотките на двигателя термо-сензори са избрани термистори с отрицателен температурен коефициент тип NTC-100K TTDO-100KC3-5, с оперативен температурен диапазон от -45 до + 250 °C.

За полагане върху роторното тяло е избран термистор NTC-10k Focusens MF5B Thin Film, с оперативен температурен диапазон от -30 до + 120 °C.

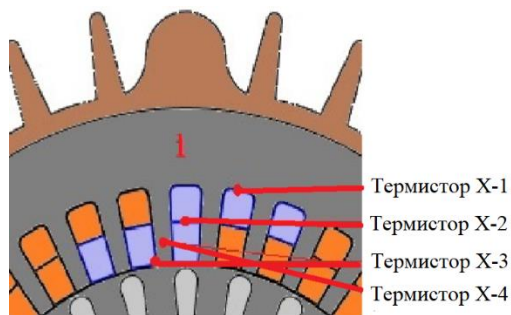
С цел адекватност на получените резултати е изследван режима на работа на избраните термистори и доколко експерименталните резултати отговарят на закона за изменение на съпротивлението, имащ следния вид:

$$R = R_{ref} \cdot e^{-B \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)}, \Omega \quad (4-1)$$

където: T_{ref} , K - референтната температура на термистора; R_{ref} , Ω - съпротивлението на термистора при референтната температура; B , K - температурна константа на термистора; T , K - температура на термистора; R , Ω - съпротивление на термистора при температура T .

III. Пренавиване на статорната намотка и монтаж на термо сензори в нея. Монтаж на термосензори в роторното тяло.

С цел получаване на експериментални резултати изследвания двигател тип АО2-41-4 е пренавит като при пренавиването му са положени общо двадесет на брой термистора, разпределени на четири групи по пет сензора. Термосензорите са разпределение на 4 групи по 5 сензора. 4 от сензорите във всяка група са разположени в и около каналите на намотка (фиг. 4-1) а петия е във челното съединение на намотката.



Фиг. 4-1.. Разпределение на термисторите в двигателя.

За снемане на показанията на роторното тяло е разработено и монтирано автономно устройство за снемане, обработка и изпращане на данните от роторните термо-сензори.

IV. Експериментално изследване на работните характеристики на асинхронен двигател.

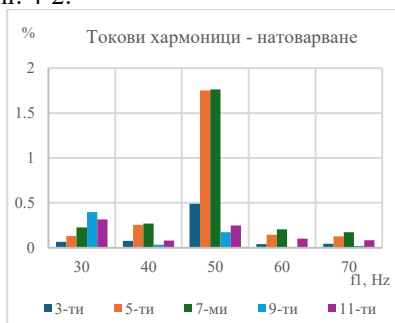
След пренавиване на двигателя, подмяна на лагерите му, монтиране на всички термо-сензори и допълнителни елементи, са снети пълни работни характеристики на двигателя в честотен диапазон на захранващото напрежение от 30 Hz до 70 Hz.. За целта двигателят се закрепя към изпитвателен стенд, използващ тариран постоянно-токов генератор, осъществяващ натоварването на вала на двигателя. Стендът разполага и с инструментална апаратура за измерването на механичните параметри на системата – механичен въртящ момент и скорост на въртене. Електрическите параметри на двигателя се измерват посредством измервателен комплект Schneider Electric PowerLogic PM5560. Захранването се осъществява от честотен преобразувател EMERSON UNIDRIVE SP2402.

Двигателят се натоварва в диапазон от 0 до 1,2.M1 , където M1 е преизчисления номинален момент на двигателя за тестваната честота. M1 се определя по условието за оптимална работа на двигателя (2-1):

V. Хармоничен анализ на захранването, подавано от честотния преобразувател.

По време на снемането на работните характеристики на двигателя, към него се закача измервателно устройство Baker EXP4000 Dynamic Motor Analyzer с цел записване на кривите на токовете и напреженията подавани към управляемия двигател.

На база на придобитите стойности на хармоничните съставлящи, може да се направи анализ на изменението на висшите хармоници на напрежението и тока, при описаните за текущия експеримент условия на работа на преобразувателя. Хармоничен анализ на изменението на нечетните висши хармоници на токовете (3-ти, 5-ти, 7-ми, 9-ти и 11-ти) в зависимост от носещата честота на преобразувателя при натоварване, е представено на фиг. 4-2.



Фиг. 4-2. Изменение на висшите хармоници на тока при различни честоти в режим на натоварване.

VI. Изграждане на интегрирана система за измерване и събиране на данни за температурното разпределение в асинхронния двигател.

За осъществяване на записа на данни от монтираните сензори е разработено аналогово устройство за събиране на информацията, използващо развойна платка с чип ATmega328 – Arduino UNO с добавен към нея мултипликатор на аналогови входове Analog Input Extension K12.

За получаване и обработка на информацията от монтираните в ротора термосензори е използвана Аналогова развойна платка Beetle BLE, разработена от DFRobot, съдържаща Bluetooth предавател и захранвана чрез акумулаторни батерии. Принципът на изчисляване и снемане на информацията е аналогичен с този при статорното устройство за събиране на информация.

Принципът на работа на устройството е отчитане на напрежението на всеки един от аналоговите му входове, посредством делител на

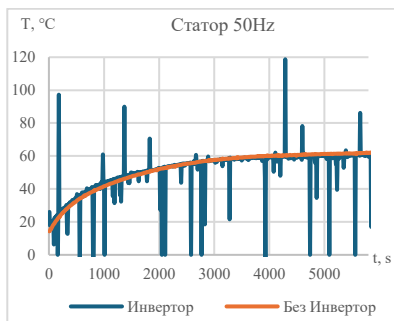
напрежение. Промяната в напрежението е базирано на промяната на съпротивлението на термистора по закона за неговото изменение (4-2). На база на този закон се извежда следното уравнение за пресмятане на температурата, измерена от термистора – зависимост 4-2.

$$t = \frac{B}{\frac{\ln\left(\frac{R}{R_{ref}}\right)}{B} - \frac{1}{T_{ref}}} - 273.15 [^{\circ}\text{C}] \quad (4-2)$$

VII. Експериментално изследване на температурното поле на двигателя в режими на празен ход и натоварване.

1. Отстраняване на грешки при измерване.

При първоначално изследване на изработения стенд в режим на празен ход, директно снетите данни съдържаха редица отклонения от средната стойност на изменение на температурата. За уточняване на произхода им, двигателя е тестван в същия режим, но захранван през регулируем автотрансформатор за постигане на параметри на захранващото напрежение: 380V и 50Hz. Резултатите от направеното сравнение са представени на фиг. 4-3.



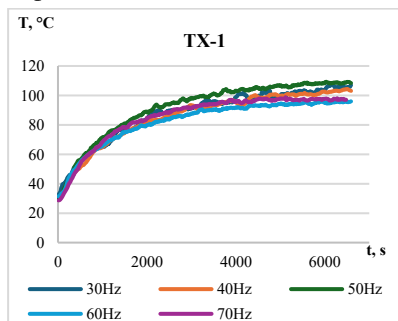
Фиг. 4-3. Сравнение на данните за температурата получени при захранване на двигателя през инвертор и през регулируем автотрансформатор.

От фиг. 4-3 се наблюдава, че основната тенденция на изменение на температурата, при честотно управление се препokrива с тази при регулируем автотрансформатор. Забелязва се, че наличието на честотен преобразувател във веригата на двигателя води до смущения в измервателните данни. Най-вероятната причина за възникването им са наличието на високочестотни хармоници в кривите на напрежението и тока. Тези хармонични съставки могат да индуцират паразитни напрежения във веригите на термисторите и така да доведат до възникването на споменатите отклонения. С цел отстраняване на

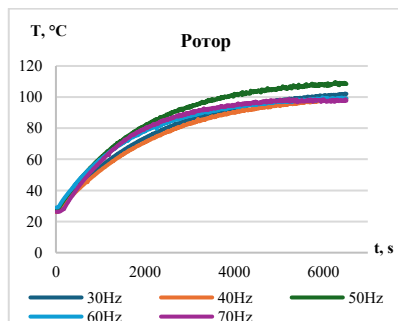
неточностите и филтриране на данните са изготвени два програмни кода в програмна среда Matlab.

2. *Снемане на топлинен преходен процес при постоянен товар и промяна на честотата на захранващото напрежение.*

С помощта на изградения стенд – фиг. 4-47, и двете филтриращи програми, се снемат данните за температурата по време на целия измервателен период. Интервалът на измерване е 10 секунди, времетраенето на опитен процес – 6600 секунди. Изследването се провежда в режими на празен ход и натоварване в целия честотен диапазон. Резултатите за изменението на Температурите в ротора и термистор TX-1 от статора, при натоварване са представени на фиг. 4-4 и фиг. 4-5.

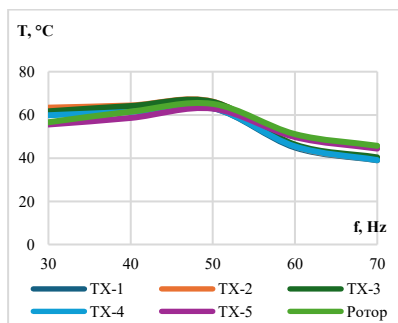


Фиг. 4-4. Изменение на температурата в група TX-1 при натоварване

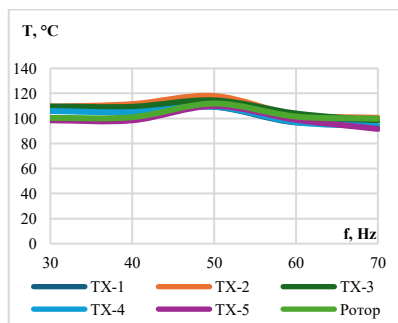


Фиг. 4-5. Изменение на температурата в група роторна натоварване.

3. *Снемане на стационарен топлинен процес при постоянен товар и промяна на честотата на захранващото напрежение.*



Фиг. 4-6. Експериментално получени резултати за температурите в измервателните точки при различни честоти и режим на празен ход



Фиг. 4-7. Експериментално получени резултати за температурите в измервателните точки при различни честоти и режим на натоварване

След снемане на топлинния преходен процес, получените резултати се използват за определяне на установените температури в статора и ротора на машината. Данните се снемат за целия честотен диапазон - 30Hz, 40Hz, 50Hz, 60Hz, и 70Hz, както и в двата режима на работа. Температурата от поставените сонди се снима след приключване на преходния процес и установяване на температура (след около 7200 секунди)

VIII. Изводи.

- От представеното температурното разпределение в режим на празен ход наблюдава, че всички положени сензори са отчетливи най-големи стойности при честота на захранващото напрежение от 50 Hz.
- При анализ на температурното разпределение в режим на натоварване се наблюдава, че стойностите, отчетени от сензорите в честотен диапазон от 30 Hz до 50 Hz са сравнително близки.
- Най-ниска е установената температура при честоти над 50 Hz, малко по-висока е температурата при честоти под 50 Hz и най-високо отчетена стойност има при честота от 50 Hz.

ГЛАВА ПЕТА. СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОТ ЕКСПЕРИМЕНТ И МОДЕЛ

Направен сравнителен анализ между експерименталните и симулационните работни характеристики на двигателя. Направени са сравнителни анализи на температурите, получени от модела и експеримента, при празен ход и натоварване, в упоменатия честотен диапазон. Изведени са стойностите на относителните и средните грешки.

Анализът е извършен в следния ред:

- Сравнение на работните характеристики, получени от Т-образната заместваща схема с експериментално получените.
- Сравнение на температурното разпределение, получено от симулацията на стационарния топлинен режим с експерименталните резултати.
- Сравнение на температурното разпределение, получено от преходния топлинен режим с експерименталните резултати.

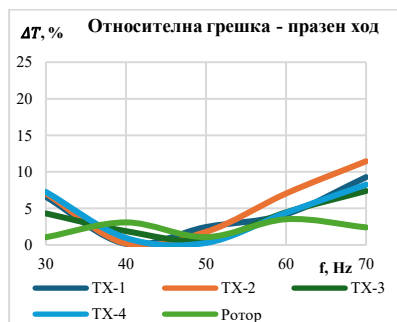
I. Сравнение на работните характеристики, получени от Т-образната заместваща схема с експериментално получените.

Получените от Т-образната заместваща работни характеристики се сравняват със експериментално получените работни характеристики. С цел оценка на адекватността на модела е пресметната относителната грешка между експеримент и модел. От изследването на грешката е

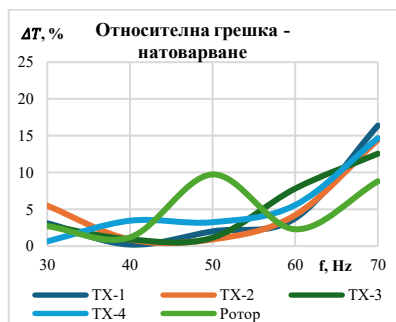
установено, че за нито един от параметрите на работните характеристики относителната грешка не надвишава 8,8%

II. Сравнение на температурното разпределение, получено от симулацията на стационарния топлинен режим с експерименталните резултати.

На база на температурните разпределения, представени в глава III и експерименталните резултати, представени в глава IV, е направено разпределение на относителната грешка на температурите в квазистационарен режим.

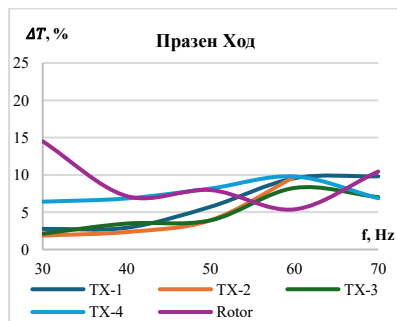


Фиг. 5-1. Стойност на относителната грешка в режим на празен ход

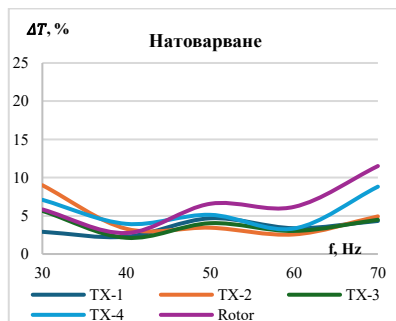


Фиг. 5-2. Стойност на относителната грешка в режим на натоварване

III. Сравнение на температурното разпределение, получено от преходния топлинен режим с експерименталните резултати.



Фиг. 5-3. Средна стойност на относителната грешка между теория и експеримент при преходен топлинен процес и празен ход на двигателя



Фиг. 5-4. Средна стойност на относителната грешка между теория и експеримент при преходен топлинен процес и натоварване на двигателя

При сравнение на данните, получени от проведените експерименти и симулираните модели, може да се определи относителната грешка за всяка една сонда. Грешката се изчислява за всяка една точка от времето. Средната стойност на грешката, за двата режима на работа, е пресметната на фиг. 5-4 и фиг. 5-5

IV. Изводи.

- При сравняване на средната стойност на относителните грешки се забелязва, че няма параметър чиято средна грешка да надвишава 8.8%.
- При изчислените стойности на грешките за температурното разпределение при стационарен установен режим се наблюдават сравнително ниски стойности, като най-големите грешки в режим на празен ход и режим на натоварване са съответно 11.5% и 16.4%.
- От изведените грешки по време на топлинния преходния процес се наблюдава, че с изключение на началото на нагревателния процес стойността на грешката в диапазона от 10 до 15%. В началото на диапазона има значителни скокове при някои изследвания, достигащи до 25%. Това се дължи на невъзможността за осигуряване на напълно еднакви начални условия при провеждане на експеримента.
- Въпреки разликите в началото на преходния процес, средната стойност на грешките за режим на празен ход и режим на натоварване не надвишават съответно 14.5% и 11.4%.
- Тези резултати дават повод да се заключи, че моделът е достатъчно адекватен за симулация на работните процеси в асинхронните двигатели и може да се използва за бъдещи пресмятания и изпитания, както на изследвания двигател, така и на други асинхронни двигатели.
- От сравнителните графики на преходните процеси, както и в Приложения 11 и 12, се забелязва, че установените температури при симулационния модел са изключително сходни до експериментално снетите. Това дава основание да се твърди, че моделът е достатъчно адекватен за изследване на стационарни топлинни процеси.
- Стойностите на пълните загуби, снети експериментално и посредством моделът са с почти еднакви стойности. На база на тези стойности, може да се заключи, че за избраната система двигател-честотен преобразувател, в изследвания честотен диапазон, висшите хармоници на тока не оказват съществено влияние върху разпределението на загубите.

ОСНОВНИ ИЗВОДИ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

- Предложената методика за симулиране на температурното поле в асинхронен двигател с накъсосъединен ротор комбинира анализ чрез Т-образна заместваща схема и топлинен модел разработен в среда на COMSOL Multiphysics.

- Т-образната заместваща схема определя синусоидално разпределение на електрическите величини, което не води до съществено изкривяване на симулационните резултати, проверено чрез сравнение на работните характеристики на машината в посочения честотен диапазон.

- Топлинният модел приложен в методиката е двумерен и не води до съществени разминавания с реалното разпределение на температурното поле в двигателя в изследвания честотен диапазон и за съответните режими на работа.

- Основният недостатък на двумерното температурно разпределение е невъзможността за проследяване на температурното поле в челните съединения.

- Забелязват се относително високи стойности на температурата в роторното тяло. Този резултат може да хвърли повече светлина в процеса на проектиране на машината и най-вече при избора на подходящи за съответния двигател лагери.

- Експерименталните изследвания установяват, че най-високите стойности на температурата са в челните съединения на машината. Този факт недвусмислено определя необходимостта от залагане на термосензори в съответната област в процеса на изработване на машината.

- При честотно управление проследяването на температурата в машината посредством термистори крие определени трудности, свързани с електромагнитни смущения генерирани в контурите на термосензорите. Това налага прилагането на филтри за премахване на генерираните смущения и редуциране на относителната грешка при измерване.

- Предложеният експериментален подход за снемане на температурното поле в ротора и методиката за симулиране на температурното поле в машината могат да се приложат и за други закони за управление на асинхронни задвижвания

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

НАУЧО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

- Разработена е подобрена методика въз основа на известни теоретични подходи, даваща възможност за определяне на температурното поле в честотно-управляем асинхронен двигател. Резултатите от изследването утвърждават предложената методика като иновативна и успешно приложима за подобряване режимите на работа на асинхронни двигатели при честоти, различни от номиналната.

- Получени са потвърдителни данни при извършен сравнителен анализ на методи за определяне на загубите в асинхронен двигател. Получени са потвърдителни данни за влиянието на източниците на топлина в двигателя от честотата на захранващото напрежение. Получени са потвърдителни данни при извършен сравнителен анализ на софтуерни решения за симулиране на полета в асинхронни двигатели.

- Генерирани са нови и подобрени модели за симулационно изследване на разпределението на температурното поле в асинхронен двигател в честотен диапазон от $30\div 70\text{Hz}$ за стационарен режим и преходен режим на нагряване. Получени са пространствени температурни разпределения в честотно – управляем асинхронен двигател за честотен диапазон $30\div 70\text{Hz}$ за стационарен и преходен режим на работа.

- Разработена е подобрена постановка за симулация работата на асинхронен двигател в софтуерна среда Comsol Multiphysics. В процеса на проектиране, а също и при действащи асинхронни двигатели е допустимо и целесъобразно параметрите и характеристиките им да се моделират и симулират с цел облекчаване или отказ от изследване в реални условия. Резултатите от изследването потвърждават, че на база на създаденото моделиране, може да се разработи реален двигател с по-добри показатели и характеристики.

ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

- Разработен е подобрен експериментален подход за изследване на температурното поле в статора и ротора на асинхронен двигател. Разработен е нов оригинален дата логер (data logger), позволяващ извеждането на информацията за температурното разпределение в двигателя в процеса на работа.

- Разработен е нов оригинален експериментален стенд за изследване на температурното поле на асинхронен двигател при различни режими на работа на двигателя и при различни честоти на захранващото напрежение.

СПИСЪК НА НАУЧНИТЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. **M. Todorov**, M. Streblau and M. Marinov, "An Approach for Investigation of the Temperature Field in a Three-Phase Asynchronous Motor," 2020 21st International Symposium on Electrical Apparatus & Technologies (SIELA), Bourgas, Bulgaria, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/SIELA49118.2020.9167139.

2. **M. Todorov**, Marinov, M., Streblau, M., Analysis of the induction motor losses and T-equivalent parameters at different frequencies, International Conference Automatics and Informatics, ICAI 2023 – Proceedings Pages 104 – 107, 2023 International Conference Automatics and Informatics, ICAI 2023 Varna, 5 October 2023, through 7 October 2023 DOI: 10.1109/ICAI58806.2023.10339069

3. **M. Todorov**, Analysis of the Induction Motor Load Characteristics at Different Frequencies, International Conference Automatics and Informatics, ICAI 2023 – Proceedings Pages 96 – 99, 2023 International Conference Automatics and Informatics, ICAI 2023 Varna, 5 October 2023, through 7 October 2023 DOI: 10.1109/ICAI58806.2023.10339089

4. **M. T. Marinov**, M. S. Marinov and M. Streblau, "Fem-Based Analysis of the Induction Motor Temperature Field at Various Supply Frequencies," 2025 19th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Sofia, Bulgaria, 2025, pp. 1-4, doi: 10.1109/ELMA65795.2025.11083497.

Abstract

Of PhD Thesis

Dissertation topic: Research on the Thermal Regimes of a Frequency-Controlled Induction Motor

Developed by Marin Todorov Marinov

Modern drive systems for induction motors primarily utilize frequency inverters to achieve speed control. Controlling induction motors through such regulators, depending on the specific control law, leads to changes not only in the frequency of the supply voltage but also in its amplitude and waveform. These variations in electrical parameters, combined with changes in the rotor's speed, can result in deviation from the normal temperature distribution within the motor.

In this PhD thesis, an approach for modeling the temperature field of an induction motor is proposed. The approach combines a classical T-equivalent circuit with a thermal Finite Element Method (FEM) model. The approach was investigated by applying it to describe the temperature field of an existing induction motor. The finite element results were simulated using COMSOL Multiphysics v5.3. To verify the accuracy of the results, a specialized experimental setup was developed to study the temperature field of an identical induction motor.