

# **ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА**

**маг. инж. Георги Димитров Желев**

## **МОДЕЛИРАНЕ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНИ ПРОЦЕСИ В ТРИФАЗНО ИНДУКЦИОННО УСТРОЙСТВО С РАЗЦЕПЕНА ФАЗА**

### **АВТОРЕФЕРАТ**

**НА ДИСЕРТАЦИЯ ЗА ПОЛУЧАВАНЕ НА  
ОБРАЗОВАТЕЛНА И НАУЧНА СТЕПЕН  
“ДОКТОР”**

**по докторска програма „Електротехнологии и нанотехнологии в електротехниката“ към професионално направление 5.2. „Електротехника, електроника и автоматика“**

**Научен ръководител:  
доц. д-р инж. Марин Славов Маринов**

**РЕЦЕНЗЕНТИ:**

1. ....
2. ....

**Варна, 2021**

**Дисертационният труд е обсъден на 22.10.2021 год. в катедра “Електротехника и електротехнологии” на катедрен съвет, съгласно заповед на Ректора на ТУ-Варна № 615 / 12.10.2021 год. и насочен за защита.**

**Докторантът работи в катедра “Електротехника и електротехнологии”.**

**Автор:** маг. инж. Георги Димитров Желев

**Заглавие:** „Моделиране на електромагнитни процеси в трифазно индукционно устройство с разцепена фаза.“

**ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА**

**Електротехнически факултет  
Катедра „Електротехника и електротехнологии“**

**маг. инж. Георги Димитров Желев**

**МОДЕЛИРАНЕ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНИ  
ПРОЦЕСИ В ТРИФАЗНО ИНДУКЦИОННО  
УСТРОЙСТВО С РАЗЦЕПЕНА ФАЗА**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**НА ДИСЕРТАЦИЯ ЗА ПОЛУЧАВАНЕ НА  
ОБРАЗОВАТЕЛНА И НАУЧНА СТЕПЕН  
“ДОКТОР”**

**Варна, 2021**

**Дисертационният труд е в обем от 148 страници, включително 94 фигури, 5 таблици, 145 уравнения и 4 приложения, оформени в 5 глави (с общите изводи) и списък на използваната литература от 105 заглавия, от които 57 на латиница.**

**Защитата на дисертационния труд ще се състои на 25.02.2022 год. от 14:00 ч. в Конферентна зала НУК на откритото заседание на жури, сформирано със заповед на Ректора № 668 / 05.11.2021 год.**

**Материалите по защитата (дисертацията, рецензиите и становищата) са на разположение на интересувашите се в Докторантския център, стая 318 НУК.**

# ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

## I. АКТУАЛНОСТ НА ПРОБЛЕМА

Устройствата за индукционно нагриване намират все по-голямо приложение в производството поради предимствата спрямо останалите начини за топлинна обработка. Като се изключи приложението на еднофазните индукционни устройства, намерили широко приложение в битовите електроуреди, в различни отрасли на промишлеността като стоманодобивната и металообработващата широко приложение намират трифазните индукционни уредби за топлинна обработка. Към момента много производители предлагат различни по конструкция трифазни индукционни уредби, които в зависимост от приложението им се изработват за работа с различни токове, напрежения, честоти, мощности и начини на свързване.

Използваните в практиката индукционни устройства за топлинна обработка често се предлагат за работа с параметри на напрежението, различни от промишлените. Техните хранящи блокове включват различни по вид и принцип на действие филтри, инвертори и преобразуватели.

Основен проблем при трифазните индукционни устройства с радиално разположение на индукторите е наличието на въртящо се магнитно поле. В определени процеси за термична обработка, където неподвижността на детайла не е необходимо условие (като повърхностна обработка на детайли и топене) това не представлява съществен проблем (даже е желателно), но при обработка на малки детайли, особено когато детайла е разположен върху индукторите, въртящото се магнитно поле е нежелателно явление.

## II. ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Цел на дисертационната работа е моделиране на електромагнитните процеси в трифазно индукционно устройство със специфична конструкция, изразена в разцепване на една от фазите, в режим на празен ход и под товар.

За осъществяване на поставената цел е необходимо да се решат следните задачи:

- Електромагнитно изчисляване при условия за симетрия на токовете в трите фази – пресмятане на магнитните проводимости между ядрата, броя на навивките на неразцепените и разцепената фази, собствените индуктивности на всяка от бобините и тока на празен ход;
- Изследване на трифазното индукционно устройство при работа в режим на празен ход – пресмятане на токовете без отчитане и с отчитане на загубите в магнитопровода и намотките, отчитане на общите загуби

и влиянието на броя на навивките на разцепената фаза върху симетрията на токовете;

- Създаване на триизмерен геометричен модел и изследване на електромагнитното поле в устройството в режим на празен ход;
- Изследване на трифазното индукционно устройство при работа в режим под товар – теоретично изследване на електромагнитните процеси в устройството, създаване на триизмерен геометричен модел и изследване на разпределението на електромагнитното поле в устройството и товара;
- Извършване на експериментални изследвания в режим на празен ход и под товар за оценка адекватността на създадените геометрични модели.

### **III. ОБЕКТ НА ИЗСЛЕДВАНЕ**

Обект на изследване е трифазно индукционно устройство с разцепена фаза. Конструкцията на устройството представлява магнитопровод с четири явно изразени ядра, върху които са поставени бобини.

Проведени са теоретични и експериментални изследвания на посоченото устройство в режим на празен ход и под товар, представляващ метален диск, поставен върху магнитопровода и бобините.

### **IV. ПРЕДМЕТ И МЯСТО НА ИЗСЛЕДВАНЕ**

Предмет на изследването е електромагнитното поле в трифазното индукционно устройство с разцепена фаза в режим на празен ход и под товар, както и разпределение на електромагнитното поле в товара.

Теоретичните и експерименталните изследвания, описани в дисертационната работа, са проведени в Технически Университет – Варна.

### **V. МЕТОДИ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ**

За решаване на поставените задачи и постигане на целта са използвани:

- теоретични изследвания, основани на математическо моделиране;
- теоретични изследвания, основани на компютърни симулации;
- експериментални изследвания в лабораторни условия;
- съпоставяне на теоретичните и експерименталните изследвания с цел оценка адекватността на моделирането по отношение на основните положения в дисертационния труд.

## VI. НАУЧНА И ПРАКТИЧЕСКА НОВОСТ

Към момента на завършване на дисертационния труд няма достатъчно научни изследвания и приложни примери по разгледаната тема. Причините за това са няколко – специфичната особеност на конструкцията, изразена в броя и разположението на бобините, липса на пряка методика за оразмеряване и широко приложение в практиката на трифазни индукционни устройства с разположение и вид на намотките, различни от изследваната в дисертационния труд конструкция.

В настоящата дисертационна работа като научна и практическа новост може да се посочи:

- Извършено е оразмеряване на трифазното индукционно устройство и електромагнитно изчисляване при условие за симетрия на токовете в трите фази;
- Съобразно теоретичните пресмятания е изработен експериментален модел на устройството, позволяващ нагряване на дискови и цилиндрични детайли;
- Разработена е методика и са пресметнати токовете в трите фази с отчитане на загубите в магнитопровода и намотките;
- Създадени са геометрични триизмерни модели на трифазното индукционно устройство с помощта на програмните продукти *SolidWorks* и *COMSOL MULTIPHISICS*;
- Моделирани са електромагнитните процеси в трифазно индукционно устройство с разцепена фаза в програмна среда на *COMSOL MULTIPHISICS*.

## VII. РЕАЛИЗАЦИЯ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

Към настоящия момент няма внедряване на получените резултати.

## VIII. АПРОБАЦИЯ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

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

- Годишник на Технически университет – Варна, том I, 2014 год.;
- 2016 19<sup>th</sup> International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), индексирана в SCOPUS;
- International scientific symposium – Electrical power engineering 2016 (EPE 2016);
- 2017 15<sup>th</sup> International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), индексирана в SCOPUS;

- 2018 20<sup>th</sup> International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), индексирана в SCOPUS;
- 2019 16<sup>th</sup> Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), индексирана в SCOPUS.

## **IX. ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД**

Резултатите от дисертационната работа са представени в 6 публикации, една от които самостоятелна, а останалите в съавторство. Пет от статиите са представени в три международни симпозиума, два от които са индексирани в SCOPUS.

1. Маринов М., Желев Г., Магнитни проводимости на трифазно индукционно устройство под товар, Годишник на Технически университет – Варна, том I, стр.85 – 88, 2014 г.
2. Marinov M., Zhelev G., An approach accounting for the losses in a three-phase induction device, 2016 19<sup>th</sup> International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), pp.211 – 214, 29 May – 1 June 2016, Bourgas.
3. Zhelev G., Studying the effects of the number of turns in a split phase over the current in a three-phase induction device, International scientific symposium – Electrical power engineering 2016, pp. 138-141, 6 – 8 October 2016, Varna.
4. Zhelev G., Marinov M., Streblau M., Studying the magnetic field of three-phase induction device with split-phase, 2017 15<sup>th</sup> International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), pp. 439 – 443, 1 – 3 June 2017, Technical University of Sofia.
5. Zhelev G., Marinov M., Streblau M., Distribution of the electromagnetic field in a metal disc, located on a three-phase induction device, 2018 20<sup>th</sup> International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), pp. 504 – 507, 3 - 6 June 2018, Bourgas.
6. Zhelev G., Marinov M., Streblau M., Electromagnetic Processes in a Three-Phase Induction Device Under Load, 2019 16<sup>th</sup> Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), pp. 625 – 628, 6-8 June 2019, Varna.

## **X. СТРУКТУРА И ОБЕМ НА ДИСЕРТАЦИЯТА**

Дисертационният труд е с обем от 147 страници, включително 94 фигури, 5 таблици, 145 уравнения, списък на използваната литература от 105 заглавия, от които 57 на латиница и 4 приложения. Основният текст е изложен на 139 страници и се състои от съдържание, увод, пет глави със заключението за получените резултати, библиография и списък на публикациите по темата на дисертационния труд.



# **XI. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД**

## **1. УВОД**

Индукционното нагряване е метод за безконтактно нагряване на електропроводими материали. Процесът е лесно контролируем, енергоспестяващ и пренася високи мощности без въглеродни емисии. В сравнение с конвенционалните методи за нагряване притежава съществени предимства като възможност за пълно автоматизиране на процеса, висок коефициент на полезно действие, възможност за регулиране дълбочината на закаляване и др.

Индукционното нагряване намира широко приложение в металургията и машиностроенето при металообработващи операции като закаляване, отгряване, точково заваряване, особено когато загряваният материал е със значителни размери. Използва се също така при заваряване, запояване, нанасяне на защитни покрития, топене на метали и др.

Използваните устройствата за индукционно нагряване на промишлена честота могат да бъдат както еднофазни, така и трифазни.

Основен проблем при трифазните индукционни устройства с радиално разположение на индукторите е наличието на въртящо се магнитно поле. По тази причина в настоящата работа е предложено трифазно индукционно устройство със специфична конструкция, което елиминира този проблем.

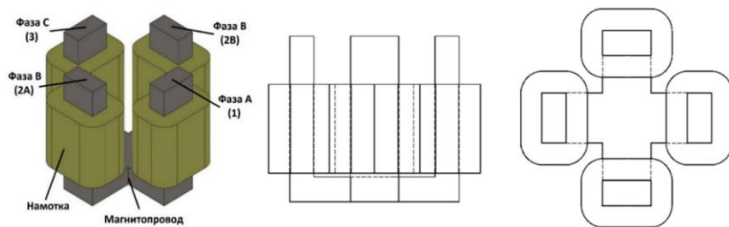
В настоящата работа се изследват и моделират електромагнитните процеси в трифазно индукционно устройство, при което една от фазите се състои от две еднакви срещуположно разположени и последователно свързани бобини (разцепена фаза).

## **2. ГЛАВА I. Литературен обзор**

В първа глава са описани физичните свойства на процеса индукционно нагряване, представена е класификация на видовете устройства за индукционно нагряване и е извършен сравнителен анализ на съществуващите към момента трифазни индукционни устройства. Класифицирани са методите за определяне на магнитните проводимости, извършен е сравнителен анализ на използваните към момента програмни продукти за моделиране и са изведени основни изводи от извършения литературен обзор. В края на литературния обзор са формулирани целите и задачите на дисертационният труд.

Описанието на физичните свойства на процеса индукционно нагряване включва описание на начина на индуциране на напрежение в заготовката, разпределението на плътността на тока в напречното сечение на заготовката и дълбочината на проникване в зависимост от честотата на напрежението.

Представената класификация на видовете устройства за индукционно нагриване включва видовете индуктори в зависимост от тяхната форма, предназначение, режим на работа, запазващо напрежение и честота. Извършен е сравнителен анализ на съществуващите към момента трифазни индукционни устройства. Описанието на трифазното индукционно устройство с разцепена фаза (Фиг. 2-1) дава детайлна информация относно конструкцията, спецификата и схемите за свързване на устройството към трифазна мрежа.



Фиг. 2-1. Геометричен модел на трифазното индукционно устройство

Описанието на методите за определяне на магнитните проводимости включва класификация на методите за изчисляване на магнитни проводимости, математическо описание на процеса индукционно нагриване, видовете гранични условия и описание на метода на крайните елементи.

Сравнителния анализ на програмните продукти за моделиране включва описание на възможностите, предимствата и недостатъците на различни програмни продукти.

Формулираните изводи от литературния анализ включват изводи относно съществуващите индукционни устройства, методите за определяне на магнитните проводимости и програмните продукти за моделиране и анализ на електромагнитни полета.

В края на литературния обзор са формулирани целта на дисертационната работа и задачите, които трябва да бъдат решени за да се осъществи поставената цел.

## 2.1. Изводи от извършения литературен анализ

### а) *Изводи относно съществуващите индукционни устройства*

- Повечето индукционни устройства са еднофазни. Приложението на трифазни устройства е насочено предимно към индукционни устройства за топене на метали, обемна и повърхностна термична обработка на детайли;

- Почти всички разгледани индукционни устройства работят на честота, различна от промишлената, което налага използването на преобразуватели, изправители, инвертори и др. електронни устройства за промяна на напрежението и неговата честота;
- Патентовани са схеми на индукционни устройства, които представляват мощен еднофазен товар, свързан към трифазна мрежа с помощта на статични симетриращи (балансиращи) устройства. Основен недостатък на такъв тип схеми е, че по време на работа се променя мощността и фактора на мощността, което води до несиметрия на токовете и напреженията;
- Основен недостатък на трифазните индукционни устройства с плоски линейни индуктори е неравномерното разпределяне на температурата по повърхността на обработвания детайл. При обработване на детайли с по-големи размери се налага изработване на индукторите от отделни секции и различен начин на свързване на отделните бобини (съпосочно и противоположно) с цел дефазиране;
- Недостатък на известните устройства за индукционно нагряване, използващи въртящо или бягащо магнитно поле, е появата на големи електромагнитни сили, действащи върху обработваните детайли, което налага използването на допълнителни устройства за задържане на детайлите в работната зона на нагряване. Друг недостатък е прегряване на ръбовете на заготовките в сравнение с централната зона;
- Основните предимства на предложеното в настоящата разработка трифазно индукционно устройство с разцепена фаза са неговата компактност, възможността да работи на промишлена честота, като се елиминира въртящото магнитно поле и липсата на необходимост от допълнителни електронни устройства като преобразуватели, инвертори, изправители и др. за промяна на стойността на захранващото напрежение и неговата честота.

#### ***b) Изводи относно методите за определяне на магнитните проводимости***

След краткия анализ на методите за определяне на магнитните проводимости и тяхното приложение може да се каже, че към момента най – голямо приложение е намерил метода на крайните елементи. Той се използва във всички разгледани програмни продукти и това е една от причините за прилагането му в настоящата разработка.

#### ***c) Изводи относно програмните продукти за моделиране и анализ на електромагнитните полета***

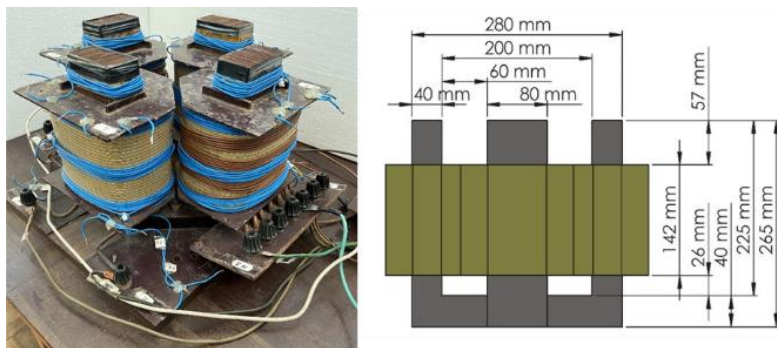
След извършения сравнителен анализ възможностите на програмния продукт *COMSOL Multiphysics* са оказват най – подходящи за решаване на нелинейна електромагнитна задача, поради възможността за създаване на нестандартни триизмерни геометрични модели, приложението на метода на крайните

елементи и сравнително интуитивния интерфейс на програмата. Възможността на програмния продукт за импортиране (вносяне или въвеждане) на геометрични модели от други програмни продукти като *SolidWorks*, *AutoCad*, *Creo* и др. също е голямо предимство.

### 3. ГЛАВА II. Оразмеряване на трифазното индукционно устройство. Електромагнитно изчисляване при условие за симетрия на токовете в трите фази

Втора глава включва: подробно описание на трифазното индукционно устройство с разцепена фаза; пресмятане на магнитните проводимости между ядрата, броя на навивките на бобините на неразцепените и разцепената фаза, собствената индуктивност на всяка бобина, реактивното индуктивно съпротивление на трите фази, тока на празен ход на трите фази и минималното сечение на проводника. В края на главата е извършен кратък анализ и са формулирани съответните изводи.

В настоящата дисертационна работа е разгледано трифазно индукционно устройство с разцепена фаза. На Фиг. 3-1 е показано изработеното за целта устройство и геометричен модел, създаден с помощта на програмен продукт за триизмерно моделиране *SolidWorks*, на който са показани неговите размери.



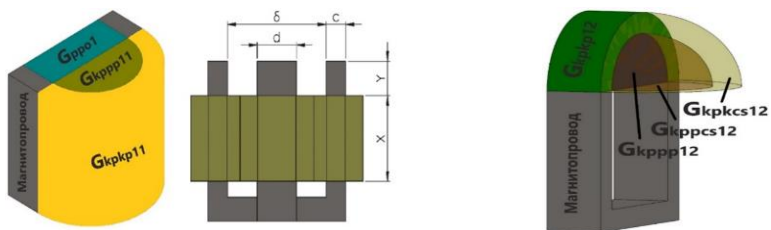
Фиг. 3-1. Геометричен модел и размери на трифазното индукционно устройство

Специфичната особеност на конструкцията, изразяваща се в броя и разположението на бобините и липсата на пряка методика за оразмеряване, създава необходимост за приемане на определени допускания, свързани с:

- размерите на напречното сечение на магнитопровода – приема се да се изработи с размери 80 x 40 mm;
- четирите бобини да обхващат част от ядрата, което би позволило поставянето на товар, както над ядрата, така и между тях.

### 3.1. Сумарна магнитна проводимост между срещуположните ядра

Магнитната проводимост между срещуположните ядра се пресмята като сума от основната проводимост и две крайни проводимости между и над ядрата. Магнитното поле в случая е разделено на отделни геометрични фигури. Основната магнитна проводимост между срещуположните ядра е представена с помощта на геометрична фигура, представляваща правоъгълник, а двете крайни проводимости – съответно плътен и кух полуцилиндър (Фиг. 3-2). Магнитната проводимост над срещуположните ядра е представена с помощта на четири геометрични фигури – с плътен и кух полуцилиндър, както и с плътна и куха четвърт сфера.



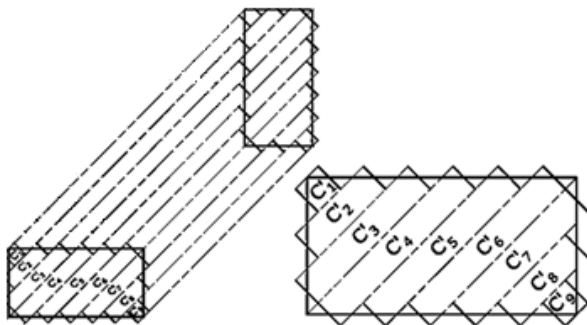
магнитна проводимост между ядрата

магнитна проводимост над ядрата

Фиг. 3-2. Магнитна проводимост между и над срещуположните ядра

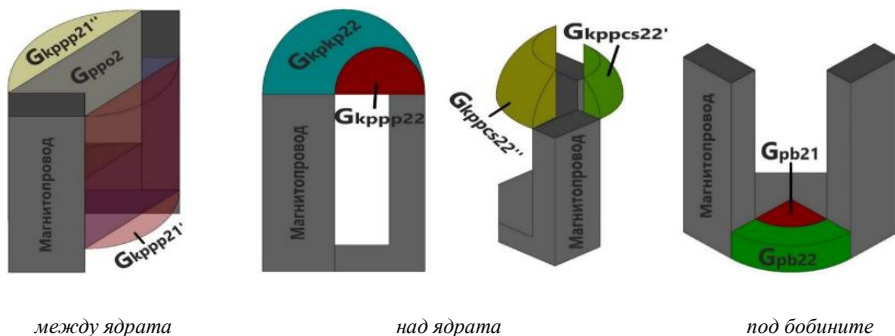
### 3.2. Сумарна магнитна проводимост между съседните ядра

Сумарната магнитна проводимост между съседните ядра включва освен магнитната проводимост между и над ядрата и магнитната проводимост под бобините. За да се пресметнат по-точно проводимостите между съседните ядра, магнитната верига се разбива на участъци съгласно Фиг. 3-3. Магнитната проводимост между съседните ядра, схематично показана на Фиг. 3-4, се пресмята по абсолютно същия начин както при срещуположните с тази разлика, че тук се пресмята и магнитната проводимост под бобините.



Фиг. 3-3. Участъци на магнитната верига между съседните ядра

В случая магнитната проводимост между съседните ядра е представена като една основна проводимост, показана на Фиг. 3-4 и две краеви проводимости (външна и вътрешна), представени чрез геометрични фигури на пътен полуцилиндър. Магнитната проводимост над съседните ядра е представена като две краеви проводимости, изразени с помощта на пътен и кух полуцилиндър и две краеви проводимости (външна и вътрешна), асоциирани с геометричната фигура на пътна четвърт сфера.



Фиг. 3-4. Магнитна проводимост между и над съседните ядра и под бобините

Магнитната проводимост между съседните ядра под бобините е представена като две краеви проводимости (вътрешна и външна), изразени чрез геометричните фигури на пътен и кух четвърт цилиндър (Фиг. 3-4).

### 3.3. Пресмятане броя на навивките на бобините на неразцепените фази

Минималният брой навивки на неразцепените фази е:

$$w_{1min} = \frac{U_{LL}}{4,44 \cdot f \cdot B_{st} \cdot S_{mc}} = 411,5 \quad (3-1)$$

където  $S_{mc} = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$  е площ на магнитопровода;

$f = 50 \text{ Hz}$  – честота на захранващото напрежение;

$U_{LL} = 380 \text{ V}$  – стойност на линейното захранващото напрежение;

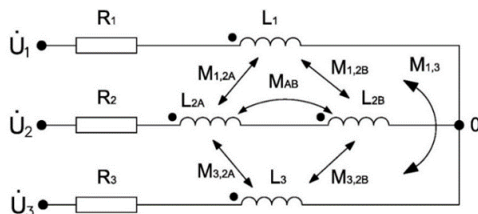
$B_{st} = 1,3 \text{ T}$  – магнитна индукция в стоманата.

За да се избегне насищането на системата при евентуално повишаване на захранващото напрежение, броят на навивките на бобините на неразцепените фази се избира:

$$w_1 = 420 \text{ навивки} \quad (3-2)$$

### 3.4. Пресмятане броя на навивките на бобините на разцепената фаза

Пресмятането броя на навивките на бобините на разцепената фаза има за цел бобините да бъдат оразмерени така, че в режим на празен ход трифазното индукционно устройство да консумира от мрежата симетрична система от токове. За пресмятане броя на навивките при съпосочно и противопосочно свързване на намотките на разцепената фаза, като устройството е свързано към трифазна електрическа мрежа в схема звезда, е съставена заместваща електрическа схема, показана на Фиг. 3-5.



Фиг. 3-5. Заместваща електрическа схема на трифазното индукционно устройство с разцепена фаза

Параметрите по Фиг. 3-5 са както следва:

$R_1, R_2, R_3$  – активни съпротивления на трите фази, отразяващи загубите в медта (активните проводници) и загубите в стоманата от вихрови токове и хистерезис;

$L_1, L_3$  – собствена индуктивност на бобините на неразцепените фаза А и фаза С;

$L_{2A}, L_{2B}$  – собствена индуктивност на всяка от бобините на разцепената фаза В;

$M_{AB}$  – взаимна индуктивност между бобините на фаза В;

$M_{1,3}$  – взаимна индуктивност между бобините на фаза А и фаза С;

$M_{1,2A}$  – взаимна индуктивност между бобината на фаза А и първата бобина на фаза В;

$M_{1,2B}$  – взаимна индуктивност между бобината на фаза А и втората бобина на фаза В;

$M_{3,2A}$  – взаимна индуктивност между бобината на фаза С и първата бобина на фаза В;

$M_{3,2B}$  – взаимна индуктивност между бобината на фаза С и втората бобина на фаза В.

Системата уравнения, описващи електромагнитните процеси, без включени загуби в медта и стоманата има вида:

$$\begin{aligned}
\dot{U}_1 &= j \cdot \omega \cdot L_1 \cdot \dot{I}_1 + j \cdot \omega \cdot M_{1,2A} \cdot \dot{I}_2 + j \cdot \omega \cdot M_{1,2B} \cdot \dot{I}_2 + j \cdot \omega \cdot M_{1,3} \cdot \dot{I}_3 \\
\dot{U}_2 &= j \cdot \omega \cdot L_{2A} \cdot \dot{I}_2 + j \cdot \omega \cdot L_{2B} \cdot \dot{I}_2 + 2 \cdot j \cdot \omega \cdot M_{AB} \cdot \dot{I}_2 + j \cdot \omega \cdot M_{1,2A} \cdot \dot{I}_1 + \\
&+ j \cdot \omega \cdot M_{1,2B} \cdot \dot{I}_1 + j \cdot \omega \cdot M_{3,2A} \cdot \dot{I}_3 + j \cdot \omega \cdot M_{3,2B} \cdot \dot{I}_3 \\
\dot{U}_3 &= j \cdot \omega \cdot L_3 \cdot \dot{I}_3 + j \cdot \omega \cdot M_{3,2A} \cdot \dot{I}_2 + j \cdot \omega \cdot M_{3,2B} \cdot \dot{I}_2 + j \cdot \omega \cdot M_{1,3} \cdot \dot{I}_1
\end{aligned} \tag{3-3}$$

Където:

$j = \sqrt{-1}$  – имагинерна единица;

$\dot{I}$  – комплексна ефективна стойност на тока (комплекс на синусоидалния ток);

$\dot{U}$  – комплексна ефективна стойност на напрежението;

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$  е кръгова честота.

Решението на системата уравнения при условие за равенство на импедансите на трите фази ( $\dot{Z}_1 = \dot{Z}_2 = \dot{Z}_3$ ) и съпосочно свързване на бобините на разцепената фаза след приравняване на реалните и имагинерните части има вида:

$$\begin{aligned}
2 \cdot L_2 + 2 \cdot M_{AB} - M &= L_3 - \frac{1}{2} \cdot M_{1,3} \\
-\sqrt{3} \cdot M &= -\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot M_{1,3}
\end{aligned} \tag{3-4}$$

За броя на навивките на бобините на разцепената фаза се получава:

$$\begin{aligned}
w_1^2 \cdot G_{ppp1} - 2 \cdot w_2^2 \cdot G_{ppp2} - 2 \cdot w_2^2 \cdot G_{pp1} &= 0 \\
w_2 &= w_1 \cdot \sqrt{\frac{G_{ppp1}}{2 \cdot (G_{ppp2} + G_{pp1})}} = w_1 \cdot 0,578
\end{aligned} \tag{3-5}$$

Съгласно избраният брой навивки на неразцепените фази (3-2) за пресметнатия брой навивки  $w_{2,0}$  се получава  $w_{2,0} = 247,8$  навивки.

За избягване насищането на системата при евентуално повишаване на захранващото напрежение, броят на навивките на бобините на разцепената фаза е избран:

$$w_2 = w_{2A} = w_{2B} = 260 \text{ навивки} \tag{3-6}$$

Решението на системата уравнения при спазване на горното условие за равенство на импедансите на трите фази и противопосочно свързване на бобините на разцепената фаза след приравняване на реалните и имагинерните части е показано на (3-7). Системата няма решение, което означава, че симетрия на токовете при противопосочно свързване не може да има.

$$\begin{aligned}
2 \cdot L_2 - 2 \cdot M_{AB} &= L_3 - \frac{1}{2} \cdot M_{1,3} \\
-\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot M_{1,3} &= 0
\end{aligned} \tag{3-7}$$



С оглед на така направените изчисления и с цел универсалност, при изработване на експерименталния модел на устройството намотките на разцепената фаза са изработени от шест отделни секции. Комбинациите на свързване на отделните секции определят общия брой навивки на всяка от бобините. На Фиг. 3-6 е показана една от бобините на разцепената фаза с изводите на шестте секции.



Фиг. 3-6. Бобина на разцепената фаза с изводите на шестте секции и брой на навивките между изводите

След пресмятане на броя на навивките на бобините на неразцепените и разцепената фази са пресметнати собствената индуктивност на всяка бобина, реактивното индуктивно съпротивление на трите фази, тока на празен ход и минималното сечение на проводника.

### 3.5. Анализ и изводи към втора глава

- При противоположно свързване симетрия на токовете не може да има, тъй като в едната част на уравнение (3-7) липсва имагинерна част;
- Независимо от това, че схемата на свързване на устройството е звезда, необходимо е да се отбележи, че то е оразмерено за работа с линейно напрежение;
- Съобразно теоретичните пресмятания е изработен експериментален модел на устройството, позволяващ нагряване на дискови и цилиндрични детайли.

## 4. ГЛАВА III. Изследване на трифазното индукционно устройство при работа в режим на празен ход

В трета глава е описано изследването на трифазното индукционно устройство при работа в режим на празен ход, което включва: пресмятане на токовете в трите фази и нулевия проводник с и без отчитане на загубите в магнитопровода и намотките; изследване изменението на токовете в трите фази и нулевия проводник в зависимост от броя на навивките на разцепената фаза

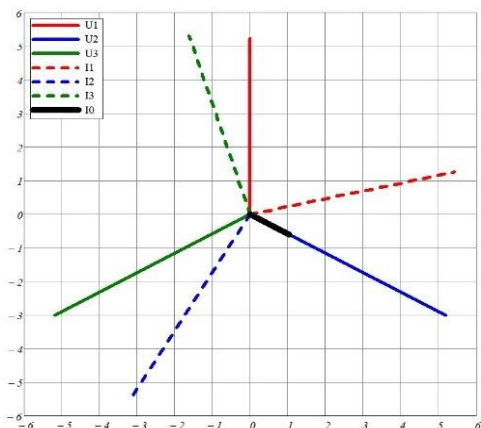
и изследване на електромагнитното поле в режим на празен ход. В края на главата е извършен кратък анализ и са формулирани съответните изводи.

#### **4.1. Пресмятане на токовете с и без отчитане на загубите в магнитопровода и намотките. Отчитане на загубите в трифазното индукционно устройство с разцепена фаза**

В Глава II са пресметнати сумарните магнитни проводимости между срещуположните и съседните ядра, еквивалентната магнитна проводимост на всяка една от фазите както и е определен броя на навивките на бобините на разцепената и неразцепените фази. Това позволява да се пресметнат собствените и взаимни индуктивности на бобините на трите фази.

След пресмятане на собствените и взаимни индуктивности са пресметнати токовете в трите фази и нулевия проводник по показаната на Фиг. 3-5 заместваща схема и съставената система уравнения (3-3). Получени са еквивалентните стойности на токовете в трите фази и нулевия проводник, без отчитане на загубите в магнитопровода.

На Фиг. 4-1 е показана векторна диаграма, изобразяваща дефазирането на токовете от напреженията и тока в нулевия проводник без отчитане на загубите в магнитопровода и намотките.



Фиг. 4-1. Дефазиране на токовете от напреженията без отчитане на загубите в магнитопровода и намотките

Следва пресмятане на токовете с отчитане на загубите в магнитопровода и намотките. За целта са пресметнати максималните и ефективните стойности на магнитната индукция за трите фази, амплитудните стойности на магнитния поток, загубите от вихрови токове и хистерезис, общите загуби в стоманата и

електрическите съпротивления, отчитащи загубите в стоманата и медния проводник.

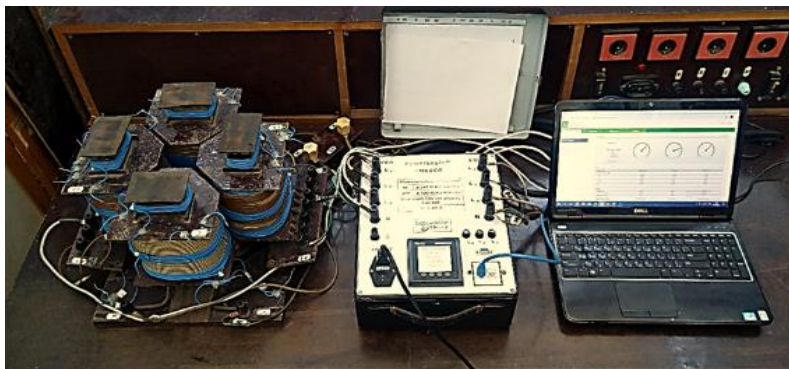
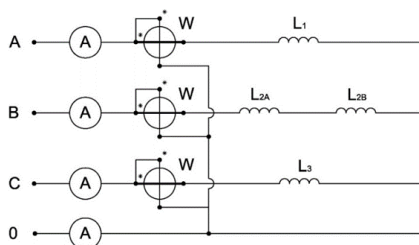
От заместващата електрическа схема, показана на Фиг. 3-5, е съставена система уравнения, описващи електромагнитните процеси с включени загуби в стоманата и медта:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= (R_1 + j \cdot \omega \cdot L_1) \cdot \dot{I}_1 + 2 \cdot j \cdot \omega \cdot M \cdot \dot{I}_2 + j \cdot \omega \cdot M_{1,3} \cdot \dot{I}_3 \\ \dot{U}_2 &= 2 \cdot j \cdot \omega \cdot M \cdot \dot{I}_1 + (R_2 + 2 \cdot j \cdot \omega \cdot \dot{I}_2 \cdot (L_2 + M_{A,B})) + 2 \cdot j \cdot \omega \cdot M \cdot \dot{I}_3 \\ \dot{U}_3 &= j \cdot \omega \cdot M_{1,3} \cdot \dot{I}_1 + 2 \cdot j \cdot \omega \cdot M \cdot \dot{I}_2 + (R_3 + j \cdot \omega \cdot L_3 \cdot \dot{I}_3) \end{aligned} \quad (4-1)$$

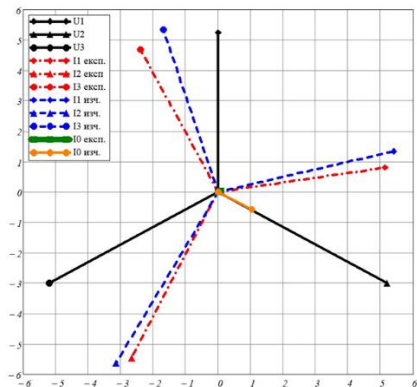
След решаване на системата уравнения са получени еквивалентните стойности на токовете в трите фази и нулевия проводник.

За оценка на получените теоретични резултати относно токовете в трите фази са проведени експериментални изследвания. Използван е комбиниран измервателен уред *PowerLogic* серия *PM5560* на фирмата *Schneider* (Фиг. 4-2).

С цел сравняване на резултатите от теоретичните пресмятания и експерименталните изследвания, на Фиг. 4-3 е показана векторната диаграма на дефазирването на токовете от напреженията и тока в нулевия проводник.



Фиг. 4-2. Схема на опитната постановка с измервателно устройство Schneider PowerLogic PM5560



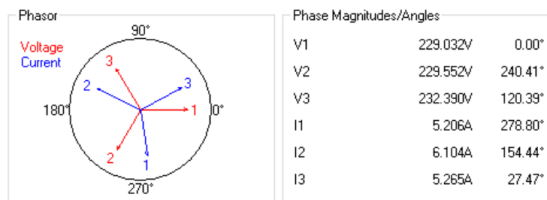
Фиг. 4-3. Дефазирание на тока в трите фази и нулевия проводник и напреженията с отчитане на загубите в магнитопровода и намотките

#### 4.2. Експериментални изследвания в режим на празен ход

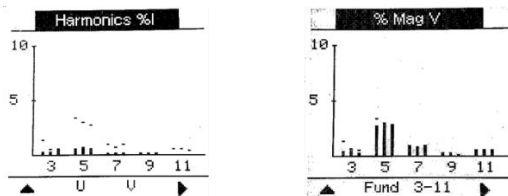
С описаната до момента методика е извършено пресмятане на токовете в трите фази и нулевия проводник при различен брой навивки на бобините на разцепената фаза. Токът в нулевия проводник е представен като сума от реалните и имагинерните части на токовете в трите фази.

За оценка на получените теоретични резултати са проведени експериментални изследвания без поставен метален диск върху устройството. Измерванията се извършват чрез промяна на броя на навивките на намотките на разцепената фаза. С помощта на измервателното устройство *Schneider PowerLogic PM5560* и съответното програмно обезпечаване към него, се измерват параметрите на електрическата енергия след всяка промяна на броя на навивките на разцепената фаза. По този начин се установява броят на навивките в разцепената фаза, при който се получава симетрия на токовете. Извършени са дванадесет измервания, всяко от които при различен брой навивки – 440, 420, 400, 330, 310, 300, 290, 280, 260, 230, 210 и 190. На Фиг. 4-2 е показана реалната опитна постановка и нейната заместваща схема. Получените резултати от експерименталните изследвания при различен брой навивки на бобините на разцепената фаза дават информация във вид на числени стойности и векторни диаграми относно токовете, напреженията, мощностите и фактора на мощността. На Фиг. 4-4 е показана примерна векторна диаграма с част от резултатите, а на Фиг. 4-5 са показани резултатите от експерименталните изследвания в режим на празен ход, представени в графичен вид.

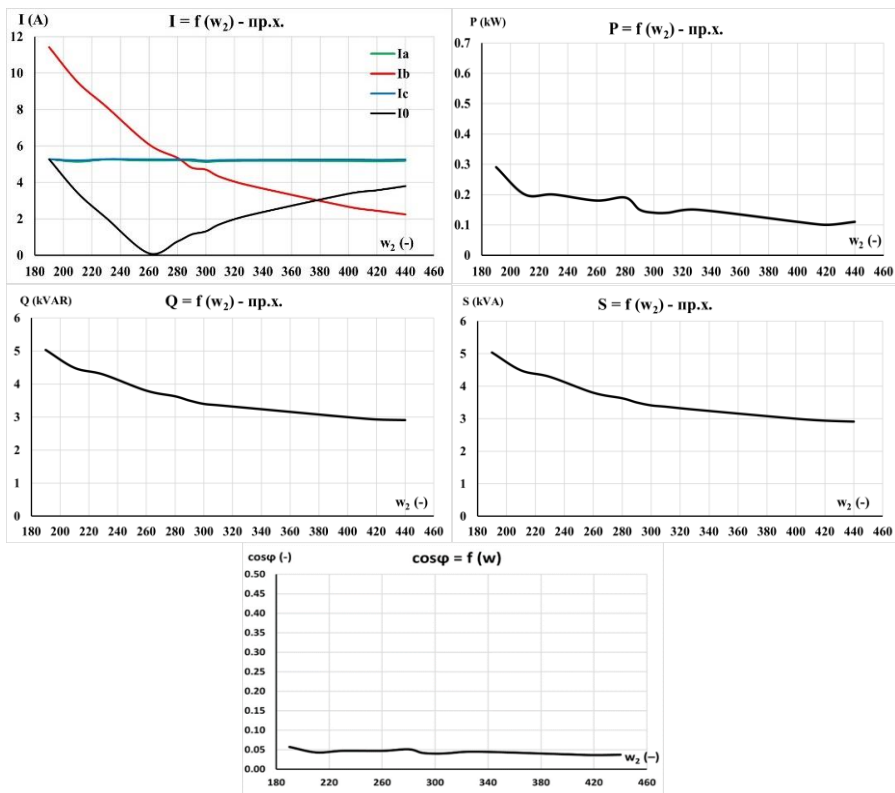
На Фиг. 4-6 са показани в графичен вид резултатите от извършените теоретични и експериментални изследвания на тока в нулевия проводник.



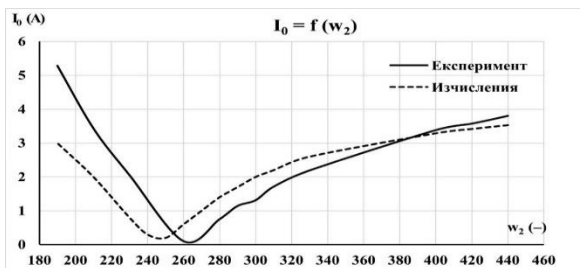
$I_0 = 0,1 \text{ A}$   
 Дефазирани между ток  
 и напрежение:  
 $\angle\phi_1 = 81,20^\circ$   
 $\angle\phi_2 = 85,97^\circ$   
 $\angle\phi_3 = 92,92^\circ$



Фиг. 4-4. Дефазирани на тока в трите фази и нулевия проводник и напреженията с отчитане на загубите в магнитопровода и намотките



Фиг. 4-5. Графичен вид на резултатите от експерименталните изследвания в режим на празен ход

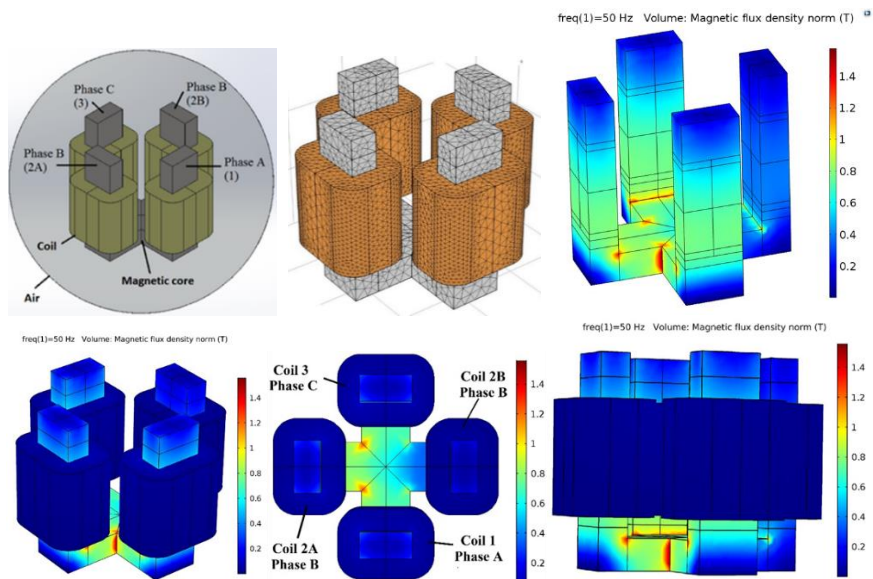


Фиг. 4-6. Ток в нулевия проводник в режим на празен ход

### 4.3. Изследване на електромагнитното поле в трифазното индукционно устройство с разцепена фаза в режим на празен ход

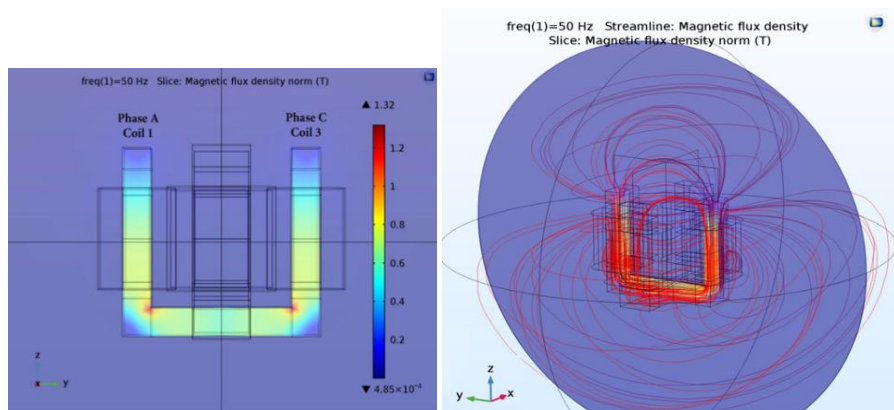
Изследването е свързано с получаване на картина на електромагнитното поле на предложеното устройство, използвайки високоефективни числени методи за анализ, базирани на метода на крайните елементи. Изследването е насочено към режима на празен ход, с цел установяване на изходното разпределение на магнитното поле.

Теоретичното изследване на магнитното поле на трифазното индукционно устройство с разцепена фаза е извършено с помощта на софтуерния продукт за тримерно моделиране *COMSOL MULTIPHYSICS 5.2a*. На Фиг. 4-7 е представен геометричния модел на трифазното индукционно устройство.



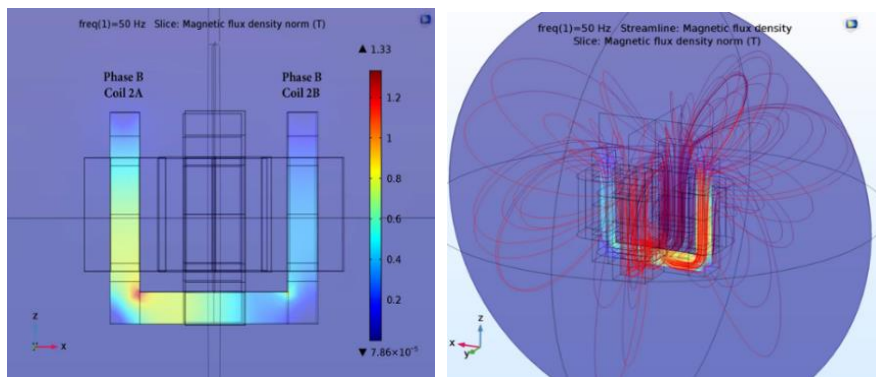
Фиг. 4-7. Геометричен модел на трифазното индукционно устройство, тримерен модел с мрежа и разпределението на магнитната индукция в режим на празен ход

На Фиг. 4-8 е показана големината на магнитната индукция в магнитопровода между ядрата на неразцепените фаза 1 (фаза А) и фаза 3 (фаза С) и разпределението на магнитния поток в пространството. Вижда се, че магнитното поле е симетрично, като най-голяма е магнитната индукция в основата на ядрата.



Фиг. 4-8. Магнитна индукция в магнитопровода между ядрата и разпределение на магнитния поток на неразцепените фази

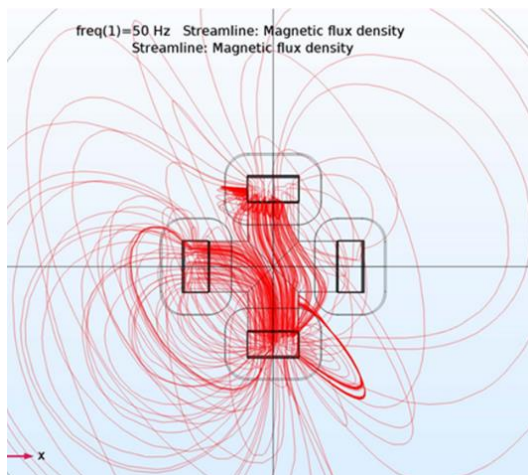
Подобно изследване е направено и за разцепената фаза 2 (фаза В), като резултатите са показани на Фиг. 4-9. Прави впечатление, че в този случай полето не е симетрично, въпреки, че сечението на ядрата е еднакво и броя навивки на бобините също е еднакъв.



Фиг. 4-9. Магнитна индукция в магнитопровода между ядрата и разпределение на магнитния поток на разцепените фаза

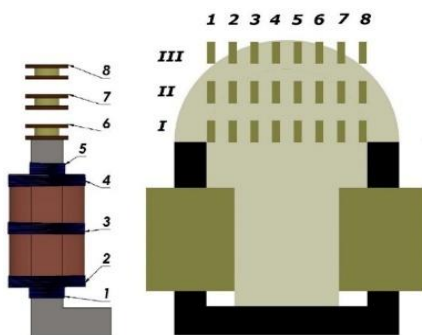
Пълната картина на магнитното поле над ядрата е показана на Фиг. 4-10.





Фиг. 4-10. Разпределение на магнитно поле над ядрата

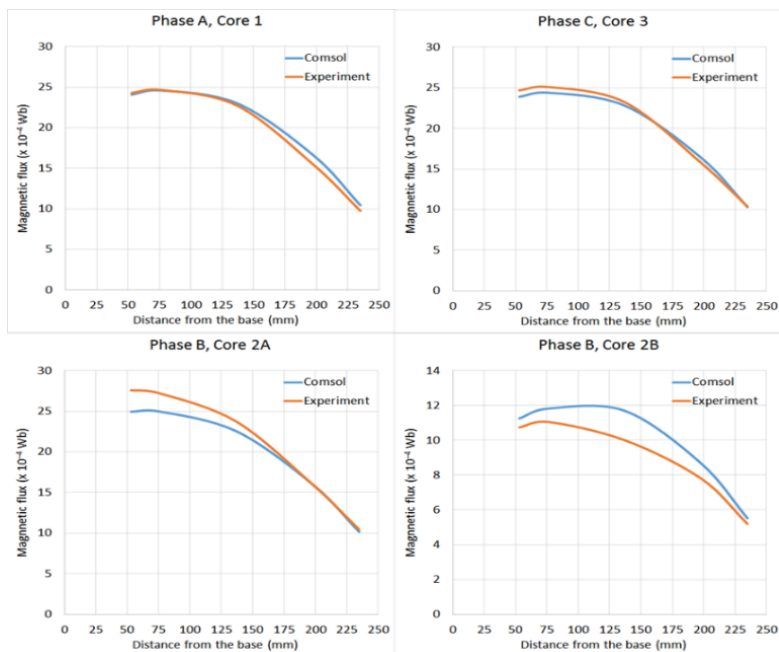
За оценка на адекватността на модела са проведени експериментални изследвания върху реалното трифазно индукционно устройство. За отчитане стойността на магнитното поле в ядрата и около намотките са заложили по пет сонди с по 10 навивки всяка, съгласно Фиг. 4-11. Разпределението на магнитното поле над ядрата и между тях е изследвано с подвижна сонда с 40 навивки.



Фиг. 4-11. Разположение на сондите върху магнитопровода и бобините

На Фиг. 4-12 е показано теоретичното разпределение на магнитната индукция по височина за всяко от ядрата. За сравнение на същите графики са показани и резултатите от експерименталните изследвания.





Фиг. 4-12. Резултати от теоретичното и експерименталното изследване

#### 4.4. Анализ и изводи към трета глава

- Получените резултати от теоретичното и експерименталното изследване на магнитното поле на трифазното индукционно устройство с разцепена фаза показват, че математичния модел с достатъчна точност описва магнитното поле в разглежданото устройство (средната стойност на грешката е 4,2%, а максималната грешка не надхвърля 15%);
- Ъглите на дефазирание между токовете и напреженията са близки до  $90^\circ$ , което се обяснява с преобладаващо индуктивния характер на товара;
- Интересен резултат се получава за дефазиранието между тока и напрежението на една от фазите (по-голям от  $90^\circ$ ), което би означавало генериране на енергия от тази фаза. Всъщност този ъгъл може да се обясни с преноса на енергия от една фаза към друга, дължащ се на взаимните индуктивности;
- От математичните модели и извършените експериментални изследвания се вижда, че разпределението на магнитната индукция по повърхността на магнитопровода и вътре в магнитопровода не е еднаква за двете ядра на разцепената фаза. Това представлява съществен интерес за бъдещи изследвания на устройството при различен броя навивки на всяка една от бобините на разцепената фаза и при различни стойности на захранващото напрежение;

- По-малката магнитна индукция в едно от ядрата на магнитопровода на разцепената налага допълнителни изследвания за причините на това явление и дава възможност за оптимизиране на геометричните размери на магнитопровода, при условие, че това няма да окаже влияние на работата на устройството под товар;
- На Фиг. 4-6 се забелязва, че теоретично пресметнатия ток в нулевия проводник достига своята минимална стойност при брой навивки на бобините на разцепената фаза, по-малък от пресметнатия и приетия (3-6). Причината за това са загубите в стоманата и медта, които не са включени при пресмятането на броя на навивките на бобините на разцепената фаза;
- На Фиг. 4-5 се наблюдава намаляване на трите вида мощности с увеличаване броя на навивките в бобините на разцепената фаза, което се дължи на намаляването на тока в бобините на разцепената фаза.

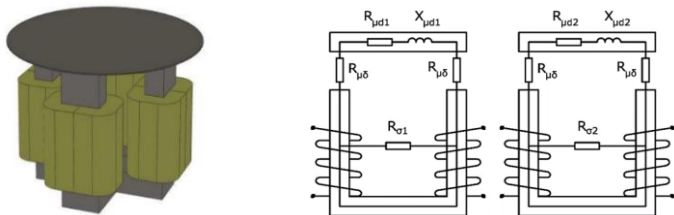
## **5. ГЛАВА IV. Изследване на трифазното индукционно устройство при работа в режим под товар**

Изследванията, описани в настоящата глава, са продължение на изследванията за отчитане на загубите в трифазното индукционно устройство, работещо в режим на празен ход, описани в предходната глава. Към показания анализ на електромагнитните процеси в трифазното индукционно устройство освен магнитните проводимости (респективно съпротивления), отчитащи магнитните потоци на разсейване, са отчетени магнитните съпротивления на въздушната междина между магнитопровода и товара, представляващ феромагнитен диск, както и магнитното съпротивление на диска. В края на главата е извършен кратък анализ и са формулирани съответните изводи.

### ***5.1. Електромагнитни процеси в трифазното индукционно устройство при работа в режим под товар. Теоретичното изследване***

Изследването в режим под товар се извършва с поставен върху устройството стоманен феромагнитен диск. По този начин магнитното поле се затваря през него, а не през въздушната среда (Фиг. 5-1).

На Фиг. 5-1 е показана двумерна заместващата схема на магнитната верига, където:  $R_{\sigma 1}$ ,  $\Omega$  е активното магнитно съпротивление на въздушната междина между срещуположните ядра, а  $R_{\sigma 2}$ ,  $\Omega$  – активното магнитно съпротивление на въздушната междина между съседните ядра;  $X_{\mu d 1}$ ,  $\Omega$  – реактивно магнитно съпротивление на диска между срещуположните ядра, а  $X_{\mu d 2}$ ,  $\Omega$  – реактивно магнитно съпротивление на диска между съседните ядра.



Фиг. 5-1. Триизмерен модел на трифазното индукционно устройство при работа в режим под товар и заместващата схема на магнитната верига

Пресметнати са: съпротивленията, отчитащи магнитните потоци на разсейване; активното магнитно съпротивление на въздушната междина между магнитопровода и диска (между срещуположните и съседните ядра) и общото магнитно съпротивление.

При пресмятане на магнитните проводимости са добавени магнитната проводимост през диска и въздушната междина над срещуположните и съседните ядра. Пресметната е пълната магнитна проводимост над срещуположните и съседните ядра.

Когато магнитният поток премине през магнитопровода на трифазното индукционно устройство, в него се създават загуби, причинени от вихрови токове и хистерезис. Тъй като устройството работи в режим на натоварване, е необходимо да се пресметнат загубите в товара (феромагнитния диск). За целта е пресметната максималната стойност на магнитната индукция в диска за всяка една от фазите (над всяко ядро).

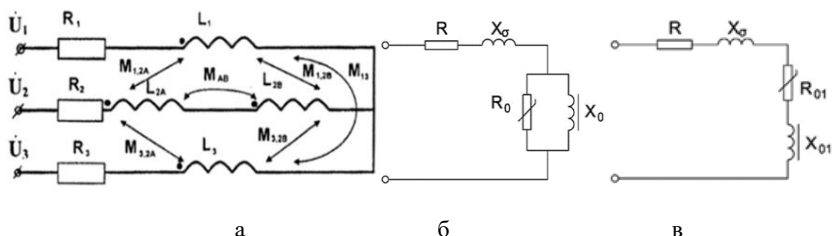
Поради различната ефективната стойност на магнитната индукция в трите фази се налага обемът на диска да бъде разпределен между трите фази. Загубите от хистерезис  $\Delta P_{dh}$  и вихрови токове  $\Delta P_{de.c.}$  в диска над ядрата на неразцепените и разцепената фази са изчислени със следните зависимости:

$$\begin{aligned} \Delta P_{dh} &= 0,2 \cdot 10^{-3} \sigma_H \cdot f \cdot B_{ds}^2 \cdot \gamma \cdot 0,25 \cdot v_d \\ \Delta P_{de.c.} &= 2 \cdot 10^{-6} \sigma_{E.C} \cdot f^2 \cdot B_{ds}^2 \cdot \gamma \cdot 0,25 \cdot v_d \end{aligned} \quad (5-1)$$

където  $f, Hz$  е честотата на напряжението;  $B_{ds}, T$  – ефективната стойност на магнитната индукция в диска над магнитопровода на съответната фаза;  $\gamma, kg/m^3$  – плътност на стоманата,  $v_d, m^3$  – обем на диска,  $\sigma_H$  и  $\sigma_{E.C}$  – коефициенти за съответната марка електротехническа стомана.

Пресметнати са загубите в стоманата във всяка една от трите фази, общите загуби в магнитопровода на устройството и диска, отразено е влиянието на товара и въздушната междина между него и полюсните крайници с активното и реактивното магнитни съпротивления.

Теоретичното изследване обхваща пресмятане на токовете в трите фази, като заместващата електрическа схема и еквивалентна електрическа заместваща схема на една от фазите са показани на Фиг. 5-2:



Фиг. 5-2. Заместващата електрическа схема (а), паралелна (б) и последователна (в) еквивалентната електрическа заместваща схема на една от фазите

където  $R, \Omega$  отчита загубите в медните проводници,  $X_{\sigma}, \Omega$  отчита магнитните потоци на разсейване,  $R_0, \Omega$  отчита загубите в стоманата, а  $X_0, \Omega$  отчита основния магнитен поток.

За удобство в пресмятанята се преминава от паралелна към последователна заместваща схема на намагнитващия контур, показана на Фиг. 5-2 (в). За да бъде опростено пресмятането на магнитната верига се приема, че напрежението, токът и магнитният поток са синусоидални.

След пресмятане на общите загуби  $R_{\Sigma}$ , включващи електрическите съпротивления от последователната заместваща схема и активните съпротивления, отчитащи загубите в медните проводници и загубите в стоманата, е съставена системата уравнения (5-2), описваща електромагнитните процеси в трифазното индукционно устройство работещо в режим под товар. След решаване на системата са получени стойностите на токовете в трите фази и нулевия проводник.

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_1 &= (R_{\Sigma 1} + j \cdot \omega \cdot L_1) \cdot \dot{I}_1 + 2 \cdot j \cdot \omega \cdot M \cdot \dot{I}_2 + j \cdot \omega \cdot M_{1,3} \cdot \dot{I}_3 \\
 \dot{U}_2 &= 2 \cdot j \cdot \omega \cdot M \cdot \dot{I}_1 + (R_{\Sigma 2} + 2 \cdot j \cdot \omega \cdot (L_2 + M_{A,B})) \cdot \dot{I}_2 + 2 \cdot j \cdot \omega \cdot M \cdot \dot{I}_3 \\
 \dot{U}_3 &= j \cdot \omega \cdot M_{1,3} \cdot \dot{I}_1 + 2 \cdot j \cdot \omega \cdot M \cdot \dot{I}_2 + (R_{\Sigma 3} + j \cdot \omega \cdot L_3) \cdot \dot{I}_3
 \end{aligned} \quad (5-2)$$

## 5.2. Експериментално изследване на трифазното индукционно устройство при работа в режим под товар

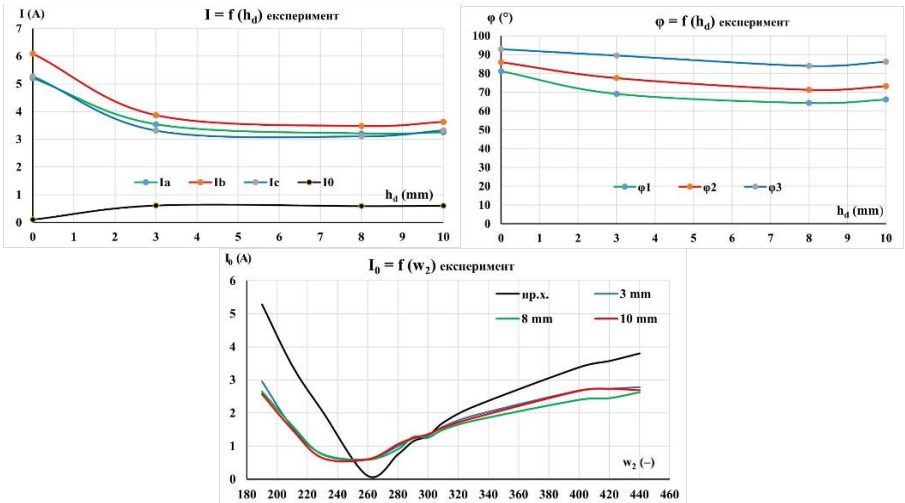
За оценка на получените теоретични резултати за извършени експериментални изследвания, за които като товар са използвани дискове от ферромагнитна стомана с диаметър 300 mm и дебелина 3 mm, 8 mm и 10 mm (Фиг. 5-3).



Фиг. 5-3. Опитна постановка за провеждане на експериментални изследвания под товар

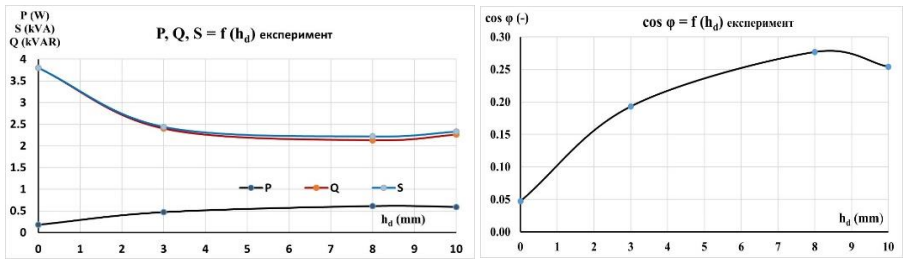
Експерименталните изследвания в режим под товар са проведени по аналогичен начин, както експерименталните изследвания в режим на празен ход с тази разлика, че са проведени с три различни диска, поставени върху трифазното индукционно устройство. Аналогична е обработката на получените резултати.

### 5.3. Резултати от експерименталните изследвания под товар с дискове с дебелина 3 mm, 8mm и 10 mm, представени в графичен вид



Фиг. 5-4. Графичен вид на резултатите от експерименталните изследвания в режим под товар

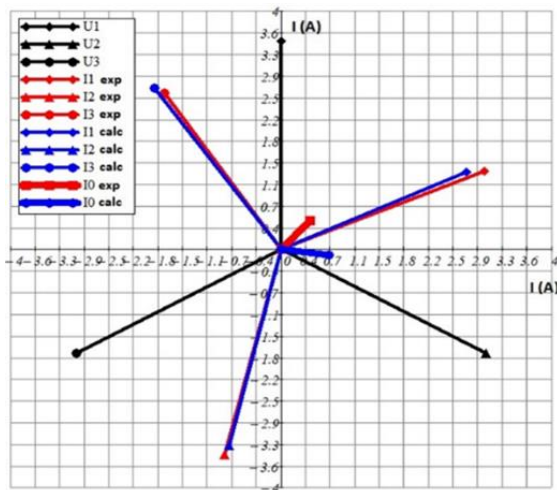
На Фиг. 5-4 и Фиг. 5-5 с  $h_d$  е обозначена дебелината на диска.



Фиг. 5-5. Графичен вид на резултатите от експерименталните изследвания в режим под товар (продължение)

### 5.4. Сравняване на резултатите от теоретичното и експерименталните изследвания

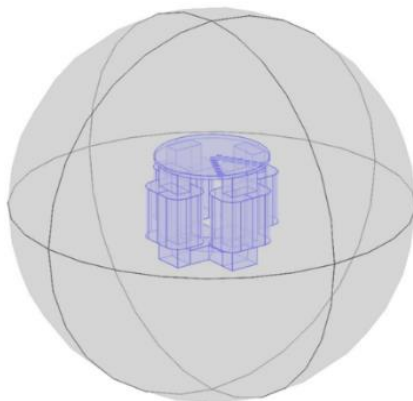
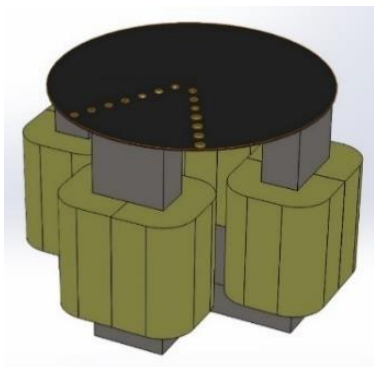
Резултатите от теоретичните и експерименталните изследвания са изброени в графичен вид на Фиг. 5-6.



Фиг. 5-6. Векторна диаграма на токовете в трите фази в режим под товар

### 5.5. Изследване на разпределението на електромагнитното поле в товара (феромагнитния диск)

Изследването е извършено с помощта на модел, изграден на базата на метода на крайните елементи, реализиран с помощта на софтуерния продукт за триизмерно моделиране *COMSOL MULTIPHYSICS*. На Фиг. 5-7 е показан геометричният модел на трифазното индукционно устройство.



Фиг. 5-7. Геометричен модел на трифазното индукционно устройство

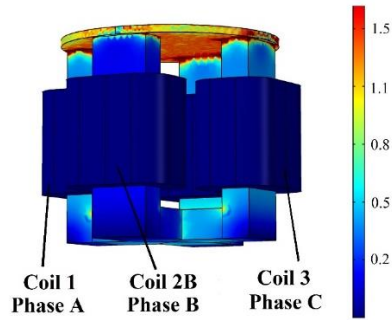
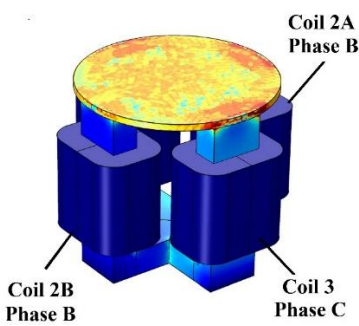
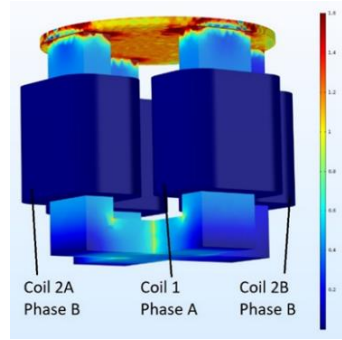
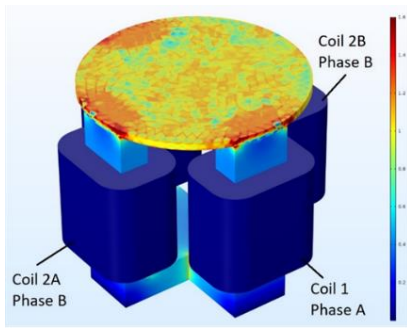
При съставянето на модела са приети следните допускания:

- нагряването се извършва до температура, много по-ниска от точката на Кюри, в резултат на което се пренебрегва изменението на магнитната проницаемост спрямо температурата;
- електрическата проводимост не зависи от температурата и координатите на геометрията;
- тъй като съпротивлението на намотките е постоянно, се приема, че ефективната стойност на тока е константа;
- не се отчитат загубите в магнитопровода;
- разпространението на полето се ограничава до размер 5 пъти по-голям спрямо вътрешния размер на системата.

За дефиниране на задачата са използвани следните гранични условия:

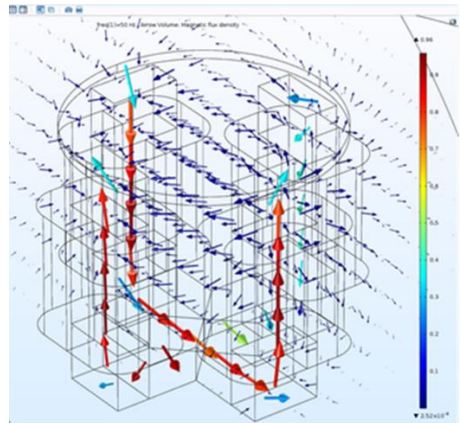
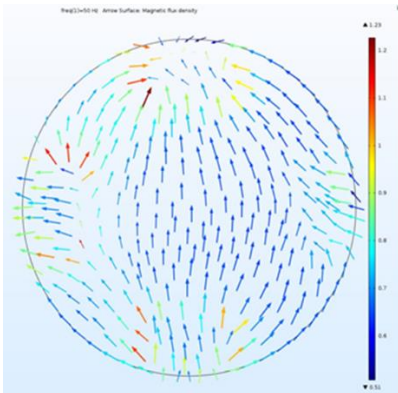
- условие на Дирихле по външната повърхност (граница) на сферата;
- условие за непрекъснатост на електромагнитното поле в модела.

На Фиг. 5-8 е показано разпределението на магнитната индукция в диска и магнитопровода. Вижда се, че магнитната индукция над бобините на неразцепените фаза *A* и фаза *C* и бобина *2A* на разцепената фаза *B* е по-голяма, в сравнение с магнитната индукция над бобина *2B* на разцепената фаза *B* (което позволява изработването на това ядро с по-малко сечение).



Фиг. 5-8. Разпределение на магнитното поле в диска и магнитопровода

На Фиг. 5-9 е показано векторното разпределение на магнитната индукция по повърхността на диска. Вижда се големината и посоката на магнитния поток, който отново е най-голям над бобините на неразцепените фази. Показано е и разпределението на магнитната индукция в трифазното индукционно устройство, диска и във въздушното пространство около тях.



Фиг. 5-9. Разпределение на магнитната индукция в диска и магнитопровода



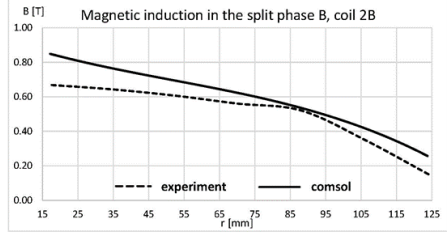
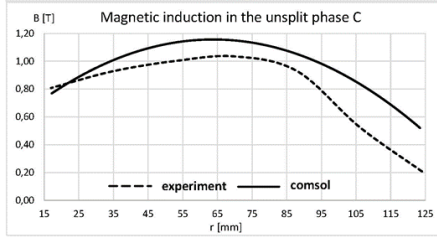
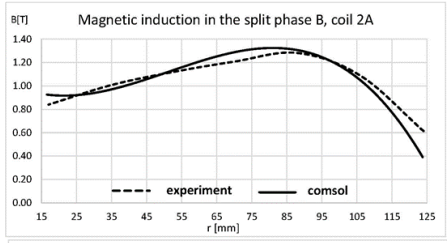
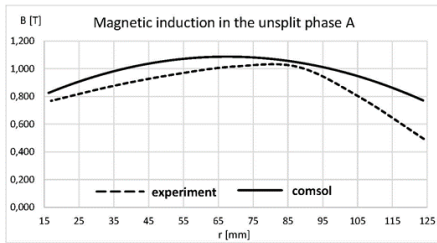
За оценка на адекватността на модела са проведени експериментални изследвания. За целта са използвани два диска от феромагнитна стомана с диаметър 300 mm и дебелина 4 mm и 10 mm. Върху всеки диск на определено разстояние от центъра към периферията са навити измервателни сонди (Фиг. 5-10).



Фиг. 5-10. Опитна постановка за провеждане на експериментални изследвания под товар за отчитане на магнитната индукция и разположение на измервателните сонди върху диска

На Фиг. 5-11 са сравнени резултатите от теоретичните и експерименталните изследвания на диска с дебелина 10 mm. Показани са резултатите от проведеното с помощта на *Comsol Multiphysics* теоретично изследване на разпределението на магнитната индукция ( $B$ ) по радиуса ( $r$ ) на диска (плътна линия) на неразцепените (Фиг. 5-11 (а)) и разцепената (Фиг. 5-11(б)) фази. На същите фигури с пунктирни линии са показани резултатите от експерименталните изследвания.

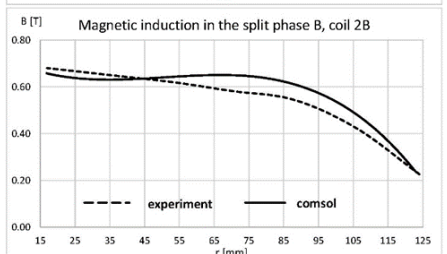
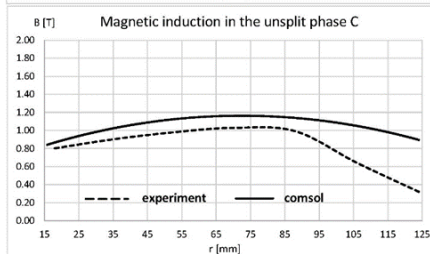
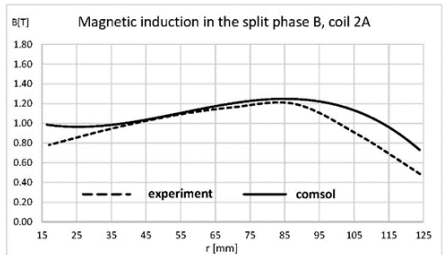
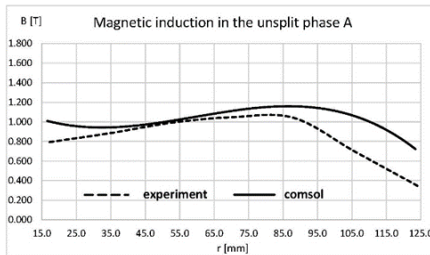
На Фиг. 5-12 по аналогичен начин са показани резултатите от теоретичните и експерименталните изследвания на диска с дебелина 3 mm.



*a*

*б*

Фиг. 5-11. Резултати от теоретичните и експерименталните изследвания за неразцепените фаза А и фаза С (а) и разцепената фаза В (б) с диск с дебелина 10 mm



*a*

*б*

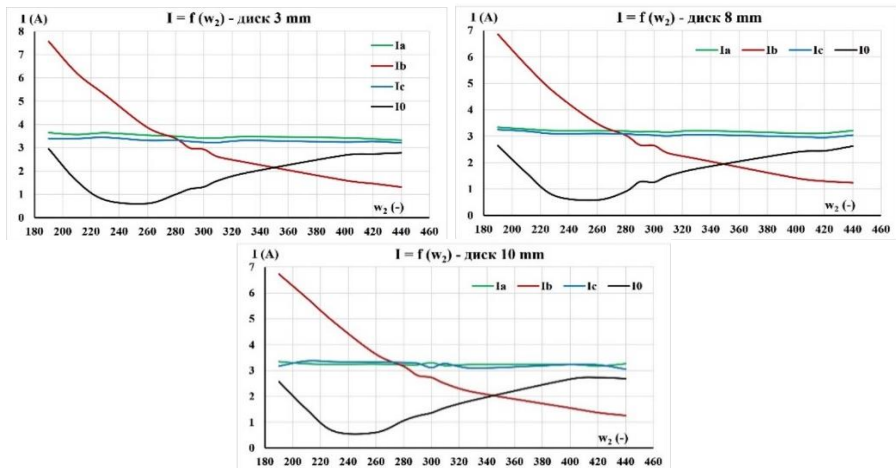
Фиг. 5-12. Резултати от теоретичните и експерименталните изследвания за неразцепените фаза А и фаза С (а) и разцепената фаза В (б) с диск с дебелина 4 mm

## 5.6. Анализ и изводи към четвърта глава

- Получените теоретични резултати за разпределението на магнитната индукция по радиуса на диска покриват в значителна степен експерименталните изследвания, като грешката не надхвърля 15 %, което определя адекватността на представения модел;
- На база получените резултати от предложения модел за картината на електромагнитното поле се наблюдава отсъствие на ротационно разпределение на полето в детайла, т.е. не се регистрира въртящо се магнитно поле;
- Отчетена е по-ниска стойност на магнитната индукция в едно от ядрата на разцепената фаза при работа на устройството под товар;
- Предложеният математичен модел може да бъде използван за изследване, оптимизиране и усъвършенстване на конструкцията на устройството и получаване на предварително зададено разпределение на магнитното поле в товара;
- Тока в нулевия проводник при работа на трифазното индукционно устройство в режим под товар се увеличава спрямо режима на празен ход. Наблюдава се понижаване на тока в нулевия проводник при увеличаване дебелината на диска (Фиг. 5-4);
- Броят на навивките на бобините на разцепената фаза, при който стойността на тока в нулевия проводник достига минимална стойност, намалява при увеличаване на натоварването или в случая от дебелината на диска (Фиг. 5-4). Промяната е незначителна – 3 %;
- С нарастване на дебелината на диска ъглите на дефазирание между напреженията и токовете намаляват, което може да бъде обяснено с увеличаване на активната съставляваща на тока.

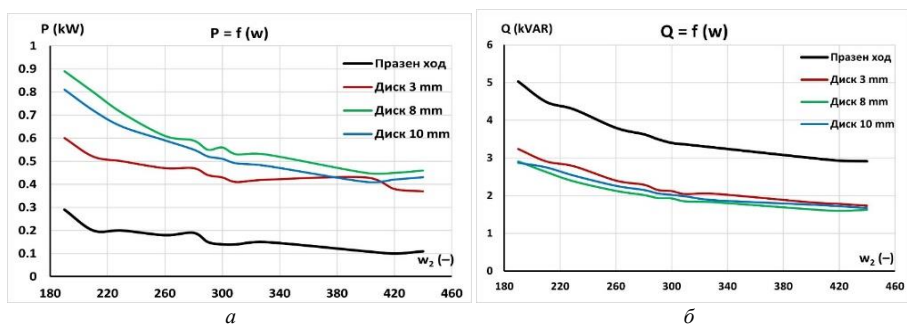
## 6. ОБОБЩЕН АНАЛИЗ И ИЗВОДИ

- След проведените експериментални изследвания се вижда, че в режим на празен ход най-добра симетрия се постига при 260 навивки на разцепената фаза, като определящ фактор за симетрията на токовете е тока в нулевия проводник;
- В режим под товар най-добра симетрия се постига при 240 навивки на бобините на разцепената фаза;
- При работа на устройството в режим под товар изменението на токовете в бобините на неразцепените фази слабо се влияе от броя на навивките на разцепената фаза. Различно е положението в двете бобини на разцепената фаза, където с увеличаване броя на навивките токът съществено намалява (Фиг. 6-1);



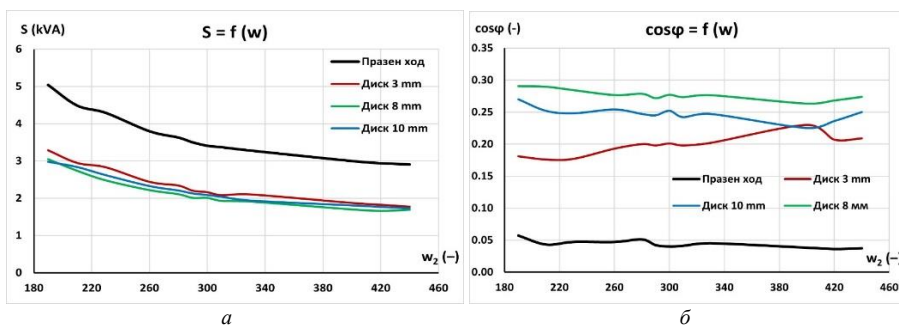
Фиг. 6-1. Зависимост на токовете от броя на навивките на бобините на разцепената фаза при работа на устройството в режим под товар

- След включване на товар във веригата се наблюдава намаляване на стойността на тока в трите фази. Поради постоянния брой навивки в бобините, токът почти не се променя при работа на устройството с подебели дискове. Леките промени в стойността на тока се дължат на взаимната индуктивност на намотките;
- В режим на празен ход изменението на активната мощност при промяна на броя на навивките на бобините на разцепената фаза е много по-малко, отколкото при работата на устройството под товар. Това се дължи на затварянето на магнитното поле през феромагнитния диск при работа на устройството под товар и покачване на съпротивлението на веригата (Фиг. 6-2 (a));



Фиг. 6-2. Зависимост на активната и реактивната мощност от броя на навивките на бобините на разцепената фаза

- Стойностите на реактивната мощност са в пъти по-големи от тези на активната мощност, поради индуктивния характер на трифазното устройство. В режим на празен ход реактивната мощност е по-голяма, отколкото при работа на устройството под товар, което се обяснява с отсъствието на товар във веригата. При включване на товар се увеличава активното съпротивление във веригата, което води до спад на реактивната мощност и повишаване на активната. Функциите са намаляващи поради увеличаване на броя на навивките на разцепената фаза и съответно повишаване на съпротивлението в проводниците, като в режим под товар с диск с дебелина 3 mm функцията е по-плавна, с по-малка разлика в стойностите, поради по-бързия процес на нагриване, в сравнение с диск с дебелина 10 mm (Фиг. 6-2 (б));
- Малката промяна на стойностите на активната мощност оказва слабо влияние върху пълната мощност. Поради това стойностите на реактивната и пълната мощност са сходни. В режим на празен ход пълната мощност има най – високи стойности при най – малък брой навивки. При работа на устройството под товар стойностите на пълната мощност са почти еднакви и се изменят незначително с увеличаване на броя на навивките на бобините на разцепената фаза (Фиг. 6-3 (а));



Фиг. 6-3. Зависимост на активната и реактивната мощност от броя на навивките на бобините на разцепената фаза

- Изменението в стойностите на фактора на мощността в режим на празен ход е много малко, като най – високата стойност е при най – малък брой навивки на бобините на разцепената фаза, което се дължи на малката активна и голямата реактивна мощност в режим на празен ход. При експериментално изследване в режим на работа на устройството под товар с диск с дебелина 3 mm се наблюдава покачване в стойностите на фактора на мощността, в следствие на по-плавното изменение на активната мощност, в сравнение с другите режими на работа. При експерименталното изследване в режим под товар с диск с дебелина 8 mm и 10 mm се наблюдава по-рязък спад на активната мощност, което обяснява и намаляващата функция на фактора на

мощността в зависимост от броя на навивките на бобините на разцепената фаза (Фиг. 6-3 (б)).

## ХІІ. ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

В резултат на направените изследвания в дисертационната работа се формулират следните научно-приложни и приложни приноси:

Научно-приложни приноси:

1. Предложена е нова методика за оразмеряване на трифазно индукционно устройство и описание на условието за симетрия на токовете. Създаден е триизмерен модел на трифазното индукционно устройство с разцепена фаза.
2. Създаден е нов математичен модел за пресмятане на магнитните проводимости на трифазно индукционно устройство в режим на празен ход и под товар. Предложеният математичен модел може да бъде използван за изследване, оптимизиране и усъвършенстване на конструкцията на устройството и получаване на предварително зададено разпределение на магнитното поле в товара.
3. Предложена е нова методика за теоретично пресмятане на общите загуби в режим на празен ход на трифазно индукционно устройство с разцепена фаза, която е приложима и за корекция на броя на навивките на разцепената фаза с цел по-добра симетрия на токовете в трите фази. Извършен е анализ на симетрията на токовете в трифазното индукционно устройство, работещо в режим на празен ход, при промяна на броя на навивките в разцепената фаза.
4. Получени са потвърдителни данни за картината на електромагнитното поле на трифазно индукционно устройство. Изследването е насочено към режима на празен ход при отчитане на загубите в магнитопровода и намотките, с цел установяване на изходното разпределение на магнитното поле.
5. Получени са потвърдителни данни за електромагнитното поле на трифазно индукционно устройство под товар, представляващ феромагнитен диск. Изследването е свързано с получаване на картината на разпределението на електромагнитното поле в посоченото устройство и товара.

Приложни приноси:

Предложена и анализирана е нова конструкция на трифазно индукционно устройство, позволяващо нагряване и топене на метали при липса на въртящо се магнитно поле и при симетрия на токовете в трите фази. Предложената конструкция дава възможност за нагряване на метални дискове и др. детайли при работа на устройството със захранващо напрежение на

промишлена честота без необходимост от допълнителни електронни устройства за промяна на параметрите на захранващото напрежение. Устройството дава възможност за нагряване на детайли, геометричните размери на които позволяват разполагането им между бобините на устройството, което представлява интерес и може да бъде обект на бъдещи изследвания.

### **ХІІІ. Благодарности**

Издавам голяма благодарност към своя научен ръководител доц. д-р инж. Марин Славов Маринов за проявеното търпение, оказаните подкрепа и помощ. Ползотворните идеи и насоки при изготвяне на дисертационния труд доведоха до успешното му представяне пред научната общност и завършването на докторантурата ми.

Благодаря на колегите от катедра ЕТЕТ за оказаното съдействието при разработването на настоящия дисертационен труд.

Накрая, но не на последно място, поднасям своята огромна благодарност за цялостната подкрепа и проявеното търпение от страна на семейството ми.

#### **XIV. Резюме на английски език**

Induction heating is a method for thermal treatment of electrically conductive materials widely used in industry. It is characterized by the possibility to heat specific zones of the workpiece and high effectiveness. Due to problems, occurring in three-phase induction devices with radial arrangement of the inductors related to load symmetrizing and the appearance of a rotating magnetic field, their application is limited. The three-phase induction device with a split phase, which is presented in this dissertation, and which is also the subject of research, eliminates these problems. The constructive design is a laminated four-legged magnetic core with vertical cores of equal cross-section areas, around each of which a coil is wound; the lower ends of the cores are connected to each other by a laminated magnetic core whereas their upper ends form a free space between themselves. Two of the phases of the supplying three-phase voltage are connected to the first and the third coil respectively, and the third phase is connected to the second and fourth coil, which are connected in series, have a different number of windings from the other two coils and are located on two opposite limbs of the four-legged magnetic core.

The aim of the present dissertation is to model the electromagnetic processes in a three-phase induction device with a split phase. The following has been carried out: electrical sizing of the device and analyses of the electromagnetic processes in idle mode and in load mode, the load being ferromagnetic disks of different thickness; building an equivalent electrical substitute circuit by taking into account the mutual inductances of the three phases, with the idea of obtaining a symmetrical load of the phases.

The analyses in idle mode cover the electromagnetic processes in the three-phase induction device by taking into account the losses in the steel and the conductors, and the symmetry of the currents when changing the number of windings on the coils of the split phase. Theoretical studies have been carried out of the magnetic field in order to obtain a picture of the electromagnetic field distribution through numerical methods of analysis based on the finite element method and the software product for three-dimensional modelling Comsol Multiphysics.

The research on the three-phase induction device with split phase when operating in load mode involves electromagnetic analysis with calculating of the magnetic conductivities and resistances while taking into account the magnetic scattering fluxes, the magnetic resistances of the air gap between the magnetic core and the disk; the magnetic resistance of the ferromagnetic disk has also been taken into account. Here, too, theoretical research has been carried out in order to obtain a picture of the magnetic field distribution in the device and the disks (the load) by using the software product for three-dimensional modelling.



In order to evaluate the adequacy of the results obtained from the theoretical research and the created mathematical and geometric models, experimental tests have been carried out. The obtained theoretical results are close enough to the experimental ones, regardless of the difficulties associated with the accurate description of the magnetic field, for which there is no exact methodology due to the specific constructive design of the device and the configuration of the magnetic circuit.

The research of the electromagnetic processes in the three-phase induction device with a split phase, carried out in the present dissertation work, proves that the proposed construction design allows for heating of metal disks and other workpieces when the device operates at a supplying voltage of industrial frequency without any help of additional electronic devices for changing the parameters of the supplying voltage. The device makes it possible to heat workpieces, whose geometric dimensions enable their placement between the coils of the device, which is of significant interest and is the basis of future research.

## **XV. Резюме на руски език**

Индукционный нагрев метод термической обработки электропроводящих материалов, широко используемый в промышленности. Для него характерны возможность локального нагрева определенных участков заготовки и высокий КПД. Из-за проблем с трехфазными индукционными устройствами с радиальным расположением индукторов, связанных с балансировкой нагрузки и появлением вращающегося магнитного поля, их применение ограничено. Предлагаемое в данной диссертации трехфазное индукционное устройство с разделенной (расщепленной) фазы, которое также является предметом исследования, устраняет эти проблемы. Конструкция представляет собой шихтованный четырехъядерный магнитопровод с вертикальными сердечниками равного сечения, на каждом из которых размещена катушка, нижние концы сердечников соединены между собой шихтованным магнитопроводом, а их верхние концы образуют свободное место. Две фазы питающего трехфазного напряжения подключены к первой и третьей обмоткам соответственно, а третья фаза подключена ко второй и четвертой обмоткам, включенным последовательно, которые имеют другое количество витков, чем две другие обмотки и расположены на двух противоположных сердечниках.

Целью данной диссертации является моделирование электромагнитных процессов в трехфазном индукционном устройстве с разделенной (расщепленной) фазы. Электрический расчет устройства и анализ электромагнитных процессов в режиме холостого хода и под нагрузкой, представляющих ферромагнитные диски разной толщины, выполнен эквивалентной электрической схемой замены с учетом взаимных индуктивностей трех фаз с идеей получения симметричной нагрузке фазы.

Анализ холостого хода охватывает электромагнитные процессы в трехфазном индукционном устройстве с учетом потерь в стали и проводниках и симметрии токов при изменении числа витков катушек разделенной (расщепленной) фазы. Теоретические исследования магнитного поля проводились с целью получения картины распределения электромагнитного поля с использованием численных методов анализа на основе метода конечных элементов и программного продукта для трехмерного моделирования Comsol Multiphysics.

Исследование трехфазного индукционного устройства с разделенной (расщепленной) фазы при работе в режиме нагрузки включает электромагнитный анализ при расчете магнитных проводимостей и сопротивлений с учетом магнитных потоков рассеяния, магнитных сопротивлений воздушного зазора между магнитопроводом и диском. Здесь также были проведены теоретические исследования с целью получения картины распределения магнитного поля в устройстве и дисках (нагрузке) с помощью программного продукта для трехмерного моделирования.

Для оценки адекватности результатов теоретических исследований и созданных математических и геометрических моделей были проведены экспериментальные исследования. Полученные теоретические результаты достаточно близки к экспериментальным, несмотря на трудности, связанные с точным описанием магнитного поля, для которого нет точной методики из-за специфики конструкции устройства и конфигурации магнитопровода.

Из проведенного в данной диссертации исследования электромагнитных процессов в трехфазном индукционном устройстве с разделенной (расщепленной) фазы можно сказать, что предлагаемая конструкция позволяет нагревать металлические диски и другие детали при работе устройства с питающим напряжением промышленной частоты без необходимости дополнительных электронных устройств для изменения параметров питающего напряжения. Устройство позволяет нагревать детали, геометрические размеры которых позволяют размещать их между катушками устройства, что представляет значительный интерес и является поводом для будущих исследований.