



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

**Електротехнически факултет
Катедра "Електрически машини"**

Маг. инж. Цветомир Методиев Стоянов

**СИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ С ПОСТОЯННИ МАГНИТИ ЗА
ХИБРИДНИ АВТОМОБИЛИ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
"ДОКТОР"

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.2. „Електротехника, електроника и автоматика”

Научна специалност: “Електрически машини”

**Научни ръководители: доц. д-р Радослав Спасов
доц. д-р Пламен Ризов**

СОФИЯ, 2017 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Електрически машини“ към Електротехническият факултет на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 28.06.2017 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 14.11.2017 г. от 13.00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-276 /14.07.2017 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. Проф. д-р Владимир Лазаров – председател
2. доц. д-р Радослав Спасов – научен секретар
3. Проф. д.т.н. Ганчо Божилов
4. Проф. д.т.н. Пенчо Йорданов
5. Проф. д-р Иван Миленов

Рецензенти:

1. Проф. д-р Владимир Лазаров
2. Проф. д.т.н. Ганчо Божилов

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

Автор: маг.инж. Цветомир Методиев Стоянов

Заглавие: Синхронен двигател с постоянни магнити за хибридни автомобили

Тираж- 30 бр.

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Автомобилите, които използват неконвенционални източници на енергия и в частност електрическа енергия при задвижването си, получават голямо разпространение през последните години и набират все по-голяма популярност. Това се дължи на следните няколко причини: ресурсни, екологични и технически. Електрозадвижването на хибридният автомобил може да се реализира чрез различен тип електродвигатели. Дали той ще работи с променлив или постоянен ток или какъв ще бъде точно типа на избрания електродвигател (синхронен, асинхронен или постояннотоков) зависи от избора на конструктора, след оценка на предимствата и недостатъците на всеки тип електродвигател. Общото между всички електрозадвижвания, независимо от избрания тип електродвигател е, че те работят при високи електрически, магнитни и топлинни натоварвания, което дава възможност да се създаде високоефективно електрозадвижване, но това поставя и редица проблеми за решаване.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Въз основа на проведения литературен обзор е дефинирана целта на дисертационния труд, а именно: създаване на итеративен алгоритъм за изследване на синхронен двигател с V - образно разположение на постоянните магнити за хибриден автомобил.

В дисертационния труд ще се изпълнят следните задачи, за постигане на поставената цел:

- създаване на алгоритъм за първоначално определяне на размерите на СМПМ
- оптимизиране на геометрията на роторния лист
- изследване на различни конструкции на намотките на СМПМ
- определяне на потокосцепленията с отчитане на насищането на стоманата
- определяне на загубите в стоманата
- създаване на модели за изследване на 2D и 3D електромагнитни и топлинни полета на СМПМ в среда на FEMM и Ansys Maxwell
- моделиране и изследване на охладителна система на СМПМ с водно охлаждане
- създаване на собствени програмни модули в средата на Fortran, Excel и Matlab за обработка на получените резултати.

Научна новост

1. Изследвана е синхронна машина с постоянни магнити с две независими намотки, през които протичат фазни токове дефазирани на определен ъгъл.
2. Изследвано е пространственото и времевото разпределение на загубите в ротора на синхронен двигател с V - образно разположение на постоянните магнити.

Апробация

Дисертационният труд е докладван и обсъден на заседание на катедра „Електрически машини“ към Електротехническият факултет на ТУ-София. Етапи от дисертацията са докладвани и обсъждани на:

1. VI Конференция на Електротехнически факултет "ЕФ2014", 15-17.09.2014 г., Созопол
2. VII Конференция на Електротехнически факултет "ЕФ2015", 19-21.09.2015 г., Созопол
3. XIV International conference on electrical machines, drives and power system, 1.10.2015-3.10. 2015, Varna.
4. VIII Конференция на Електротехнически факултет "ЕФ2016", 12-15.09.2016 г., Созопол

Публикации

По темата на дисертацията са публикувани 6 научни статии, от които една самостоятелна.

Структура и обем на дисертационния труд

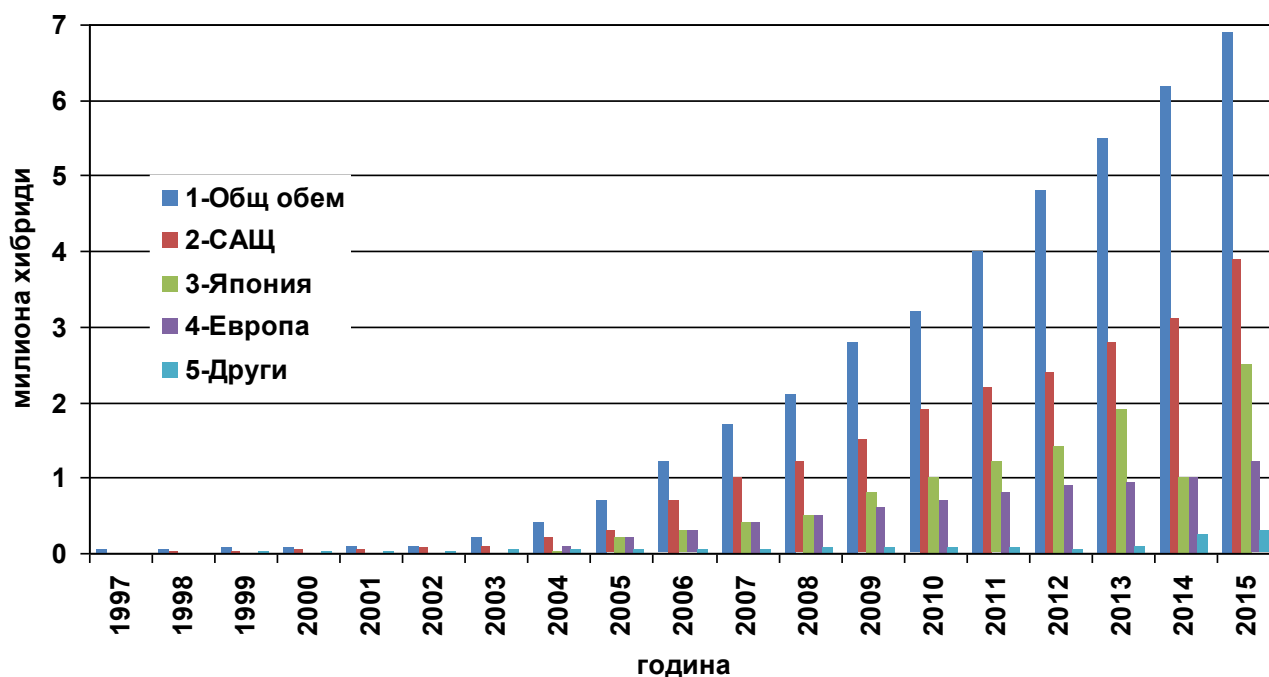
Дисертационният труд е в обем от **139** страници, като включва увод, **4** глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо **146** литературни източници, като **85** са на латиница и **42** на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо **159** фигури и **29** таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР

1.2 Видове хибридни системи

Хибридните автомобили получават голямо разпространение през последните години и набират все по-голяма популярност. фигура 1.1 представя количеството продадени хибридни автомобили в световен мащаб и в отделните страни [32], като по прогнозни данни [41] през 2020 година количеството продадени хибридни автомобили ще бъде около 30 милиона автомобиля.



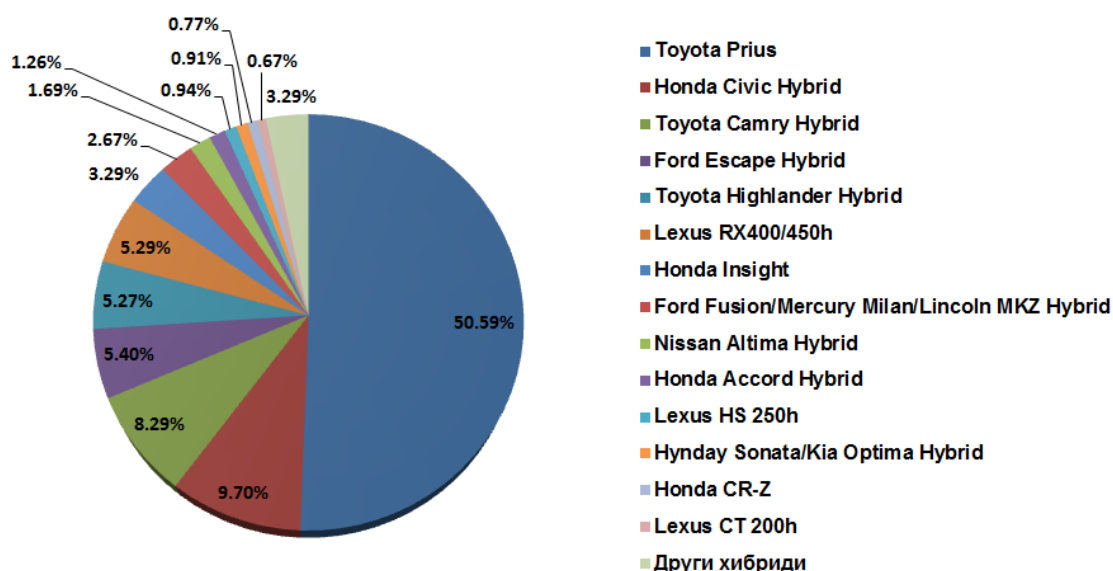
Фиг. 1.1 Количество продадени хибридни автомобили

Редица автомобилни производители Toyota, Honda, Ford, Nissan, Hyundai, Kia [32, 35, 94], произвеждат хибридни автомобили. Като абсолютен лидер е Toyota Prius (с нейните четири поколения [37]), с дял от над петдесет процента от всички хибридни автомобили в света [32], както е показано на фигура 1.2.

Заедно с това автомобилните производители не само се стремят да имат в гамата си хибриден автомобил, а също така той да има същите, но и по-добри характеристики, оборудване и комфорт от конвенционалните автомобили [29, 37, 39].

Нарастващата популярност и търсене на хибридни автомобили се дължи на следните няколко причини:

- ресурсни
- екологични
- технически - те могат да се разделят на няколко групи:



Фиг. 1.2 Разпределение на хибридните автомобили по марки и модели

- първа група - хибридните автомобили имат по-нисък разход от стандартните им аналози таблица 1.1 [29]

Табл. 1.1 Сравнителна таблица на хибриди и стандартните им аналози

Автомобил	Маса	Обем	Мощност на ДВГ	Мощност на електродвигателя	Разход на гориво при Европейски цикъл	Понижение на разхода на гориво при хибрид	CO ₂
	[кг]	[л]	[KW]	[KW]	[л]	[%]	[г/км]
Honda Civic хибрид	1249 1720	1,34	70	15	5,2/4,3/4,6	59/46/49	109
Honda Civic аналог	1265 1700	2	148	-	12,7/7,9/9,1	-	215
Toyota Corolla хибрид	1380 1805	1.8	73	60	3,8/3,8/3,8	56/31/24	89
Toyota Corolla аналог	1250 1750	1.8	108	-	8,7/5,5/6,7	-	155
Honda Insight хибрид	1200 1650	1.34	65	10	4,2/4,6/4,4	-/51	101
Honda Insight аналог	1610	3.47	206	-	-/9,0	-	-
BMW 7 хибрид	2045 2635	4.4	330	15	12,6/7,6/9,4	26/15/21	219
BMW 7 аналог	1945 2575	4.4	300	-	17,1/8,9/11,9	-	279
Porsche Cayenne хибрид	2240 2910	3	245	34	8,7/7,9/8,2	45/6,0/27	193
Porsche Cayenne аналог	1995 2765	3.6	220	-	15,9/8,4/11,2	-	263
Cadillac Escalade хибрид	2780 3400	6	248	60	11,6/10,7/11,0	42/5,0/24	264
Cadillac Escalade аналог	2580 3310	6.2	301	-	20,1/11,3/14,5	-	339

- втора група - създаването на активни, конструктивни и изолационни материали обезпечаващи работата на електрическите машини при високи електромагнитни и топлинни натоварвания [94]

Освен горните причини за бързите темпове на разпространение на хибридните автомобили, други фактори благоприятстващи разпространението им са техните предимства:

- максимален въртящ момент от състояние на покой и нисък разход на гориво в градски условия [32]
- наличието на електрическа машина в задвижването на автомобила позволява преминаването ѝ в режим на генератор и рекуперирането на енергия [19, 37]

Наред с многото предимства хибридните автомобили притежават редица недостатъци:

- по-висока цена от стандартните автомобили [35, 92], поради наличието на батерии и инвертор

необходимост от наличието на тягова акумулаторна батерия

- техническото обслужване на хибридните автомобили в сервизите не е добре организирано към този момент и поради тази причина сервизите нямат възможност за извършване на качествен ремонт [32].

1.3 Задвижване на електрически хибридни системи

Задвижването на един хибриден автомобил се състои от ДВГ, електродвигател и трансмисия. Връзката между ДВГ и електродвигателя, и предаването движението на водещите колела може да се осъществи по няколко начина, както е показано на фигура 1.3 [40, 51]. Всеки начин на връзка влияе на избора на структура на хибридния автомобил и вида на използвания електродвигател.



Фиг. 1.3 Електродвигател присъединен към вала на ДВГ

Функции и изисквания към задвижването на хибридния автомобил [26]:

- сумиране на въртящия момент от два източника на енергия и предаването му на колелата на транспортното средство
- обезпечаване движението на автомобила на определен източник на енергия
- обезпечаване безстепенно изменение на предавателното отношение
- има неголеми загуби

Структурата на хибридния автомобил бива няколко вида [21, 26, 31, 42, 62]:

- последователна
- паралелна
- с разпределяне на мощността

1.4 Електродвигатели използвани за задвижване на хибридни автомобили

Към електродвигателите използвани за задвижване на хибридни автомобили се налагат следните изисквания [19, 57, 65, 66, 96] :

- лесна и технологична изработка
- лесна обслужваемост
- лесна регулируемост
- надеждност
- работа при високи обороти 10000-15000
- висок момент в целия скоростен диапазон
- възможност за рекуперация
- висок КПД
- високо съотношение маса/мощност
- способност за кратковременни претоварвания - два пъти по мощност и до четири пъти по момент
- минимална маса
- минимална цена

Сравнени с останалите типове електродвигатели, всеки има следните предимства и недостатъци.

1. Асинхронните машини [30, 65, 121]:

- предимства - лесна изработка, ниска цена, най-добра надеждност
- недостатъци - сложни алгоритми за управление, по-голяма маса за единица мощност

2. Постояннотоковите двигатели (разглеждат се само безколекторни двигатели) [30, 65, 121]:

- предимства - лесна изработка и управление, ниска цена
- недостатъци - по-голяма маса за единица мощност, най-енергонеефективни

3. Реактивни двигатели [65, 121]

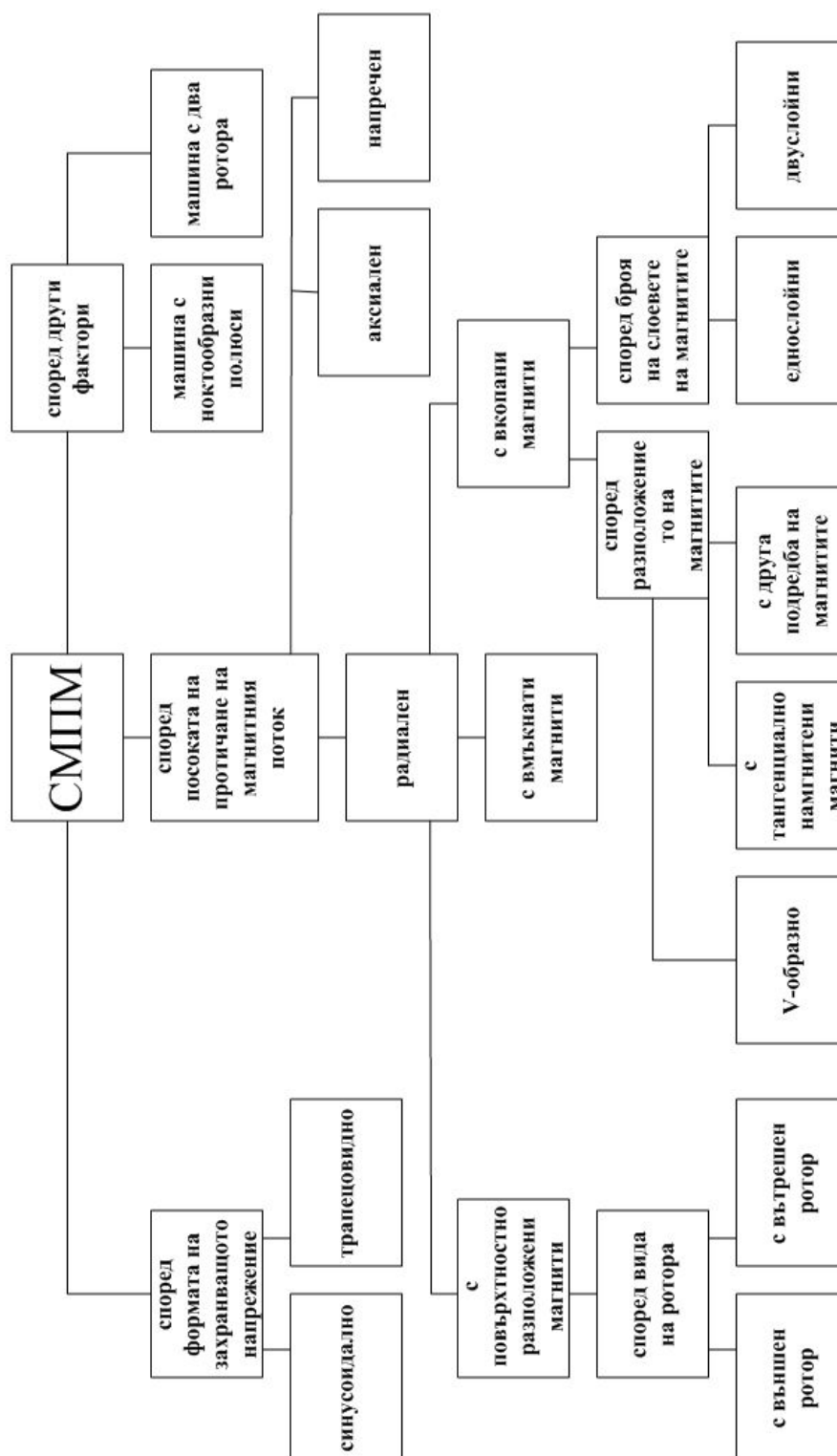
- предимства - лесна изработка и ниска цена, поради липсата на намотка в ротора няма загуби там
- недостатъци - консумацията на голям реактивен ток при стартиране и работа

4. Синхронни двигатели с постоянни магнити [53, 84, 101, 106, 127]:

- предимства - имат най-висок КПД, масата им за единица мощност е най-малка
- недостатъци - най-висока цена, главно поради постоянните магнити, отсъствието на намотка в ротора позволява контролирането на магнитното поле само от страна на статора

1.5 Синхронни машини с постоянни магнити (СМПМ)

Както беше описано в предишния раздел, СМПМ имат редица предимства и точно те са обект на настоящата дисертация (ще бъдат разгледани конструкции на машини, работещи главно в двигателен режим). Поради тази причина различните типове конструкции ще бъдат разгледани подробно и ще бъдат описани техните предимства и недостатъци. СМПМ могат да се класифицират според различни фактори, в няколко основни групи (представени схематично на следващата фигура):



Фиг. 1.3.2. Класификация на СМПМ

1.6 Постоянни магнити

По-важните свойства, характеристики и изисквания към постоянните магнити са следните:

- B_r - остатъчна индукция
- H_c - корецитивен интензитет
- BH_{MAX} - максимална енергия
- максимална работна температура
- специфично тегло
- начин на производство
- цена

Обобщени свойства и характеристики на постоянните магнити са дадени в таблица 1.2 [102] .

Табл. 1.2 Свойства и характеристики на постоянни магнити чуждо производство

Свойство	Мерна единица	Вид постоянен магнит			
		Ферити	AlNiCo ЮНДК	SmCo	NdFeB
Коерцетивен интензитет	H_c [kA/m]	180–400	40–130	493–1590	800–1990
Остатъчна индукция	B_r [T]	0.35–0.43	0.6–1.35	0.7–1.35	1.0–1.4
Температурен коефициент	α_T [%/°C]	–0.2	–(0.01–0.02)	–(0.03–0.05)	–(0.08–0.15)
Специфично съпротивление	ρ [g/cm ³]	4.5–5.1	7.3	8.2–8.4	7.4–7.6
Температура на Кюри	[°C]	450	850	700–800	310–350
Проводимост	σ [MS/m]	0.01	2.13	1.16	0.55–0.9
Относителна магнитна проникваемост	μ_r	1.05–1.15	1.9–7	1.02–1.07	1.04–1.1

1.6 Изводи към първа глава

1. От появата на първия сериен хибриден автомобил Toyota Prius преди двадесет години до днес, броя на хибридните автомобили нараства непрекъснато. Това се дължи на редицата предимства, които имат хибридните автомобили пред конвенционалните им аналози - по-нисък разход на гориво, по-висок КПД, висок въртящ момент в целия скоростен диапазон и други. Наред с предимствата хибридните автомобили имат и редица недостатъци - висока цена, по-сложна сервисна поддръжка.
2. Структурата на хибридният автомобил бива няколко вида и тя определя мощността и конструкцията на електрическата машина използвана в електрозадвижването на хибрида.

3. Съществува разнообразие от електрическите машини използвани в хибридните автомобили, но също така към тях се налагат и редица изисквания.
4. За следващи изследвания се избира конструкцията с V - образно разположение на магнитите поради предимствата, които тя има, но също така ще се отдели и специално внимание на недостатъците ѝ.

ГЛАВА 2. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА РАЗМЕРИТЕ И ЕЛЕКТРОМАГНИТНИТЕ НАТОВАРВАНИЯ НА СИНХРОННА МАШИНА С ПОСТОЯННИ МАГНИТИ

2.1 Увод

Геометричните размери са важни за построяването на модел при изследването на СМПМ. В много източници има само данни за конкретни машини, без да може да се проектират машини за целия диапазон на мощността на СДПМ, използвани при хибридни автомобили. Различни автори са посочили различни данни за: електромагнитни натоварвания [70, 92], размери на машината [5, 45, 105, 125], захранващо напрежение [24, 88] и други. Няма цялостен, обобщен и сравнително прост алгоритъм за първоначално определяне на геометрията на СМПМ и някои по-важни параметри на машината. Това е предпоставка за създаването му.

2.2 Данни за СМПМ използвани при хибридните автомобили

На базата на литературния обзор в първа глава, на различните видове конструкции на СМПМ, за бъдещо проектиране поради предимствата ѝ беше избрана конструкцията с V-образно разположение на магнитите. При процеса на проектиране ще бъдат взети под внимание и недостатъците на тази конструкция, с цел намаляване на влиянието им. Алгоритъмът е създаден на база литературни източници и собствени изследвания. Диапазонът на мощностите е съобразен със спецификата на проектиране на електрически машини :

P₂- мощността на вала на двигателя [24, 76, 77], **p**- броя чифтове полюси [88, 105, 122], електромагнитните натоварвания [64, 93, 113] и вида охладителна система [102] , геометрия на статорния и роторния лист [5, 49, 78], и други.

Входни данни за определяне на размерите са:

- **P₂** - мощност на вала на машината
- **m** - брой статорни фази
- **U₁** - фазно напрежение
- **p** - брой чифтове полюси
- **f₁** - честота на захранващото напрежение

- η - КПД и $\cos\varphi$ на СМПМ

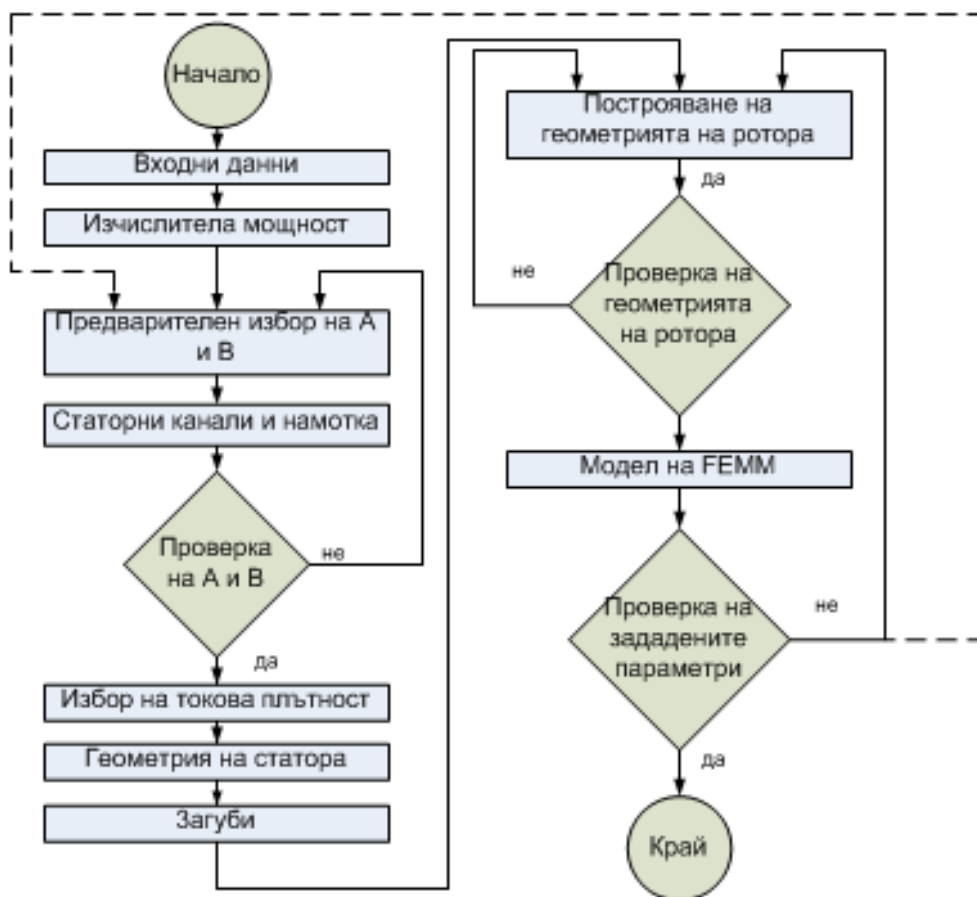
Представеният алгоритъм позволява определянето на размерите на СМПМ със следните възможности:

- $P_2=10\div100$ [kW]
- $p=3\div6$
- V-образно разположение на магнитите

Алгоритъмът за проектиране преминава през следните няколко етапа:

- избор на електромагнитните натоварвания
- геометрия на статора
- геометрия на магнитите
- модел в среда на FEMM
- сравнение на данните получени от FEMM и аналитично изчислените

Блоковата схема на алгоритъма за проектиране на СМПМ е показана на фигура 2.1.



Фиг. 2.1 Блокова схема на алгоритъма за проектиране на СМПМ

2.3 Определяне на главните размери на машината и електромагнитните натоварвания

Поради оскъдните данни в литературните източници за СМППМ, бяха създадени графики за препоръчителни стойности на $D_a=f(P_2)$ фигура 2.2, $A=f(P_2)$ фигура 2.3, $B_\delta=f(P_2)$ фигура 2.4. Зависимостите бяха създадени чрез използването на формула 2.1 [15, 16, 17].

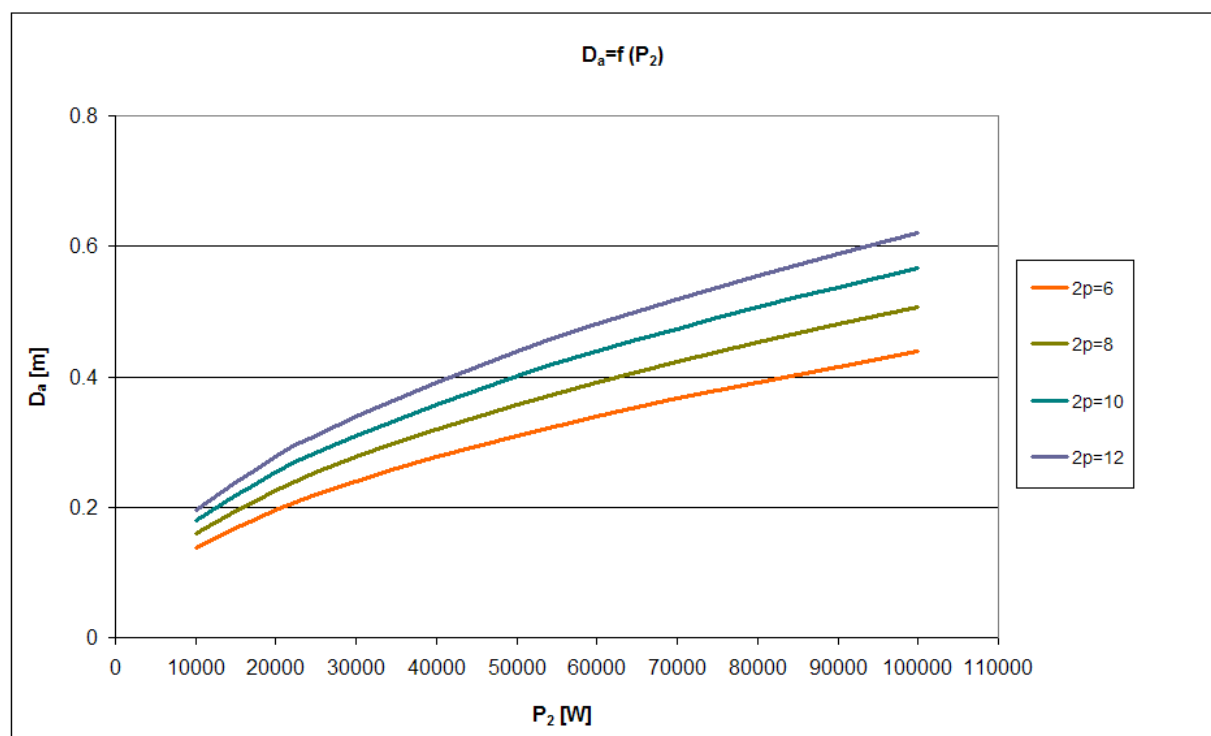
$$(2.1) \quad D_a^2 l_{fe} = \frac{6,1 \cdot 10^6 P_\delta}{a_\delta k_R k_w A B_\delta n},$$

където D_a - външен диаметър на статора,
 l_{fe} - аксиална дължина на машината,
 P_δ - електромагнитна мощност,
 a_δ - коефициент на полюсното покритие,
 k_R - коефициент на формата на полето,
 k_w - коефициент на намотката,
 A - линейнотоково натоварване,
 B_δ -индукция във въздушната междина,
 n - скорост на въртен.

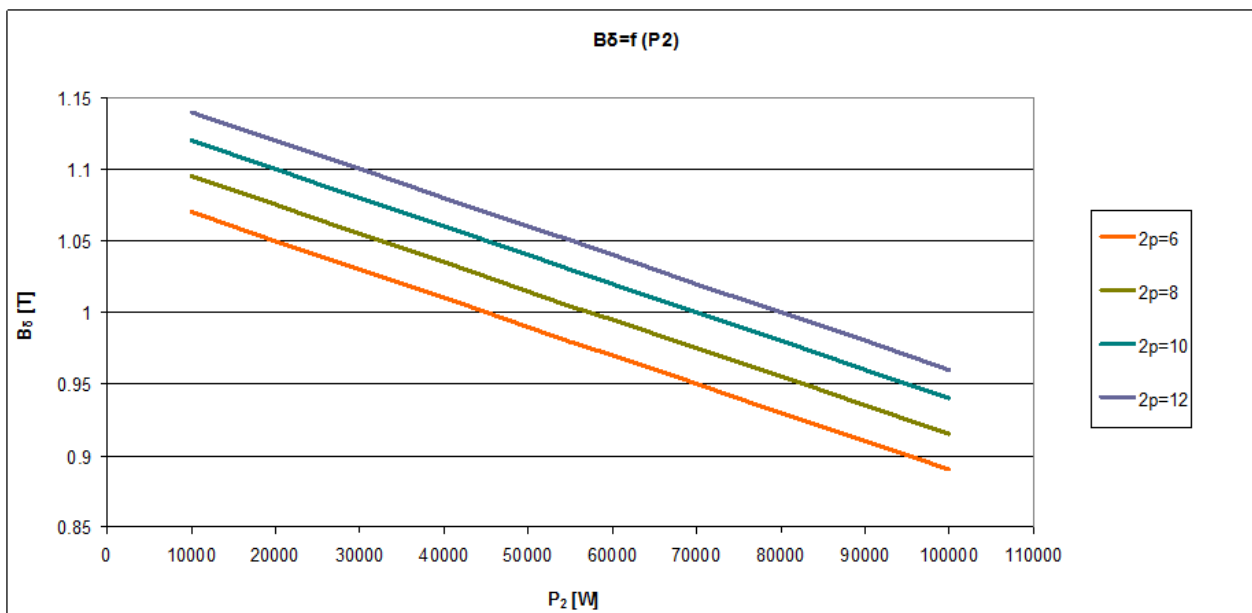
Задават се данни в следните диапазони:

$l_{fe}=0.1\sim0.2$ през $0,01$ [m] 10^{-2} $P_\delta=12\sim120$ [W]. 10^3 $n=1000\sim500$ об./min.
 $n=f(p)$

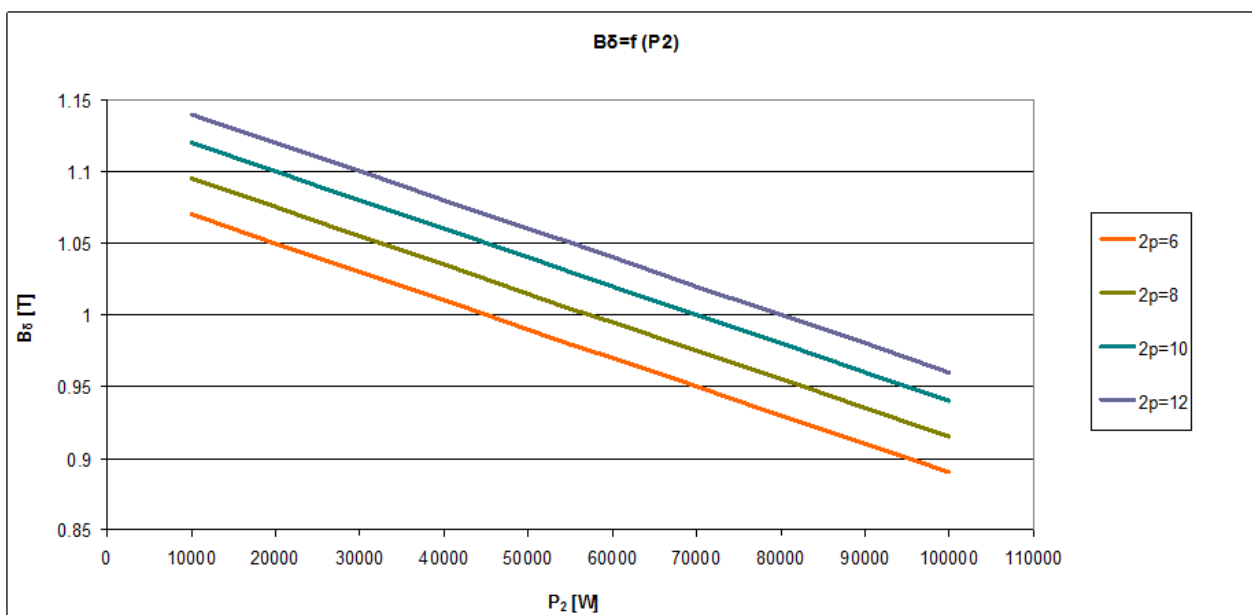
и получените стойности за електромагнитните натоварвания се сравняват с известните от литературата и се линеаризират.



Фиг. 2.2 Препоръчителни стойности на $D_a=f(P_2)$



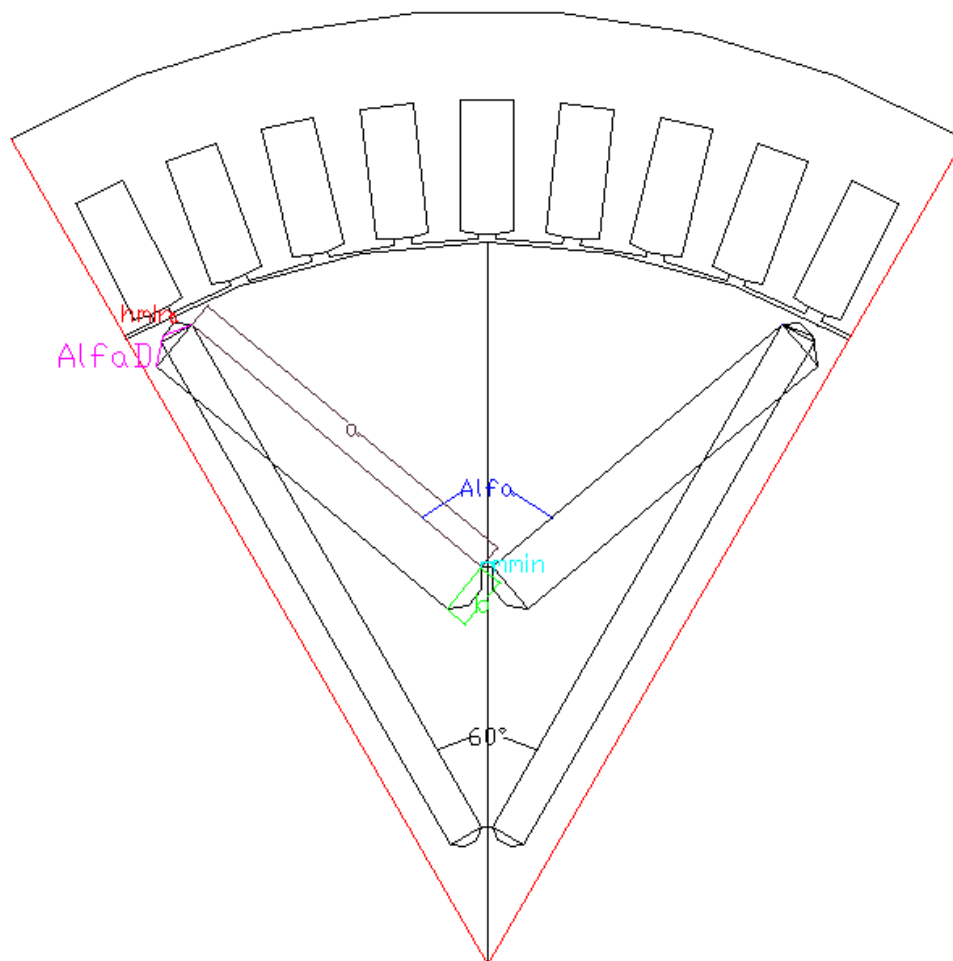
Фиг. 2.4 Препоръчителни стойности на $B_\delta=f(P_2)$



Фиг. 2.4 Препоръчителни стойности на $B_\delta=f(P_2)$

След определянето на обема и размерите на магнитите, трябва да се определи геометричното им разположение в рамките на един полюс. Това става като при изчертаването на геометрията се спазват минималните размери дадени на фигура 2.8 [68, 74, 123].

$\text{Alfa}=60^\circ\sim120^\circ$ -ъгъл между магнитите, $\text{Alfa}_D=50^\circ\sim120^\circ$ -ъгъл на дъгата на магнитното мостче, $m_{\min}=1\text{ mm}$ -минимално разстояние между магнитите, $h_{\min}=0.8\text{-}1.75\text{ mm}$ -минимално разстояние между дъгата на магнитното мостче и окръжността на ротора



Фиг. 2.8 Геометрично разположение на магнитите в рамките на един полюс

При вече определен обем на магнитите, са направени следните изследвания за машини с $P_2=10, 30, 60$ [KW] и $2p=6, 10$, са изследвани всички възможни размери на магнитите при определена стъпка на ъгъл **Alfa**. Построена е дъга във въздушната междина в рамките на един чифт полюси и снета кривата на магнитната индукция за 1500 точки от дъгата. Еквивалентната токова плътност в канала е определена спрямо цялото му сечение и е 10A/mm^2 . Амплитудата на първи хармоник на магнитната индукция във въздушната междина и размерите на магнита за машина с мощност $P_2=10$ [kW] са представени в табличен вид в таблица 2.4. Данните с удебелен шрифт представляват геометрията, при която е постигната магнитна индукция с максимална големина. Данните от таблица 2.4 показват, че при вече определен обем на магнитите и изследване на всички възможни размери на магнитите при определена стъпка на ъгъл **Alfa**, се определи магнитната индукция във въздушната междина. Получените данни показват, че първоначално изчисленията чрез алгоритъма за проектиране на СМПМ размери се отклоняват незначително от тези при които има максимална индукция във въздушната междина. Данните показват, че оптималното съотношение **Alfa/ Alfa_{max}=0.5÷0.8**.

Табл. 2.4 Амплитуда на магнитна индукция във въздушната междина при $P_2=10$ [KW]

$P_2=10$ [KW] $2p=6$				
Alfa	a	b	Alfa/Alfa _{max}	B
[gr.]	[mm]	[mm]	[-]	[T]
60	67.2	2.3	0.50	1.02556
62	65.2	2.4	0.52	-
64	63.4	2.5	0.53	1.03082
66	61.7	2.5	0.55	-
68	60.1	2.6	0.57	-
70	58.6	2.7	0.58	-
72	57.2	2.7	0.60	1.03866
74	55.8	2.8	0.62	-
76	54.6	2.9	0.63	-
78	53.4	2.9	0.65	-
80	52.3	3.0	0.67	1.04196
82	51.2	3.0	0.68	-
84	50.2	3.1	0.70	-
86	49.3	3.2	0.72	-
88	48.4	3.2	0.73	1.0436
90	47.5	3.3	0.75	-
92	46.7	3.3	0.77	-
94	45.9	3.4	0.78	-
96	45.2	3.5	0.80	1.0447
98	44.5	3.5	0.82	-
100	43.9	3.6	0.83	-
102	43.2	3.6	0.85	-
104	42.6	3.7	0.87	1.04424
106	42.1	3.7	0.88	-
108	41.5	3.8	0.90	-
110	41.0	3.8	0.92	-
112	40.5	3.8	0.93	1.04295
114	40.1	3.9	0.95	-
116	39.6	3.9	0.97	-
118	39.2	4.0	0.98	-
120	38.8	4.0	1.00	1.04153

$P_2=10$ [KW] $2p=10$				
Alfa	a	b	Alfa/Alfa _{max}	B
[gr.]	[mm]	[mm]	[-]	[T]
60	37.0	3.0	0.50	1.07184
62	35.9	3.1	0.52	-
64	34.9	3.2	0.53	-
66	34.0	3.2	0.55	1.06627
68	33.1	3.3	0.57	-
70	32.2	3.4	0.58	-
72	31.5	3.5	0.60	1.06994
74	30.7	3.6	0.62	-
76	30.0	3.7	0.63	-
78	29.4	3.7	0.65	1.06119
80	28.8	3.8	0.67	-
82	28.2	3.9	0.68	-
84	27.6	4.0	0.70	1.04796
86	27.1	4.1	0.72	-
88	26.6	4.1	0.73	-
90	26.2	4.2	0.75	1.0217
92	25.7	4.3	0.77	-
94	25.3	4.4	0.78	-
96	24.9	4.4	0.80	1.06055
98	24.5	4.5	0.82	-
100	24.1	4.6	0.83	-
102	23.8	4.6	0.85	1.02219
104	23.5	4.7	0.87	-
106	23.2	4.8	0.88	-
108	22.9	4.8	0.90	1.0178
110	22.6	4.9	0.92	-
112	22.3	4.9	0.93	-
114	22.0	5.0	0.95	1.01116
116	21.8	5.0	0.97	-
118	21.6	5.1	0.98	-
120	21.4	5.2	1.00	0.9865

Данните за магнитната индукция във въздушната междина при определена стъпка на ъгъл **Alfa** и при вече определен обем на магнитите са показани в таблица 2.4. Изследвани са всички възможни размери на магнитите при посочените машини. С удебелен шрифт са показани размерите на магнита, чрез които е постигната максимална индукция във въздушната междина. Анализът на получените резултати показва, че първоначално изчислените чрез алгоритъма за проектиране на СМПМ размери се отклоняват незначително от тези при които има максимална индукция във въздушната междина. Това е постигнато чрез итеративна корекция на настоящия алгоритъм. Данните показват, че оптималното съотношение **Alfa/ Alfa_{max}** е **0.5÷0.8**, което може да бъде използвано при следващо проектиране на СМПМ.

2.8 Данни за проектираната СМПМ

В таблица 2.7 са представени в табличен вид данните за една от проектираните СМПМ, чрез алгоритъма описан в настоящата глава.

Табл. 2.7 Данни на проектирана СМПМ

Данни за СМПМ				
1	Мощност на вала на машината	P_2	60	[KW]
2	Брой статорни фази	m	3	-
3	Фазно напрежение	U_1	350	[V]
4	Брой чифтове полюси	p	3	-
5	Честота на захранващото напрежение	f_1	50	[Hz]
6	к.п.д	η	90	[%]
7	Линейно токово натоварване	A	65	[kA/m]
8	Индукция във въздушната междина	B_δ	1.02	[T]
9	Брой статорни канали	Z	54	-
10	Брой канали за полюс и фаза	q	3	-
11	Външен диаметър на статора	D_a	0.35	[m]
12	Вътрешен диаметър на статора	D	0.27	[m]
13	Аксиална дължина	l_{fe}	0.176	[m]
14	Въздушна междина	δ	0.5	[mm]
15	Височина на статорния ярем	h_a	16.5	[mm]
16	Височина на канала	h_n	25.5	[mm]
17	Ширина на канала	b_n	9.8	[mm]
18	Ширина на магнита	a	73	[mm]
19	Дебелина на магнита по посока на намагнитване	b	9.5	[mm]

2.9 Изводи към втора глава

1. По описаният алгоритъм са проектирани шест СМПМ, при различни задания. Входните данни в началния етап на проектиране, като електромагнитни натоварвания, геометрични размери на магнита, минимални разстояния и други са задавани съгласно литературните източници или пък от собствено създадени зависимости. Създаването на собствено създадените зависимости се дължи на факта, че литературните данни за СМПМ са оскъдни или са предназначени за СМПМ с различно от V-образно разположение на магнитите в ротора.
2. При вече определен обем на магнитите, са изследвани на всички възможни размери на магнитите при определена стъпка на ъгъл **Alfa**, е определена магнитната индукция във въздушната междина. Определен е ъгъл **Alfa**, при който се получава максимална индукция във въздушната междина. Получените данни показват, че първоначално изчислените чрез алгоритъма за проектиране на СМПМ, размери се отклоняват

незначително от тези при които има максимална индукция във въздушната междина.

3. Създаденият алгоритъм за проектиране съчетава аналитична проверка на зададените данни, както и проверка чрез модел създаден в среда на FEMM.

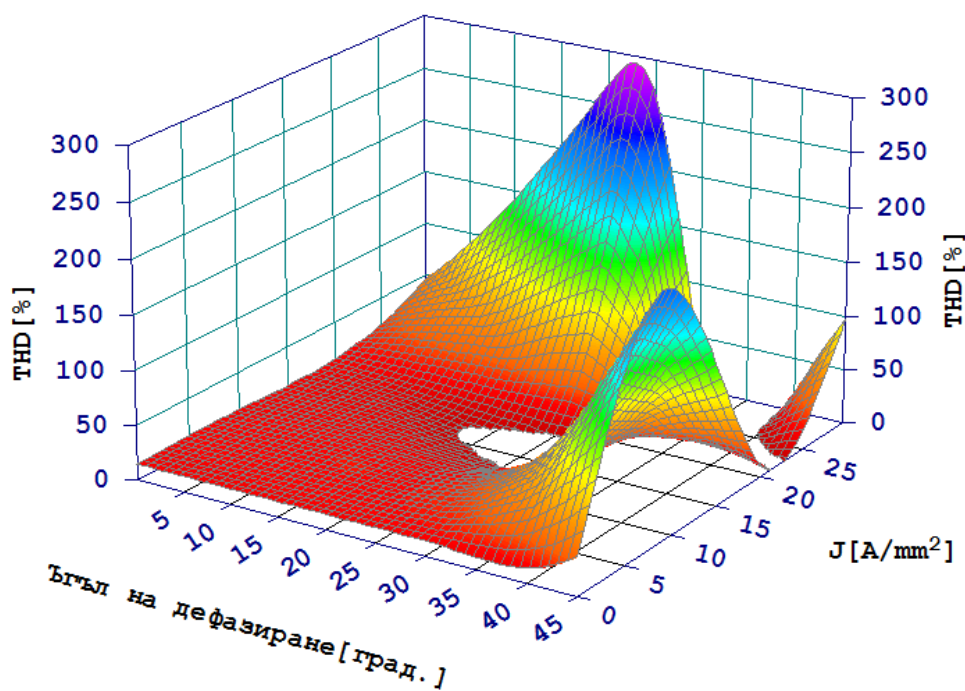
ГЛАВА 3. ИЗСЛЕДВАНИЯ НА СИНХРОННА МАШИНА С V –ОБРАЗ-НО РАЗПОЛОЖЕНИ ПОСТОЯННИ МАГНИТИ

3.1 Намотки

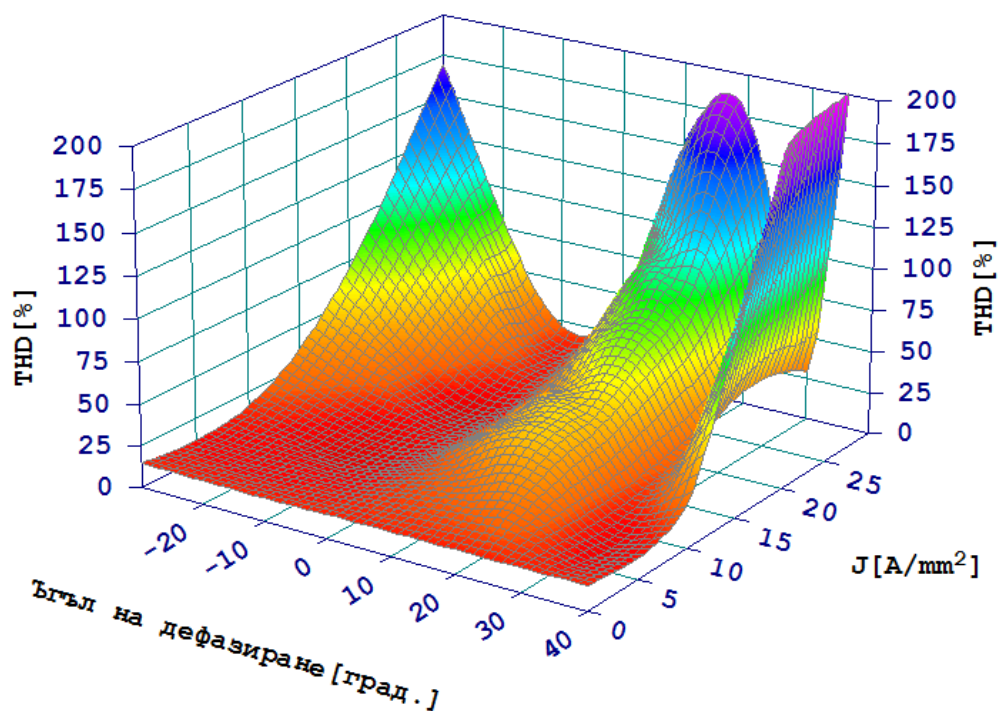
Като обект за изследване е синхронна машина с постоянни магнити с три вида статорни намотки:

- стандартна трифазна с $q=2$ (през два съседни канала обхванати от една полюсно-фазна група тече ток с еднаква фаза и големина)
- две независими намотки (през два съседни канала от полюсно - фазната група при трифазната намотка, тече фазен ток дефазиран на определен ъгъл. Разгледан е и случай при който в първия канал тече ток, а във втория - токът е равен на нула (този вид намотка е изследвана само в генераторен режим)
- шестфазна с $q=1$

На фигура 3.20 е показана зависимостта на процентния състав на висши хармоници спрямо първия, от токовата плътност и ъгъла на дефазирание в двигателен режим. На фигура 3.21 е показана аналогичната зависимост при генераторен режим.

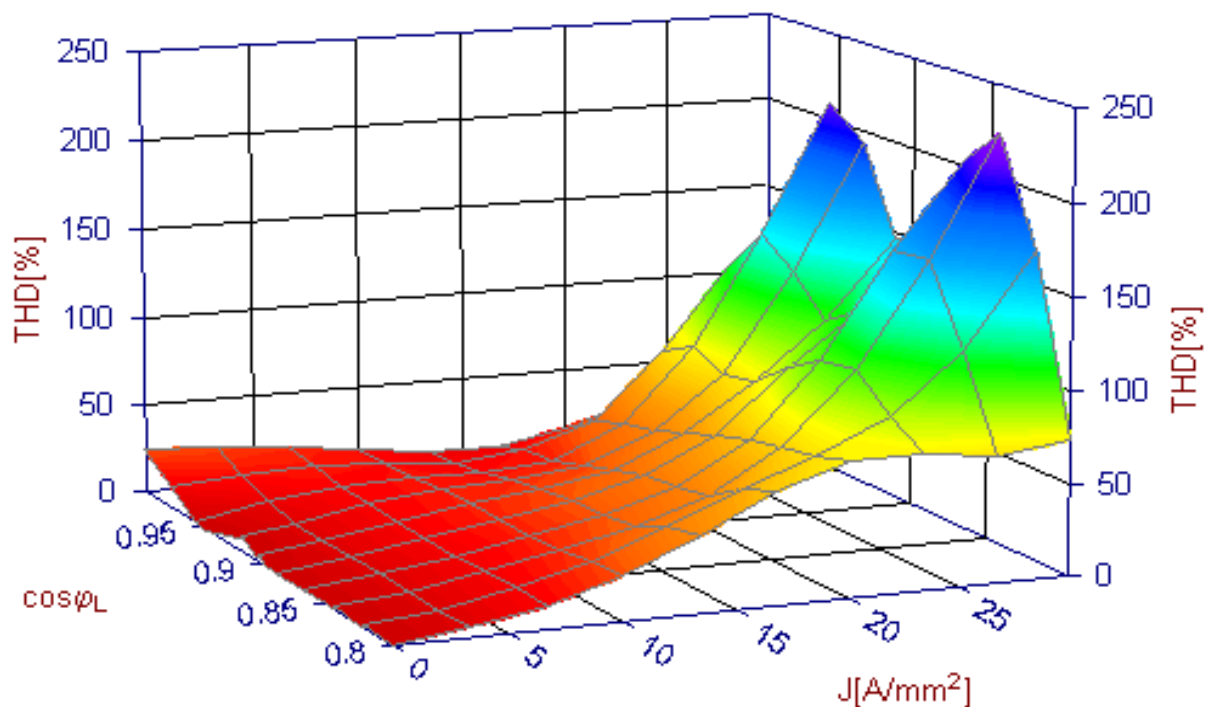


Фиг. 3.20. Зависимост на процентния състав на висши хармоници от токовата плътност и ъгъла на дефазирание в двигателен режим при две независими намотки

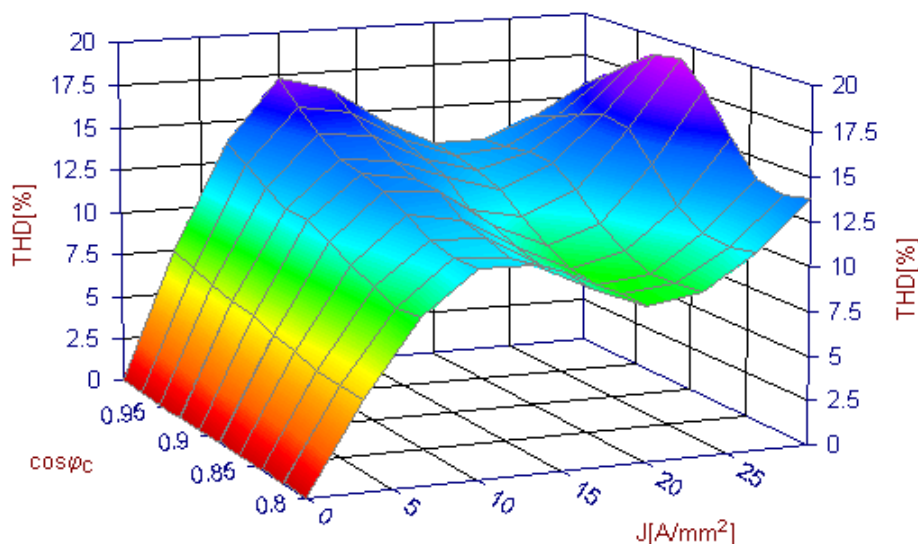


Фиг. 3.21. Зависимост на процентния състав на висши хармоници от токовата плътност и ъгъла на дефазиране в генераторен режим при две независими намотки

На фигура 3.34 е показано процентния състав на висши хармоници спрямо първия при промяна на токовата плътност и $\cos \varphi$ при индуктивен товар, аналогичната зависимост при капацитивен товар е показана на фигура 3.35.



Фиг. 3.34. Процентен състав на висши хармоници при различна токова плътност и $\cos \varphi$, при индуктивен товар



Фиг. 3.35. Процентен състав на висши хармоници при различна токова плътност и $\cos \varphi$, при капацитивен товар

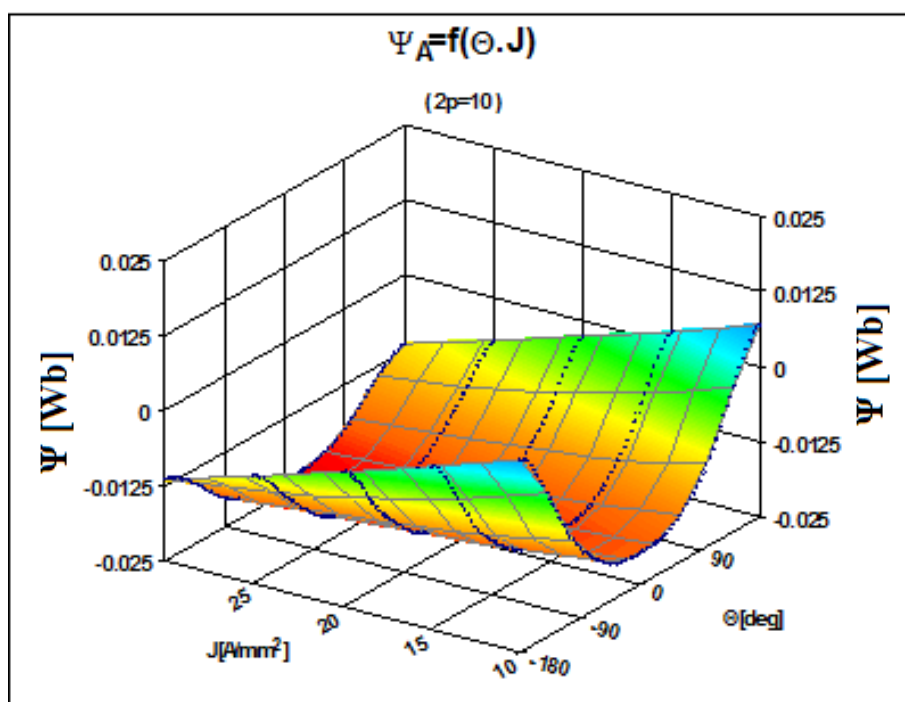
Изводи

1. В двигателен режим по отношение на въртящ момент и големина на първи хармоник, най-добри работни резултати показва конструкцията с две независими намотки, следва шестфазната и стандартната намотка. Постигането на най-добри резултати с две независими намотки изисква управление на ъгъла на дефазиране на тока във времето, както е показано на фигура 3.20. Следователно реализирането на задвижване със синхронна машина с тази конструкция изисква два инвертора със значително по-сложни алгоритми за управление.
2. В генераторен режим конструкцията с две независими намотки има най-добри показатели. Необходимо е акумулаторните батерии да бъдат разделени на две групи. Изследван е случай, при който е запазена само едната намотка, но тази конструкция е неефективна.
3. Оптималният ъгъл на дефазиране в генераторен режим на токовете между двете намотки, за подобряване на хармоничния състав е 30 градуса и дори малко изменение на ъгъла с пет градуса може да доведе до драстично влошаване на хармоничния състав.
4. При номинално натоварване (10 A/mm^2) е.д.н. и момента при конструкцията с две независими намотки са приблизително равни на тези при стандартна намотка. При максимално натоварване (30 A/mm^2) конструкцията с две независими намотки генерира 38% по-голямо е.д.н. и създава с 52% по-голям момент.
5. Като най-добър вариант по отношение на постигнатите характеристики и стойност на допълнителното оборудване е конструкцията с шестфазна намотка. Ако изискването за генерираната мощност е в порядъка 0-30 %

от мощността при двигателен режим конструкцията с две независими намотки може да бъде с най-добра енергийна ефективност.

3.2 Определяне на потокосцепленията

На фигура 3.39. е показана зависимостта на фазните потокосцепления от ъгъла на натоварване и статорния ток съответно за фаза А при синхронния двигател с $2p=10$. За същия двигател зависимостите за потокосцепленията ψ_d , ψ_q и ψ_o са изчислени и показани в дисертацията, както и за двигател с $2p=20$.



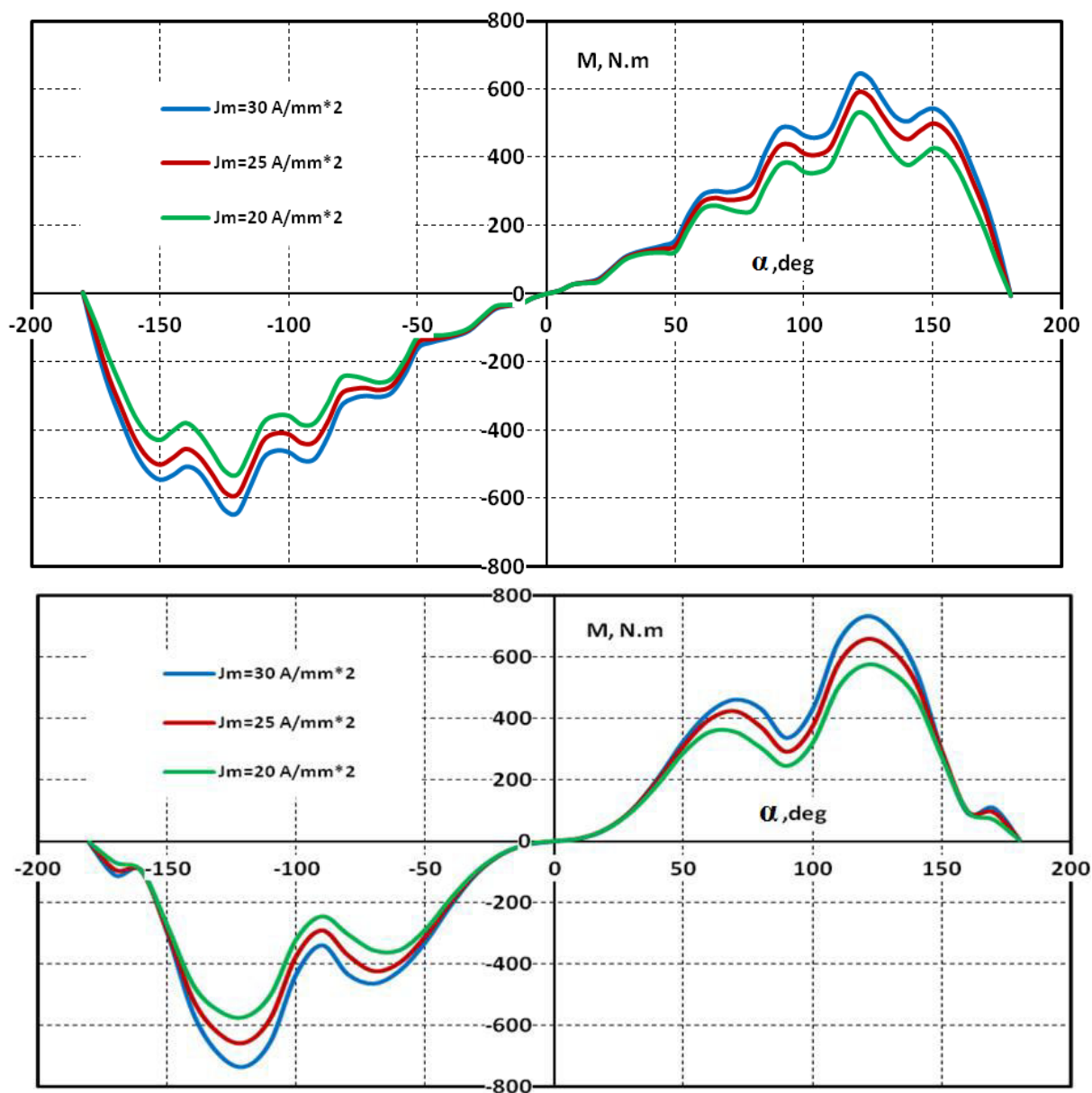
Фиг. 3.39. Изменение на потокосцеплението на фаза А в зависимост от ъгъла на натоварване и тока при $2p=10$

Изводи

1. Достигнатите резултати от приложения алгоритъм дават възможност да се получат апроксимиращи функции на потокосцепленията, които от своя страна са приложими при изграждане на модели в средата на Matlab с отчитане на насищането на магнитната верига.
2. Избраният подход за определяне на потокосцепленията позволява да се определят и други параметри на синхронната машина – например фазните индуктивности и индуктивни съпротивления, както и индуктивностите и индуктивните съпротивления по осите d и q.
3. Разработеният алгоритъм е приложим и при друг вид електрически машини.

3.3 Определяне на електромагнитния момент

На фигура 3.51. са показани зависимостите на статичният електромагнитен момент от положението на ротора (ъгъл α) за три стойности на товарния ток на синхронния двигател с $2p=10$, а на фигура 3.52. за двигателя с $2p=20$.



Фиг. 3.51 и 3.52. Статичен електромагнитен момент за трите токови плътности при двигател с брой полюси $2p=10$ и $2p=20$

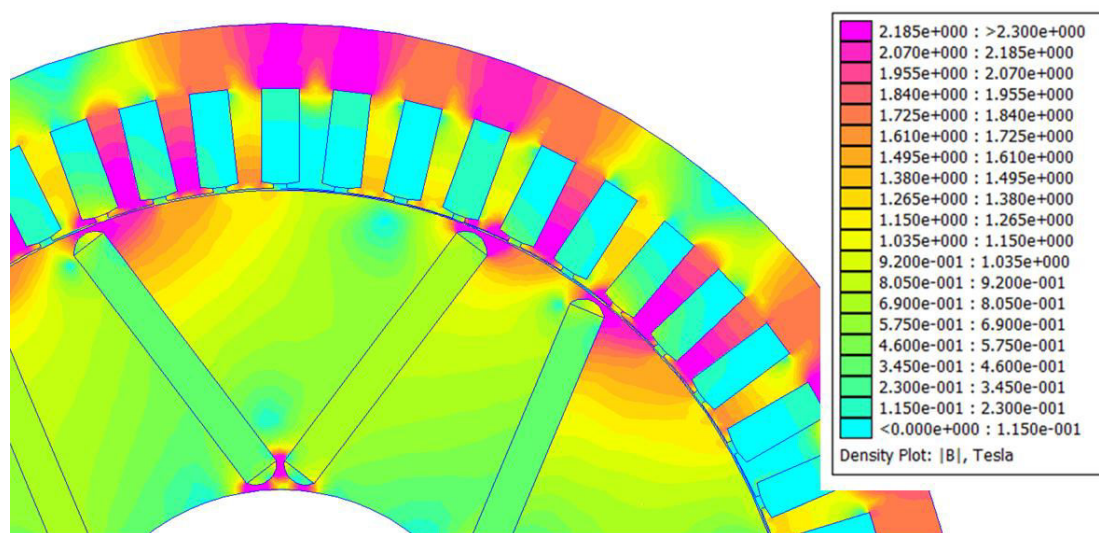
Изводи

1. Зависимостта $M=f(\alpha)$ при различните стойности на статорния ток е определена с отчитане на насищането на магнитната верига, съответстващо на кривата на намагнитване.

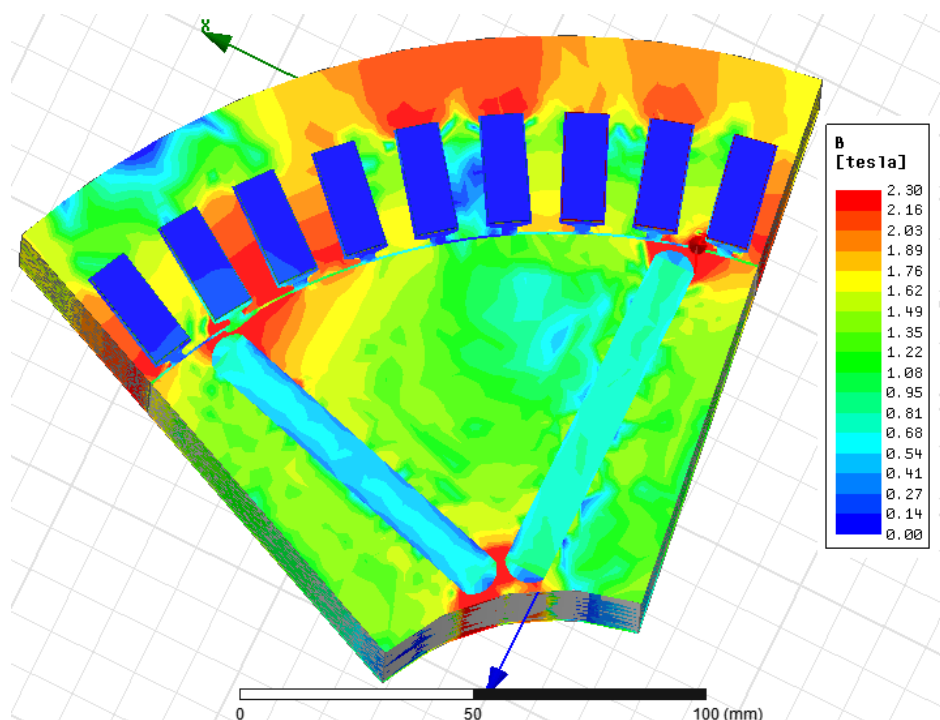
2. Максимумите и минимумите в зависимостта $M=f(\alpha)$ се дължат на различния брой статорни зъби и канали, лежащи срещу роторния полюс при завъртане на ротора. По този начин се променя съпротивлението на магнитната верига. Кривата на момента може да се коригира чрез преизчисляване размерите на зъбите и каналите или чрез използване на феромагнитни клинове.

3.4 Тримерен електромагнитен модел на СМПМ

Създаването на тримерен модел позволява изобразяване на пространственото разпределение на електромагнитни величини. Това от своя страна позволява още на етапа на проектиране на машината, да бъдат определени амплитудите на тези величини и при нужда да бъдат коригирани. При съставянето на тримерен електромагнитен модел за анализ чрез метода на крайните елементи, времето за решаване на задачата е силно зависимо от големината на изследваната област, размера на крайните елементи и параметрите на изчислителната техника на разположение на проектанта. Поради тази причина, използвайки симетрията на машината, се изследва само част от нея [8, 110]. Задават се гранични периодични условия по повърхнините на разрязване на машината [1]. За определяне на разпределението на магнитната индукция е създаден двумерен модел в среда на продукта FEMM и тримерен в среда на продукта Ansys Maxwell 2015. За СМПМ, с данни представени таблично в таблица 4.3. Пространственото разпределение на магнитната индукция при номинално натоварване, за двумерно и тримерно електромагнитно поле са показани на фигура 3.56 и фигура 3.57.



Фиг. 3.56. Пространствено разпределение на магнитната индукция при двумерен модел и $J=10\text{A/mm}^2$



Фиг.3.57. Пространствено разпределение на магнитната индукция при тримерен модел и $J=10\text{A/mm}^2$

Изводи

1. От направените изследвания се вижда, че създадените двумерен и тримерен модел дават много близки резултати. Получените резултати са сходни със зададените при етапа на проектиране.
2. Времето за решаване на двумерната задача е в пъти по-малко от това при тримерната. Поради тази причина в етапа на проектиране на синхронна машина с V - образно разположение на постоянните магнити, е целесъобразно да се използва двумерен модел, пестящ изчислително време.

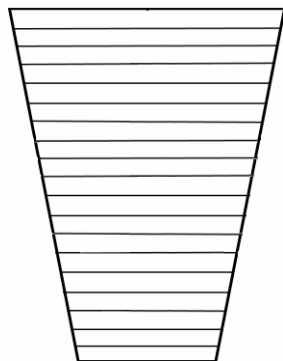
ГЛАВА 4. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ЗАГУБИТЕ В СТОМАНАТА И ТРИМЕРЕН ТОПЛИНЕН МОДЕЛ НА СМПМ

4.1 Определяне на загубите в стоманата

За определяне на загубите в стоманата в тялото на статорните зъби е разгледан модел, при който тялото на зъба е разделено по височина на 150 трапеца с равни височини – схематично показани на фигура 4.3. В пресечните точки на основите на трапеците с оста на симетрия са определени от численото решение 151 стойности на магнитната индукция. От тях, за

всеки трапец е изчислена средната стойност на магнитната индикация от стойностите, които принадлежат на пресечните точки на основите му с оста на симетрия. Така получената стойност на магнитната индукция се приема като константна стойност за обема съответстващ на съответния трапец, като в резултат на което се получава зависимостта на изменение на магнитната индукция по височина на

тялото на статорния зъб. За определяне на загуби във всеки обем е разработен софтуер в средата на MATLAB, чрез който от кривата на каталожната крива на специфичните загуби за стомана M250-35A са определени специфичните загуби в него.



Фиг.4.3. Разбиване на елементарни обеми на статорен зъб

В таблица 4.1 са показани загубите във всички статорни зъби при различни честоти на захранващото напрежение.

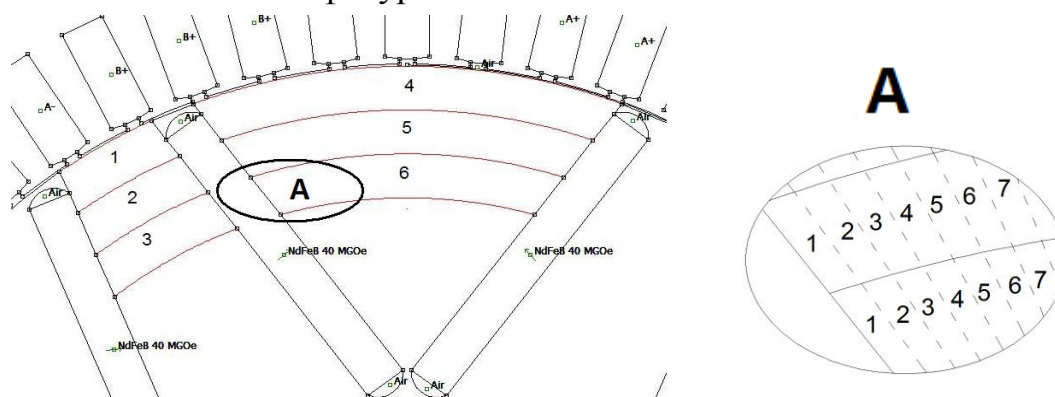
Табл. 4.1 Загуби във всички статорни зъби при различни честоти на захранващото напрежение

θ, deg	P, W	P, W	P, W	P, W	P, W
	50Hz	100Hz	200Hz	400Hz	1000Hz
$\theta=0$	9,89	29,9	76,9	218	710
$\theta=120$	8,64	25,7	66,2	187	616,9
$\theta=180$	4,07	11,5	29,3	82,7	299,8

Изводи

1. Загубите в стоманата на статорните зъби зависят от текущото разположение на всеки зъб в рамките на един полюс и при честоти по-високи от 200Hz съществува разлика в генерираните загуби по височината на зъба.
2. Получените резултати за честоти по-високи от 400Hz, показват, че генерираните загуби в зъбите на статора ще оказват значително влияние върху цялостното загряване на синхронната машина.

За определяне на загубите в стоманата на ротора, един полюс е разделен на шест зони показани на фигура 4.12.



Фиг. 4.12. Получените шест зони и разделянето им на елементарни обеми.

При отчитането на аксиалната дължина на машината, се получават 150 елементарни обема, с по 150 точки, за които специфичните загуби бяха определени по формулата [113].

$$(4.4) \quad p = k_h B^2 k_f f + \pi^2 \frac{\sigma d^2}{6} B^2 f^2 k_f + 8.67 k_v B^{1.5} f^{1.5} k_f,$$

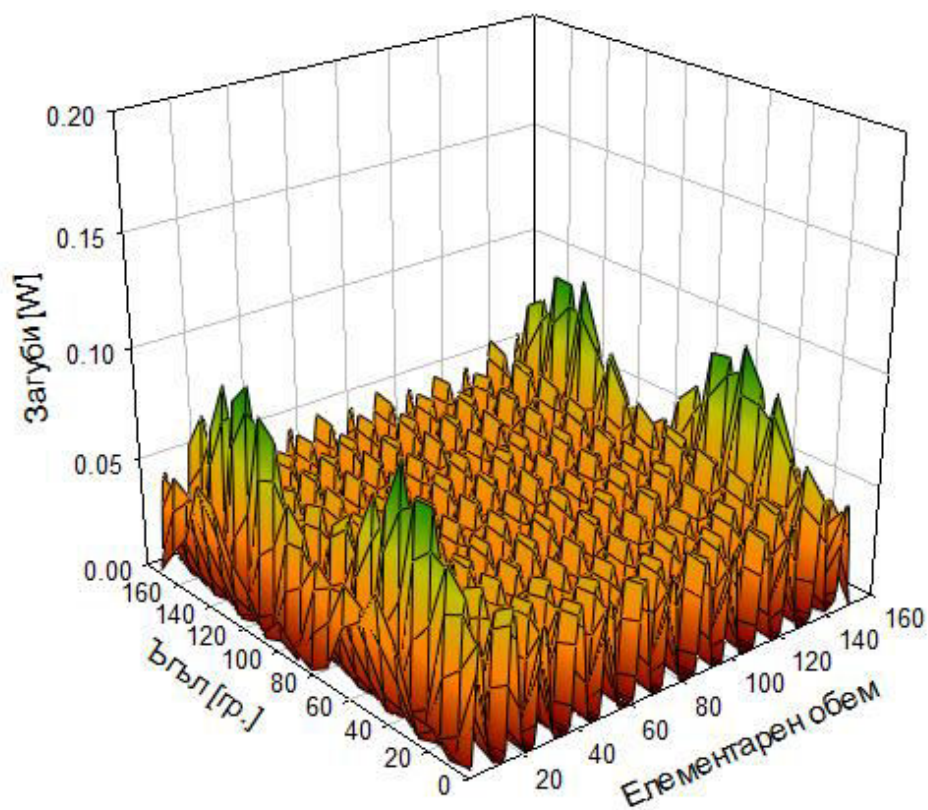
където K_f - коефициент на запълване на магнитопровода със стомана,
 σ - проводимост на изолацията,
 d - дебелина на статорния лист

На фигура 4.16 е показана зависимостта на загубите от положението на ротора и елементарен обем, за четвърта първа зона и празен ход. Аналогичната зависимост при $J=30\text{A/mm}^2$ е показана на фигура 4.22. На фигура 4.23 е показана зависимостта на сумарните загубите в ротора, в зависимост от зоната и токовата плътност. В таблица 4.4 е показано разпределението на загубите в различните зони на ротора при различни токови плътности. На базата на проведените изследвания е изведена зависимостта на $k_v=f(B_\delta)$. Тя е показана чрез формула 4.5.

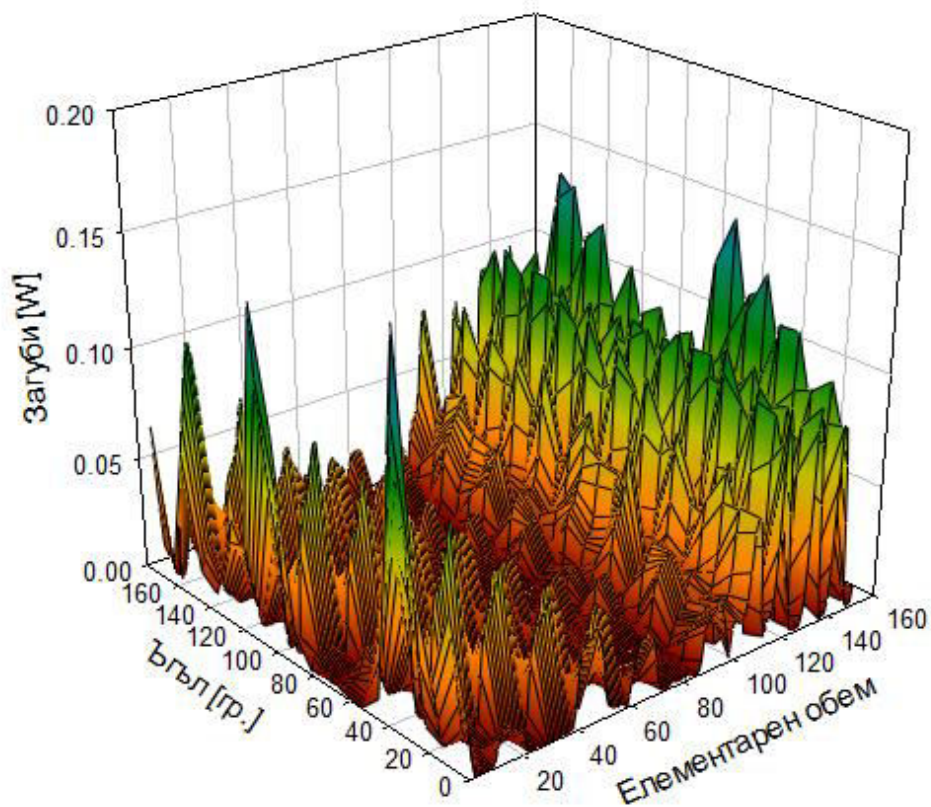
$$(4.5) \quad k_v = 0.002 B_\delta^{0.699}$$

Табл. 4.4 Разпределение на загубите в различните зони на ротора при различни токови плътности

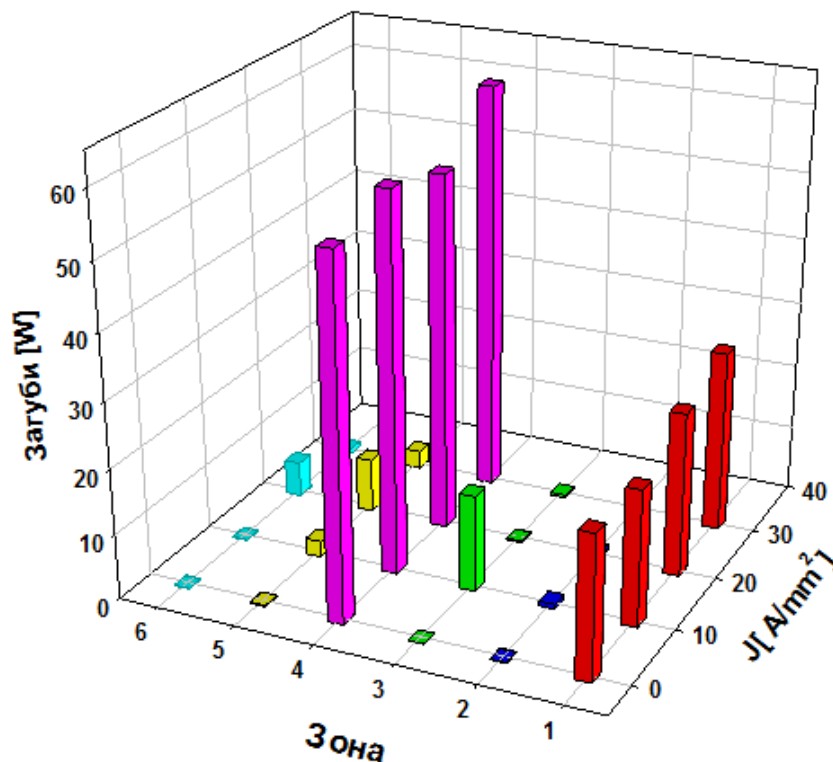
Зона/J	0	10	20	30
1	22.1	20.92	25.2	27.82
2	0.12	0.72	0.89	1.10
3	0.012	14.79	0.25	0.41
4	54.46	57.29	54.23	62.19
5	0.19	2.48	8.29	2.76
6	0.063	0.11	5.41	0.73



Фиг. 4.16. Загуби в стоканата в зависимост от положението на ротора и мястото на елементарния обем за четвърта зона (ос d) и $J=0\text{A/mm}^2$



Фиг. 4.22. Загуби в стоканата в зависимост от положението на ротора и мястото на елементарния обем за четвърта зона (ос d) и $J=30\text{A/mm}^2$



Фиг. 4.23. Сумарни загуби в стоманата на ротора, в зависимост от зоната и токовата плътност

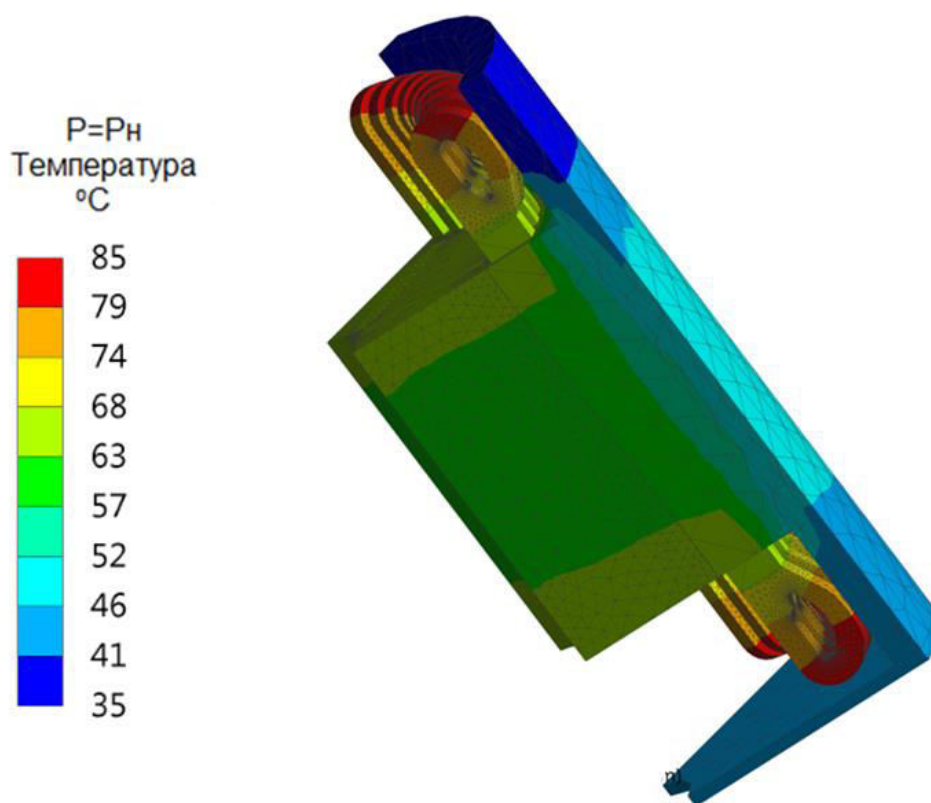
Изводи

1. От направените изследвания се вижда, че разликата в загубите в повърхностния слой на ротора, вследствие на пулсацията на магнитното поле, при празен ход и при натоварване е около двадесет процента. При празен ход максимума на загубите следва положението на ротора спрямо статорните зъби. По ос “d” при натоварване максимумът на загубите се премества към постоянните магнити като пиковите им стойности, дължащи се на неравномерната въздушна междина намаляват. По ос “q” загубите запазват положението си, но увеличават амплитудите си. Основната част от загубите се отделят в зоните, които са най-близко до въздушната междина.
2. Предложената формула за определяне на коефициента на загубите от вихрови токове достатъчно точно отразява физическите процеси в ротора на синхронна машина с “V” разположение на постоянните магнити, водещи до топлинни загуби.
3. Получените резултати за загубите могат да бъдат използвани при съставянето на топлинния модел на машината.

4.2 Тримерен топлинен модел на СМПМ

Създаването на топлинен модел позволява още в етапа на проектиране на всяка електрическа машина да бъдат определени температурите в различните части на машината, което от своя страна дава възможност да се изчисли

необходимата охладителна система. При синхронната машина с постоянни магнити е много важно определянето на температурата на постоянните магнити, поради влиянието на температурата върху магнитните им свойства. Статорната намотка е другият елемент от машината, чието определяне на температурата е особено важно. Проводниците и изолационните материали за направата ѝ могат да се разделят на няколко класа, според максимално допустимата работна температура. Поради възможностите на проектирани вече електрически машини използвани при хибридни автомобили, да работят при пикова мощност до два пъти номиналната [5, 18] и с изследваната машина, е симулирана работа до такава мощност. Направени са изследвания при начална температура охлаждащата течност 30~50°C през 5°C и различен дебит. Пространственото разпределение на температурата при номинално натоварване и първоначална температура на водата 30°C, за тримерно топлинно поле е показано на фигура 4.31.



Фиг. 4.31. Пространствено разпределение на температурата при $P=P_n$

Изводи

1. От направените изследвания се вижда, че проводниците и изолационните материали трябва да са от клас Н. Претоварването на СМПМ по мощност до два пъти е възможно, но при значително увеличаване на дебита на помпата.
2. Създаването на тримерен топлинен модел позволява още на етап проектиране да бъдат отчетени максималните температури в различните

части на машината, и охладителната система да бъде проектирана спрямо тях.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. Създаден е алгоритъм за проектиране на СМППМ използвани при хибридни автомобили, за първоначално определяне на размерите на машината със следните възможности:
 - мощност на вала на машината $P_2=10\div 100\text{ kW}$
 - брой чифтове полюси $p=3\div 6$
 - V-образно разположение на магнитите
- 1.2. Създадени са аналитични и графични зависимости на външния диаметър на статора във функция на вторичната мощност $D_a=f(P_2)$ и електромагнитните натоварвания във функция от външния диаметър на статора $A=f(P_2)$ и $B_\delta=f(P_2)$.
- 1.3. Определени са оптималните размери на магнита, при постоянен обем на магнитите, чрез изследване на хармоничен състав на кривата на магнитната индукция във въздушната междина. Определяне на оптималното съотношение на ъгъла между магнитите $\text{Alfa}/\text{Alfa}_{\max}=0.5\div 0.8$, което може да бъде използвано при следващо проектиране на СМППМ.
4. Изследвани са СМППМ с различни типове намотки (трифазна намотка, две независими намотки и шестфазна намотка) в генераторен и двигателен режим, при различни натоварвания за определяне на оптималните условия на работата на машината. Определен е оптималният ъгъл на дефазиране на токовете при две независими намотки в двигателен и генераторен режим. Направени са препоръки за приложимостта на различните типове намотки.
5. Създадени са алгоритми за определяне на:
 - електромагнитния момент и потокосцепленията при различни натоварвания и отчитане на насищането на стоманата.
 - загубите в стоманата във функция от текущото разположение на всеки статорен зъб и по височината му.
 - загубите в стоманата на статора във функция от честотата на захранващото напрежение.
 - пространственото разпределение на загубите в стоманата на ротора по осите на машината
6. Създаден е алгоритъм за проектиране на охладителна система на СМППМ.
7. Създаване на тримерен електромагнитен и топлинен модел на СМППМ в среда на Ansys Maxwell 2015, който позволява още в етапа на проектиране да се определи диапазона на електромагнитните и топлините натоварвания, при които в изолационните и магнитните материали няма да настъпят необратими промени.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Ризов, П. , Р.Спасов, Ц. Стоянов, В. Захариев, Определяне на зависимостта на потокосцепленията от натоварването при синхронни машини с постоянни магнити за хибридни автомобили, Годишник на Технически Университет – София 2014, Том 64, книга 4, стр. 97-104.
2. Спасов, Р. , П. Ризов, В. Захариев, Ц. Стоянов, Приложение на метода на крайни елементи за определяне на момента и загубите в зъбите на статора при синхронни двигатели с вътрешни магнити, Годишник на Технически Университет – София 2014, Том 64, книга 4, стр. 161-170.
3. Rizov, P. , R. Spasov, T. Stoyanov, V. Zahariev, The application of finite element method for determining the THD in the electromotive force in a synchronous machine with permanent magnets under different loads, Proceedings of XIV International conference on electrical machines, drives and power system Varna, Bulgaria 1.10.2015-3.10. 2015, pp. 7-13.
4. Спасов, Р. , П. Ризов, Ц. Стоянов, В. Захариев, Изследване на вида на статорната намотка на синхронна машина с постоянни магнити за постигане на максимална енергийна ефективност, Годишник на Технически Университет – София 2016, Том 66, книга 1, стр.127 – 136.
5. Стоянов, Ц. , Електрически машини за хибридни автомобили, Годишник на Технически Университет – София –2017, Том 67, книга 1, стр. 231 - 240.
6. Спасов, Р. , П. Ризов, Ц. Стоянов, В. Захариев, Определяне на загубите в ротора на синхронна машина с постоянни магнити за хибридни автомобили, Годишник на Технически Университет – София –2017, Том 67, книга 1, стр. 241 - 249.

SUMMARY

PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR USED IN HYBRID CARS

The hybrid car is a vehicle that has two or more energy sources, but in the common use hybrid car means that the vehicle has a propulsion due to both an Internal Combustion Engine and an electrical machine, while the energy source are fuel and batteries. Although different kind of electrical machines have been used to propel the vehicles, the V-shaped permanent magnet synchronous motors have become more and more attractive, because of their high efficiency, high power density, and high reliability.

Chapter One presents a survey and analysis of information resources on the hybrid cars distribution, future development and their advantages and disadvantages. The chapter describes data on hybrid cars model of the major automotive manufactures. This part of the work also give information about the

different types of the traction motors used in hybrid cars and requirements to them. The hybrid car's structures are described.

Chapter Two presents a methodology for design of the V-shaped permanent magnet synchronous machine. There is an algorithm given for determining machine's dimensions, volume of the magnets and verification calculations.

Chapter Three systemizes and analyses results of a different types of researches of the V-shaped permanent magnet synchronous machine. A permanent magnet synchronous machine with three types of stator windings is analyzed. This part of the work also give information about calculation of electromagnetic torque and flux linkage.

Chapter Four presents calculation of iron losses. This part of the work also give information about 3D thermal analysis of a water cooled machine.