# ПРИЛОЖЕНИЕ НА МЕТОДА НА КРАЙНИ ЕЛЕМЕНТИ ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА МОМЕНТА И ЗАГУБИТЕ В ЗЪБИТЕ НА СТАТОРА ПРИ СИНХРОННИ ДВИГАТЕЛИ С ВЪТРЕШНИ МАГНИТИ

### Радослав Спасов, Пламен Ризов, Виктор Захариев, Цветомир Стоянов

**Резюме:** В доклада е показан алгоритъм за определяне на електромагнитния момент на синхронен двигател с възбуждане от вътрешно разположени в ротора постоянни магнити (СДВПМ). Определени са загубите в стоманата по височина на статорните зъби във функция от честота на захранващото напрежение. Изследванията са извършени чрез моделиране на магнитното поле посредством програмния продукт FEMM и собствени програмни модули в средата на Matlab и Excel за изчисляване на загубите в статорните зъби. **Ключови думи:** метод на крайни елементи, синхронни двигатели с вътрешни магнити, загуби

# THE APLICATION OF THE FINITE ELEMENT METOD FOR DETERMIN-ING THE TORQUE AND THE LOSSES IN THE STEAL'S TEETH IN THE STATOR OF A SYNCHRONOUS MACHINE WITH IMBEDDED PERME-NENT MAGNETS

## Radoslav Spasov, Plamen Rizov, Victor Zahariev, Tsvetomir Stoyanov

**Abstract:** In the report there is an algorithm given for determining of the magnetic moment of a synchronous machines with excitement from permanent magnets imbedded in the rotor(SPMM). The steel's losses are determined by a function of the height of the stator's teeth and the supply's voltage frequency. The study was made with modeling of the magnetic field by the software "FEMM", and the program modules that calculate the steel's losses are created in the software environment MatLab and Excel.

**Key words:** Finite Element Method (FEM), Synchronous Permanent Magnet Motors (SPMM), losses.

#### 1. Въведение

Към електрическите двигатели използвани в хибридните автомобили се налагат изисквания по отношение на получаваната мощност от единица обем, с което се цели намаляване на теглото на автомобила. В последните години в хибридните автомобили са се наложили синхронни електродвигатели с така нареченото V-образно вътрешно разположение на редкоземни постоянни магнити. Принципната конструкция на активната част на този вид двигатели е показана на фиг.1 [2].



Фиг.1. Напречен разрез на машина с "V"-оформени в ротора магнити

Намаляването на масата на електрическите двигателите се постига по няколко начина, конто основно са свързани с увеличаване на оборотите и токовите натоварвания на намотките: използване на високо енергийни постоянни магнити и висококачествени изолационни материали, специална конструкция на секциите на статорната намотка с цел постигане на висок коефициент на запълване на статорните канали, използване на вода или масла за директно охлаждане на секциите на статорната намотка, използване на електротехническа стомана с дебелина 0.35 мм и ниски специфичните загуби. По данни от литературни източници, при маслено охлаждане се допуска токова плътност в статорната намотка до 30 Å/мм\*<sup>2</sup>, което в голяма степен обуславя значителното топлинно натоварване на изолационната система на синхрония двигател. Високите обороти на ротора се постигат при честоти на захранващото напържените от порядъка до 2400 Hz. Загубите в електротехническата стоманата използвана за изработване на статорните магнитопроводи силно зависят от честотата на захранващото напрежение, както е показано на фиг.2 за стомана М250-35А [3,4].

От показаните графични зависимости се вижда, че при високо честоти на захранващото напрежение, загубите в стоманата нарастват значително – от порядъка на десетки пъти при сравнение на специфичните загуби при индукция 1.5 Т и честоти 200Hz и 2400 Hz. Използваните секции в статорните канали са от тип "фиба", изработени от правоъгълен проводник. Това налага използването на канали с успоредни страни и съответно статорни зъби с различно сечение по височина., което от своя страна ще обуслови различна магнитна индукция в различните части по-височина на статорните зъби. Съответно загубите в стоманата на статорните зъби, които ще се генерират в различните техни части по височина ще се различават съществено по-между си. Тази разлика ще е особено значителна при работа на двигателите с високи обороти.

Описаните по-горе два вида загуби имат важно значение за загряване на дигателите, което определя масата на охладителната система от една страна. От друга страна влияят директно върху к.п.д. на машината. При този тип двигатели стремежа е постигане на висок к.п.д, тъй като захранването им се осигурява от преносими акумулатори, който са източници с ограничено количество енергия.





Друг важим параметър на синхронните двигатели с постоянни магнити, използвани в автомобили е произвеждания от тях електромагнитен момент и неговото изменение при промяна на ъгъла на натоварване.

Целта на настоящия доклад е посредством моделиране на магнитното поле в синхронни двигатели с V-образни вътрешни постоянни магнити да се:

- определи зависимостта на електромагнитния момент от ъгъла на натоварване и тока;

- изчислят загубите в статорните зъби в зависимост от положението на зъба в рамките на едно полюсно деление; в зависимост от индукцията в

сегментите разположени по височина на статорните зъби; в зависимост от честотата на захранващото напрежение

#### 2. Използвани методи за анализ

За определяне на зависимостта на електромагнитния момент от ъгъла на натоварване и тока и изчисляване на загубите в статорните зъби в синхронни двигатели с постоянни магнити е приложено числено моделиране на магнитното поле в тях посредством на метода на крайните елементи, като е разработен 2D стационарно магнитно поле на модел.

Допълнително са разработени софтуерни приложение в средата на Matlab и Excel за изчисляване на загубите в статорните зъби.

#### 3. Обект на изследване

Като обекти за изследване са използвани два синхронни двигателя с различен брой полюси и еднакъв брой статорни канали. Входните данни за изследването са дадени в таблица 1.

						_	1 a	лица 1.
		2p=10	2p=20			2p=1	0	2p=20
въздушна междина	ММ	0,7	0,7	височина на статорен канал	MM	18,1		18,1
аксиална дължина	ММ	90	90	широчина на статорен канал	ММ	5,8		5,8
външен диаметър на статора	ММ	242	242	външен диаметър на ротора	MM	182,8	8	182,8
вътрешен диаметър на статора	ММ	184,2	184,2	брой магнити в ротора	-	10		20
брой на статорните канали	-	60		материал на магнитите	NdFeB 40 MGOe		1 4(	NdFeB ) MGOe

#### 4. Разработени числени модели



# Фиг.3. Модел във FEMM за определяне на електромагнитния момент при синхронен двигател с 2p=10

За определи зависимостта на електромагнитния момент от ъгъла на натоварване и тока за разработени 2D модели в средата на програмния продукт FEMM за синхронни двигатели с "V" конструкция на постоянни магнитите с брой полюси 2p=10 и 2p =20 Статорната намотка е трифазна еднослойна.



Фиг.4. Модел във FEMM за определяне на загубите в статорните зъби при синхронен двигател с 2p=10

Разпределението на токовите плътности в статорните канали при двигателя с 2p=10 е показано на фиг.5. Показан е онзи момент от време, при който моментната стойност на тока във фаза А има стойност равна на максималната, а моментните стойности на тока във фази В и С са равни на половината от максималната стойност. Разработени са варианти за три стойности статорния ток, които съответстват на еквивалентна токова плътност в канала 30 А/мм<sup>2</sup>, 25 А/мм<sup>2</sup> и 20 А/мм<sup>2</sup>. Еквивалентната токова плътност в канала е определена спрямо цялото му сечение. За получаване на зависимостите на електромагнитни момент от ъгъла на натоварване за посочените по-горе стойности на токовата плътност, са разработени варианти за всяка от тях, при които ротора последователно се завърта на един геометричен градус в рамките на градусите на две полюсни деление при постоянна стойност на статорния ток.

На фиг.3 е показан модела за определяне на зависимостта на електромагнитния момент от ъгъла на натоварвана при различни стойности на тока в статора. Моментът се изчислява по дъга с дължина равна геометричните градуси на две полюсни деления и разположена в средата на въздушната междина по метода на Тензора на напреженията [1].

Моделът за определяне на загубите в статорните зъби на едно полюсно деление е показан на фиг.4. В осите на зъбите лежащи в рамките на едни полюс са поставени контури, които се използват за получаване от численото решение на изменението на индукцията по височина на зъбите. Впоследствие тази



Фиг.5. Разделение на токовите плътности в каналите на статорната намотка в модел във FEMM при 2p=10



Фиг.ба. Разпределение на магнитната индукция за двигател с брой полюси 2p=10 при θ=0°и J<sub>екв A</sub>=30 A/mm<sup>2</sup> зависимост се използва за определяне на зависимостта на загуби в тях от височината в зъба.

За синхронния двигател с брой полюси 2p=20 са разработени подобни модели, като при него броя на постоянните магнити е два пъти поголям, а в статорния полюс съдържа три канала.

## 5. Резултати от изследванията

На фиг. 6 е показано разпределението на магнитната индукция в напречното сечение на синхронния двигател с постоянни магнити с 2p=20 (Фиг.6b) и с 2p=10 (Фиг.6a).

На фиг. 7 са показани зависимостите на електромагнитния момент от ъгъла на натоварване за три стойности на товарния ток на синхронния двигател с 2p=10, а на фиг.8 за двигателя с 2p=20.

За определяне на загубите в стоманата в тялото н статорните зъби е разгледан модел, при който тялото на зъба е разделено по-височина на 150 трапеци с равни височини – схематично показани на фиг. 9. 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 сраната стойност на магнитната стойностите. индикация ОТ 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.6b. Разпределение на магнитната индукция за двигател с брой полюси 2p=20 при θ=0°и J<sub>екв A</sub>=30 A/mm<sup>2</sup>



Фиг.7 Момент за трите токови плътности при двигател с брой полюси 2p=10 (горе) и 2p=20 (долу)

В Excel е разработен модул за изчисляване на загубите във всеки обем съответстващ на всеки трапец с отчитане на неговата маса, на специфичните загуби в него и дължината на машината. По описания по-горе начин се



изчисляват загубите във всички статорни зъби, попадащи в едно полюсно деление. След което с отчитане на броя на всички полюси се изчисляват загубите в тялото на всички статорни зъби.

:

Фиг.8 Разбиване на елементарни обемни на статорен зъб

Разработения в среада на МАТLAВ софтуер има следния код

clc; clear; format compact; F = dlmread('femm.txt', '', 'B1..B151');P=abs(F); $B=[0 \ 0.1 \ 0.2 \ 0.3 \ 0.4 \ 0.5 \ 0.6 \ 0.7 \ 0.8 \ 0.9 \ 1 \ 1.1 \ 1.2 \ 1.3 \ 1.4 \ 1.5 \ 1.6$  $1.7 \ 1.81;$ p 50=[0 0.02 0.06 0.13 0.21 0.31 0.41 0.52 0.66 0.81 0.98 1.15 1.37  $1.65 \ 2 \ 2.35 \ 2.65 \ 2.87 \ 3.06];$ p 100=[0 0.04 0.14 0.31 0.51 0.75 1.01 1.31 1.64 2 2.41 2.87 3.4 4.3 4.83 5.72 6.61 7.5 8.39]; p 200=[0 0.08 0.33 0.73 1.23 1.82 2.49 3.26 4.12 5.07 6.14 7.33 8.69 10.3 12.4 14.7 17 19.3 21.6]; p 400=[0 0.21 0.9 1.93 3.24 4.81 6.69 8.82 11.2 14 17.1 20.6 24.6 29.2 35.1 41.6 48.1 54.6 61.1]; p 1000=[0 0.98 3.65 7.58 12.7 18.8 26.3 35.2 45.7 58.1 72.6 89.6 106.6 123.6 140.6 157.6 174.6 191.6 208.6]; p 2500=[0 4.09 14.8 30.6 51.7 78.8 113 155 208 273 352 431 510 589 668 747 826 905 984]; p50=interp1(B,p 50,P,'line','extrap'); p100=interp1(B,p 100,P,'line','extrap'); p200=interp1(B,p 200,P,'line','extrap'); p400=interp1(B,p\_400,P,'line','extrap'); p1000=interp1(B,p 1000,P,'line','extrap'); p2500=interp1(B,p 2500,P,'line','extrap'); Zagubi=table(P,p50,p100,p200,p400,p1000,p2500); writetable(Zagubi, 'rezult.xlsm')

От фиг. 9 до фиг.14 са показани измененията на загубите в обемите по височина на зъбите попадащи в един полюс на статора.при честоти 50, 10, 200, 400, 1000 и 2400 Нz всъответно в зъб номер до зъб номер 6. Зъб номер едно с разположения най вляво на фиг.5. В тажлица 2 са показани загубите във всички статорни зъби при различни честоти на захранващото напрежение.



θ	P, W	P, W	P, W	P, W	P, W	P, W
	50Hz	100Hz	200Hz	400Hz	1000Hz	2400Hz
$\theta = 0$	9,89	29,9	76,9	218	710	3341
θ=120	8,64	25,7	66,2	187	616,9	2902
θ=180	4,07	11,5	29,3	82,7	299,8	1414

Таблица 2.

## 7. Анализ и изводи

- 1. Зависимостта M=f(θ) 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(θ) се дължат на различния брой статорни зъби и канали, лежащи срещу роторния полюс при работа с различни стойности на ъгъла на натоварване.
- 3. 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.
- 4. Получените резултати за честоти по-високи от 400Hz, показват генерираните загуби в зъбите на статора ще оказват значително влияние върху цялосното загряване на синхронната машина.

# ЛИТЕРАТУРА

- [1] D. Meeker, Finite Element Method Magnetics, Version 3.3, User's Manual
- [2] F. Libert, Royal Institute of Technology Department of Electrical Engineering Electrical Machines and Power Electronics, Stockholm 2004, Design, Optimization and Comparison of Permanent Magnet Motors for a Low-Speed Direct-Driven Mixer pp.7-24.
- [3] Y. Chen P Pillay, 0-7803-7420-7/02/\$17.00 (C) 2002 IEEE An Improved Formula for Lamination Core Loss Calculations in Machines Operating with High Frequency and High Flux Density Excitation
- [4] M. Barcaro N. Bianchi F. Magnussen, *The Open Fuels & Energy Science Journal*, 2009, 2, 135-141, PM Motors for Hybrid Electric Vehicles

Автори: Радослав Лазаров Спасов доц. д-р инж. от ТУ-София, катедра "Електрически машини", e-mail: lrs@tu-sofia.bg;Пламен Миланов Ризов, доц. д-р инж. от ТУ-София, катедра "Електрически машини", e-mail: pmri@tusofia.bg;, инж. Виктор Захариев Захариев докторант от ТУ-София, катедра "Електрически машини", e-mail:sun\_goko@gmail.com, инж. Цветомир Методиев Стоянов докторант от ТУ-София, катедра "Електрически машини", e-mail:cecinh@abv.bg

Постъпила на 15.12.2014г. Рецензент: доц. д-р инж. Михо Михов