

ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ЗАВИСИМОСТТА НА ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЯТА ОТ НАТОВАРВАНЕТО ПРИ СИНХРОННИ МАШИНИ С ПОСТОЯННИ МАГНИТИ ЗА ХИБРИДНИ АВТОМОБИЛИ

Пламен Ризов, Радослав Спасов, Цветомир Стоянов, Виктор Захариев

Резюме: В доклада е показан алгоритъм за определяне на изменението на фазните потокосцепления в зависимост от натоварването, базиран на числено моделиране на електромагнитното поле в синхронна машина с възбуждане от постоянни магнити. Определени са фазните потокосцепления с отчитане на насищането на магнитната верига на синхронната машина. Изчислени са потокосцепленията по напречната и надлъжната ос на синхронната машина.

Ключови думи: метод на крайни елементи, синхронни машини с постоянни магнити, потокосцепление.

DETERMENING THE DEPENDENCY OF THE FLUX LINKAGE FROM THE LOAD IN SYNCHRONOUS MACHINES WITH PERMANENT MAGNETS FOR HIBRID AUTOMOBILS

Plamen Rizov, Radoslav Spasov, Tsvetomir Stoyanov, Victor Zahariev

Abstract: In the report there is an algorithm given for determining of the changes in the phase flux linkage relative to the load based on the numerical analysis of the electromagnetic field in a synchronous machines with excitement from permanent magnets imbedded in the rotor. The phase flux linkages are determined with taking in account the saturation of the magnetic circuit of the synchronous machine. The flux linkage is calculated according to the voltage and the longitudinal axis of the synchronous machine.

Key words: Finite Element Method (FEM), synchronous machines with permanent magnets, flux linkage.

1. Въведение

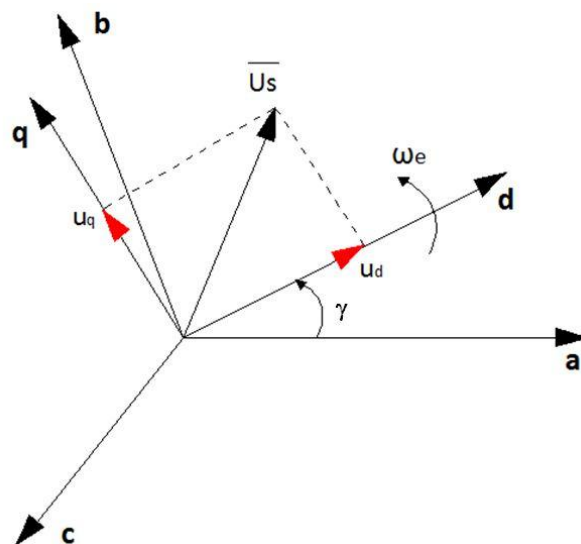
Напоследък, синхронните двигатели с постоянни магнити стават все по-популярни. Те намират най-различни приложения: използват се за задвижване на помпи, електромобили, компресори и други съоръжения.[4]. Причините за това са техните характеристики: голяма мощност и момент отнесени към единица тегло, минимална поддръжка, работа с константна мощност в голям скоростен диапазон [2, 3]. Един от начините за постигането на тези характеристики

е използване на методи на управление свързани с непрекъснато контролиране ориентацията на полето и ротора. В процеса на проектиране на синхронните двигатели с постоянни магнити в ротора е необходимо да се изследват динамичните характеристики. За тази цел се използват математически модели на синхронната машина с вътрешно разположени постоянни магнити които се разработват най-често в среда на Matlab/Simulink. Тези модели е възможно да се съставят на базата на фазните уравнения на синхронните двигатели представени, чрез фазните потокосцепления:

$$(1) \quad \begin{aligned} U_a &= R_s \cdot i_a + \frac{d\psi_a}{dt} \\ U_b &= R_s \cdot i_b + \frac{d\psi_b}{dt}, \\ U_c &= R_s \cdot i_c + \frac{d\psi_c}{dt} \end{aligned}$$

където U_a, U_b, U_c са фазните статорни напрежения,
 ψ_a, ψ_b, ψ_c са фазните потокосцепления
 R_s - статорно съпротивление

С цел опростяване на модела на машината уравненията на напреженията на машината се трансформират от система с три неизвестни в система с две неизвестни, като за тази цел се преминава от координатна система **abc** неподвижно свързана със статора към в роторната координатна система **dq** въртяща се със синхронна скорост, Връзката между двете координатни системи е показана на фиг.1.



Фиг.1. Връзка между abc и dq координатни системи

където ω_e е синхронната честота:

$$(2) \quad \omega_e = \frac{d\gamma}{dt},$$

където γ е ъгъла между фиксираната за статора ос „a“ и въртящата се ос „d“.

В dq координатната система фазните уравнения се трансформират във вида:

$$(3) \quad \begin{bmatrix} U_{sd} \\ U_{sq} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\gamma - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\gamma) & -\sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\gamma - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix}$$

където U_{sd} , U_{sq} са d и q компонентите на векторите на статорното напрежение,

След направената трансформация, уравненията на фазните напрежения (1) представени във въртящата се dq координатна система придобиват вида:

$$(4) \quad \begin{aligned} U_{sd} &= R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_e \cdot \psi_q \\ U_{sq} &= R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\psi_q}{dt} - \omega_e \cdot \psi_d \end{aligned}$$

където i_{sd} , i_{sq} , са статорните токове по осите d и q
 ψ_d , ψ_q са потокосцепления по осите d и q

Уравненията на потокосцепленията в dq координатна система са следните

$$(5) \quad \begin{aligned} \psi_d &= L_d \cdot i_d + \psi_m \\ \psi_q &= L_q \cdot i_q \end{aligned}$$

където ψ_m е потокосцеплението на постоянните магнити.

Индуктивностите в (5) се изчисляват в процеса на проектиране на двигателите по класическите аналитични методи, без отчитане на насищането на стоманата. Фазните потокосцепления се определят по следния начин :

$$(6) \quad \Psi_{(A,B,C)} = \sum_{i=1}^q \frac{w_c}{S_c} l_1 \cdot \int_{S_{c(A,B,C)+}} A \cdot ds - \sum_{i=1}^q \frac{w_c}{S_c} l_1 \cdot \int_{S_{c(A,B,C)-}} A \cdot ds$$

Потокосцепленията ψ_d , ψ_q , ψ_0 се определят по следния начин :

$$(7) \quad \Psi_d = \frac{2}{3} \left[\Psi_A \cos \gamma + \Psi_B \cos\left(\gamma - \frac{3\pi}{2}\right) + \Psi_C \cos\left(\gamma + \frac{3\pi}{2}\right) \right]$$

$$(8) \quad \Psi_q = \frac{2}{3} \left[\Psi_A \sin \gamma + \Psi_B \sin \left(\gamma - \frac{3\pi}{2} \right) + \Psi_C \sin \left(\gamma + \frac{3\pi}{2} \right) \right]$$

$$(9) \quad \Psi_o = \frac{2}{3} [\Psi_A + \Psi_B + \Psi_C]$$

Освен по посочения по-горе начин за определяне на потокосцепления на синхронния двигател с постоянни магнити е възможно да се използват и подходи с прилагане на числено моделиране на магнитното поле в двигателите. От получените резултати числени решения на магнитната задача се определят фазните потокосцепления Ψ_a, Ψ_b, Ψ_c , а от тях и потокосцепления Ψ_d, Ψ_q . В този случай се постига по-голяма точност при определянето на потокосцепленията, тъй като в класическия подход не се отчита насищането на магнитната верига.

Целта на настоящия доклад е да представи алгоритъм за определяне на зависимостта на фазните потокосцепления и потокосцепленията в координатна система dq от ъгъла на натоварване на и статорния ток в синхронни двигатели с възбуждане от постоянни магнити, базиран на методите за числено моделиране на магнитно поле в тях, с отчитане на влиянието на насищането на магнитната верига.

2. Използвани методи за анализ

За определяне на зависимостта на фазните потокосцепления от натоварването е използван метода на крайните елементи за числено моделиране на магнитното поле, като за целта е съставен 2D стационарен модел на синхронния двигател с "V"- образно монтирани постоянни магнити в ротора. Разработен е софтуер в средата на Excel за изчисляване на фазните потокосцепления.

3. Обект на изследване

Обекти за изследване са два синхронни двигатели с постоянни магнити, използвани в хибридни автомобили [4].

Таблица 1.

		2p=10	2p=20			2p=10	2p=20
въздушна междина	мм	0,7	0,7	височина на статорен канал	мм	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	мм	182,8	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	NdFeB 40 MGOe	

Данните за двигателите взети от литературни източници. Двата двигателя имат едни и същи габаритни размери и брой на статорните канали, но различен

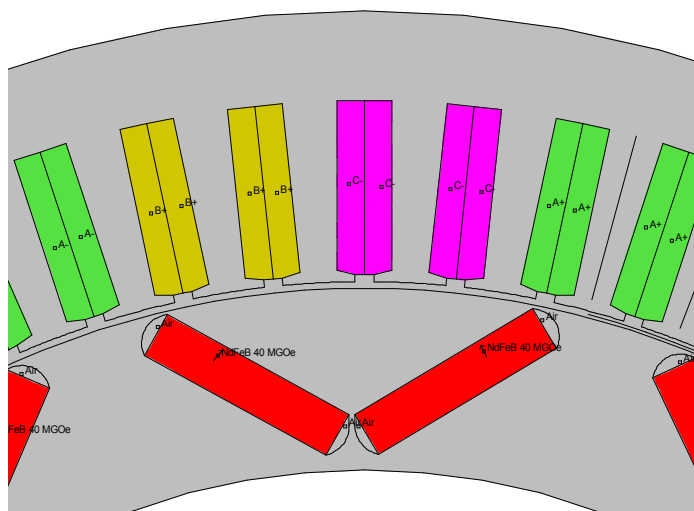
брой полюси. Във всеки полюс на ротора са монтирани по два редкоземни постоянни магнита с "V" – образно положение един спрямо друг. По подробни данни за изграждането на моделите във FEMM [1] са дадени в таблица 1.

4. Разработени числени модели

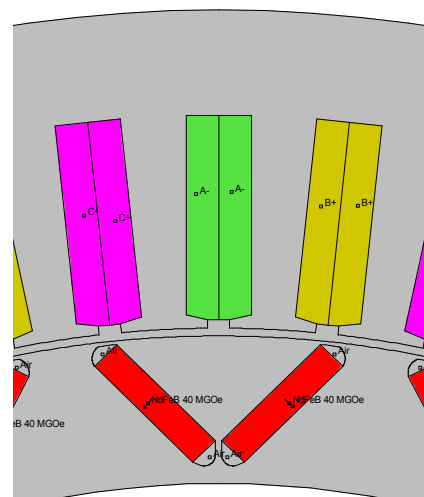
На фиг 2 и фиг.3 са показват моделите разработени в програмния продукт FEMM, за синхронни двигатели с "V" конструкция на постоянни магнитите с брой полюси $2p=10$ и $2p=20$, чрез които се определя фазните потокосцепления.

Статорната намотка е трифазна еднослойна. В модлите е разгледан онзи момент от време, при който моментната стойност на тока във фаза 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 пет стойности статорния ток, които съответстват на еквивалентна токова плътност в канала 30 A/mm^2 , 25 A/mm^2 , 20 A/mm^2 , 15 A/mm^2 , 10 A/mm^2 . Еквивалентната токова плътност в канала е определена спрямо цялото му сечение. За получаване на зависимостите на фазните потокосцепления 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.

Получените зависимости на потокосцепленията няма да зависят от времето, а ще са само функция на големината на статорния ток и ъгъла на натоварване.



Фиг.2. 2D модел при синхронен двигател с постоянни магнити с $2p=10$

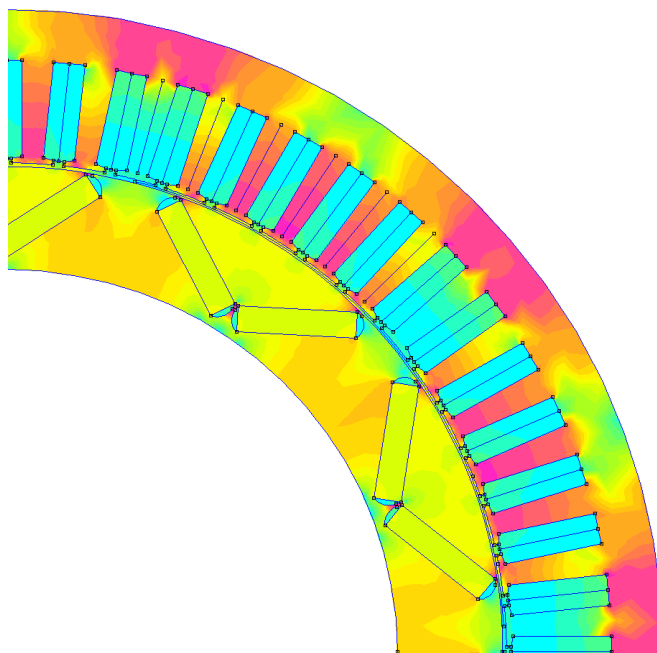


Фиг.3. 2D модел при синхронен двигател с постоянни магнити с $2p=20$

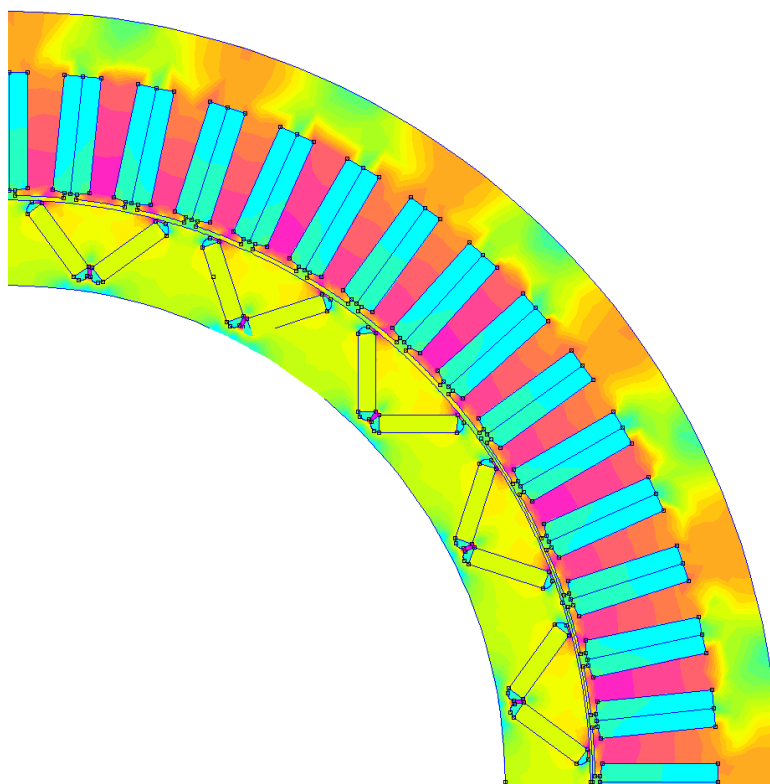
Разработени са софтуерни приложения в средата на Excel за изчисляване на потокосцепленията в координатни системи abc и dq.

5. Резултати от изследванията

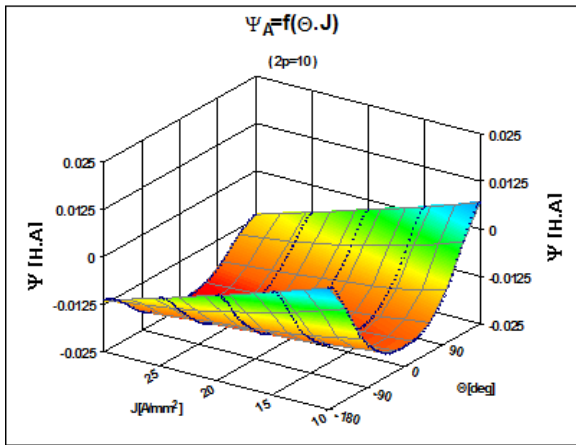
На фиг. 4 е показано разпределението на магнитната индукция в напречното сечение на синхронен двигател с V-образно вътрешно монтирани в ротора постоянни магнити при $2p=10$, а на фиг. 5 – при $2p=20$.



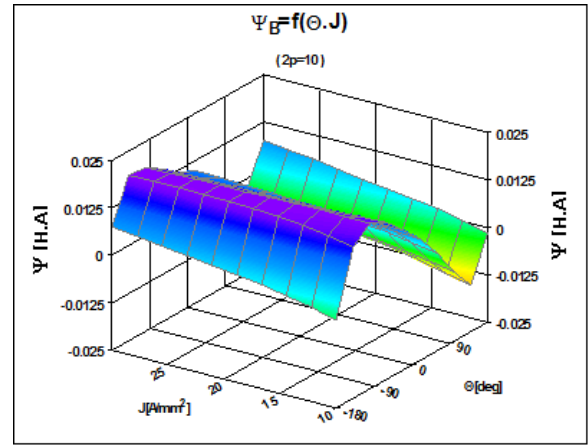
Фиг.4. Разпределение на магнитна индукция при $2p=10$



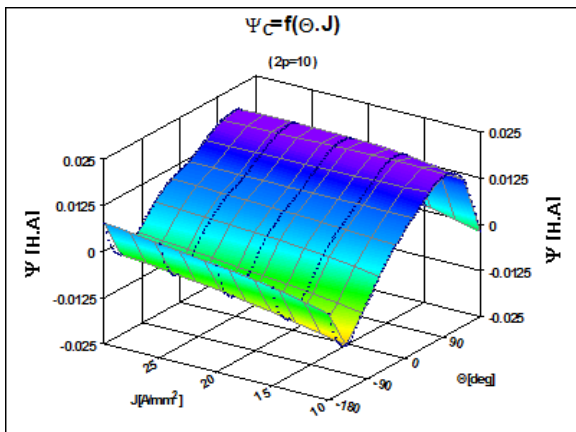
Фиг.5. Разпределение на магнитна индукция при $2p=20$



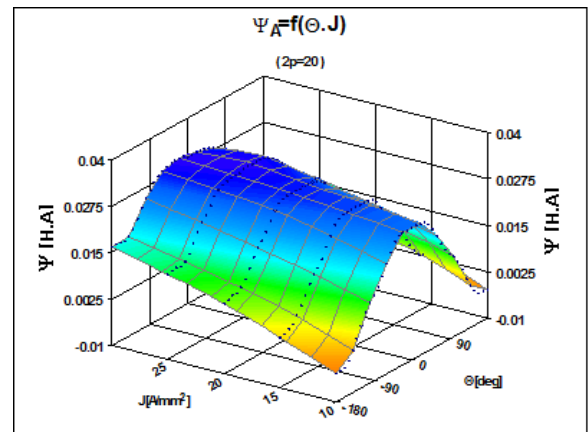
Фиг.6. Изменение на потокосцеплението на фаза А в зависимост от ъгъла на натоварване и тока при $2p=10$



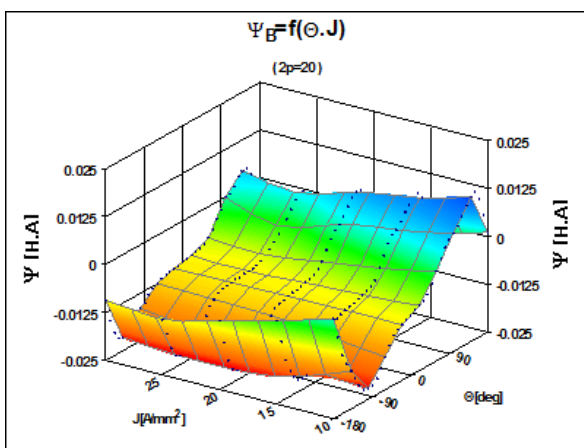
Фиг.7. Изменение на потокосцеплението на фаза В в зависимост от ъгъла на натоварване и тока при $2p=10$



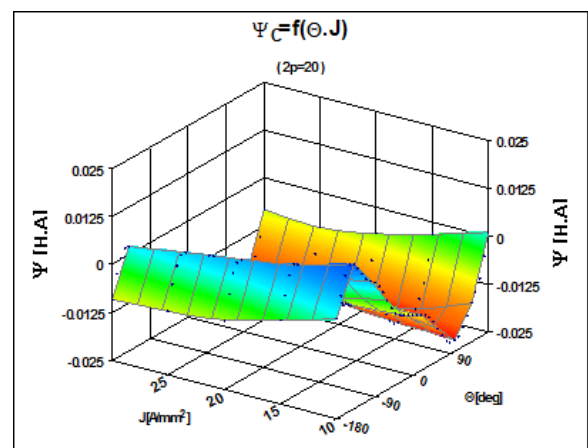
Фиг.8. Изменение на потокосцеплението на фаза С в зависимост от ъгъла на натоварване и тока при $2p=10$



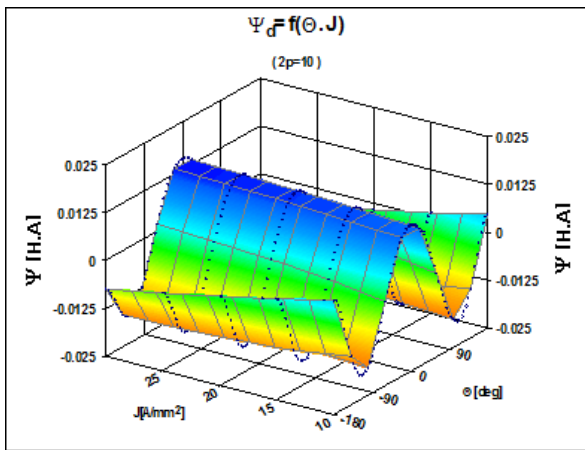
Фиг.9. Изменение на потокосцеплението на фаза А в зависимост от ъгъла на натоварване и тока при $2p=20$



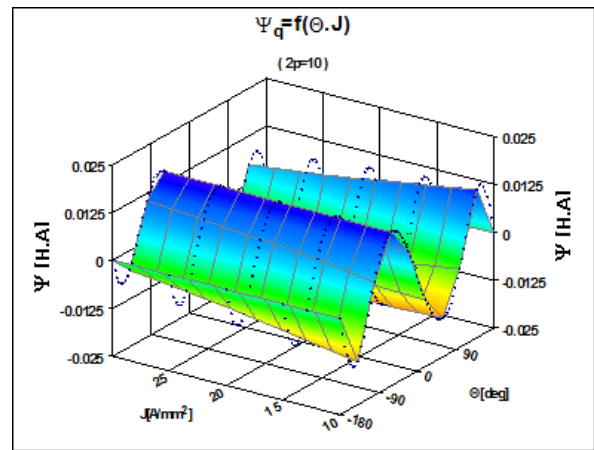
Фиг.10. Изменение на потокосцеплението на фаза В в зависимост от ъгъла на натоварване и тока при $2p=20$



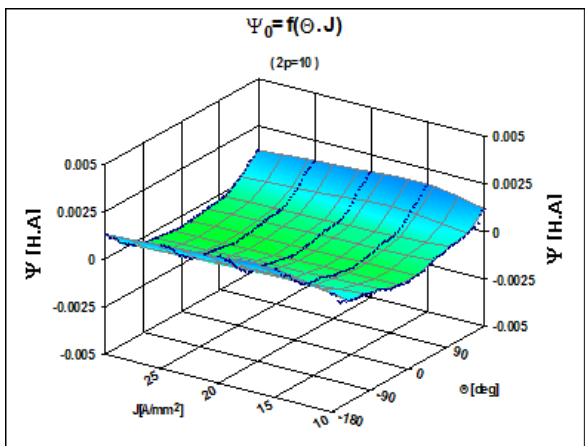
Фиг.11. Изменение на потокосцеплението на фаза С в зависимост от ъгъла на натоварване и тока при $2p=20$



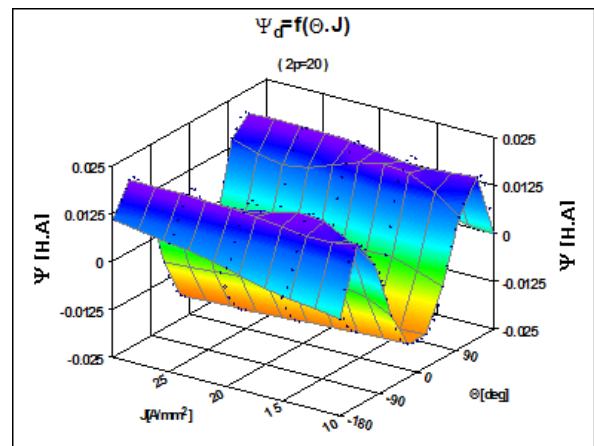
Фиг.12. Изменение на потокосцеплението по оста d в зависимост от ъгъла на натоварване и токовата плътност при $2p=10$



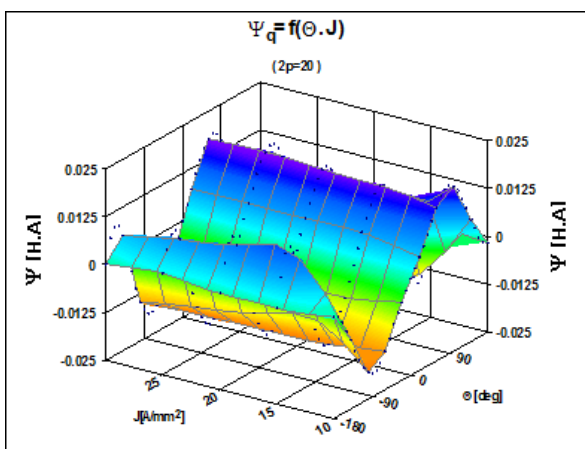
Фиг.13. Изменение на потокосцеплението по оста q в зависимост от ъгъла на натоварване и токовата плътност при $2p=10$



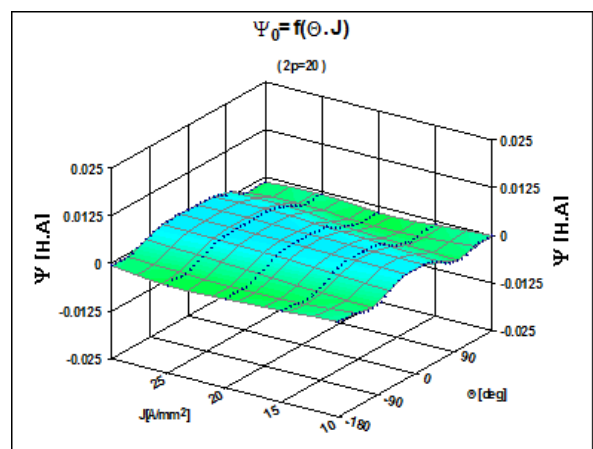
Фиг.14. Изменение на потокосцеплението ψ_0 в зависимост от ъгъла на натоварване и токовата плътност при $2p=10$



Фиг.15. Изменение на потокосцеплението по оста d в зависимост от ъгъла на натоварване и токовата плътност при $2p=20$



Фиг.16. Изменение на потокосцеплението по оста q в зависимост от ъгъла на натоварване и токовата плътност при $2p=20$



Фиг.17 Изменение на потокосцеплението ψ_0 в зависимост от ъгъла на натоварване и токовата плътност при $2p=20$

На фигури от фиг.6 до фиг 8 са показани зависимостите на фазните потокосцепления от ъгъла на натоварване и статорния ток съответно за вази А, В и С при синхронния двигател с $2p=10$. За същия двигател зависимостите за потокосцепленията ψ_d , ψ_q и ψ_o са показани съответно на фиг 12. до фиг. 14.

При синхронния двигател с $2p=20$ алогичните зависимости са показани съответно на фиг.9 до фиг. 11 и от фиг 15. до фиг. 17.

6 Анализ и изводи

1. Достигнатите резултатите 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 насищането на магнитната верига.
- 2 Избрания 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 Разработения алгоритъм е приложим и при друг вид електрически машини.

ЛИТЕРАТУРА

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

Автори: **Пламен Миланов Ризов**, доц. д-р инж. от ТУ-София, катедра „Електрически машини“, e-mail: pmri@tu-sofia.bg; **Радослав Лазаров Спасов** доц. д-р инж. от ТУ-София, катедра „Електрически машини“, e-mail: lrs@tu-sofia.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