Определяне на електромагнитния момент на превключваем реактивен двигател

Г. Костов, Р. Александров

Determination the Electromagnetic Torque of a Switched Reluctance Motor

G. Kostov, R. Alexandrov

Department of Electric Power Engineering and Automation, Faculty of Mining Electromechanics – MEMF, Sofia University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Prof. Boyan Kamenov St., 1700 Sofia, Bulgaria, georgi_kostov@mgu.bg, romeo.alexandrov@mgu.bg

Key Words: *Switched Reluctance Motor; rotor position; motor torque; co-energy; JMAG-Express software.*

Abstract. *Due to the development of electronics and control methods, interest in Switched Reluctance Motor (SRM) is returning and today they are being studied by many scientists around the world. This article discusses the torque determination of a Switched Reluctance Motor (SRM) using co-energy. Described is conversion of electrical energy into magnetic field energy and mechanical energy. In these electric machines, the electromagnetic moment is defined as the change in electromagnetic energy due to the change on the angular position of the rotor. The purpose of the study is to find the parameters on which the torque depends in order to form an appropriate control strategy. To simplify the analysis, it is assumed that the machine remains in an unsaturated state during operation – magnetic saturation is neglected, the inductance of the motor depends only on the rotor angle. An exemplary variation of the inductance from the rotor position is shown, which is a direct consequence of the variation of the total magnetic flux and current in the energized phase winding. The areas of operation of SRM are described. Also shown is an exemplary mechanical characteristic of the SRM where the constant torque, constant power, and decelerating power sections are described for low, medium, and high engine speeds. The structure and control principles of the SRM determine the drive characteristics. The basic control strategy involves successive switching of phases at well-defined moments of time. For accurate control it is necessary to account for the highly nonlinear inductance problems and the following ripples of electromagnetic moment. SRM modeling aims to accurately establish the relationship between magnetic flux, torque, current and rotor position, which will contribute to accurate analysis and precise control of these motors. The simulation of SRM 6/4 was made using JMAG-Express software. JMAG is a simulation software used to develop and design electrical devices. By using the software tools, the following are shown: the simulation model, its parameters (given in tabular form) and the connection diagram of the stator winding. Simulation of the model was made depending on the rotation speed at different current, and the simulation results - torque, power, efficiency, power factor, copper losses, steel losses are shown in the relevant figures. From research, it can be seen that at low speeds the losses in steel are negligible compared to those in copper. As the rotational speed increases, the losses in the steel increase too. The type of loss characteristic in copper is analogous to the mechanical characteristic. As the speed of rotation increases, the losses in copper decrease and at a speed of 3600 rpm they are almost equal to those in steel. Total losses reduce from 62% at 600 rpm to 12% to 6000 rpm.*

1. Увод

Превключваемите реактивни двигатели (ПРД, Switched Reluctance Motor – SRM) са електрически машини с явнополюсна конструкция на статора. Върху явните полюси са разположени обикновени концентрични намотки на отделните фази. Роторът има проста конструкция, феромагнитна котва от магнитно мека силициева стомана също с явно изразени полюси, без възбудителна намотка или постоянни магнити. Той няма собствено магнитно поле. Магнитното поле на ротора и въртящият момент се създават от магнитодвижещото напрежение на статорните намотки и реакцията на котвата поради нееднаквото магнитно съпротивление на ротора в радиално направление. Създава се реактивен електромагнитен момент, откъдето произлиза името им – реактивни двигатели. Такъв вид момент е характерен и за синхронните двигатели, които са с явнополюсен ротор.

Превключваемите реактивни двигатели се захранват от електронен комутатор, който подава към фазните намотки постояннотокови импулси с определена конфигурация. Импулсната поредица се формира в зависимост от положението на ротора, в този смисъл роторът се върти синхронно с честотата на импулсите. При липса на съпротивителен момент оста на въртящото се магнитно поле съвпада с оста на най-малкото магнитно съпротивление на ротора и електромагнитните сили са насочени радиално. При наличие на съпротивителен момент роторът изостава на ъгъл θ от

въртящото се магнитно поле и поради нееднаквото му магнитно съпротивление в радиално направление магнитното поле се деформира. Появяват се и тангенциални съставки на електромагнитните сили на привличане, които създават т. нар. реактивен въртящ момент. Поради импулсния принцип на управление на двигателя се появяват пулсации на момента. Изследвания са направени в [1,2,8].

Името на двигателя (Switched Reluctance Motor) описва двете характеристики на конфигурацията на машината: а) switch – двигателят работи непрекъснато в режим на превключване; б) reluctance – различното магнитно съпротивление на магнитната верига при въртене на ротора.

Електромагнитният въртящ момент на ротора се дължи на силата, упражнявана от възбудената фаза на статора и явните полюси на ротора. В резултат на това въртящият момент на двигателя зависи основно от геометричните размери на зъбите на статора и ротора, броя на фазите и броя на полюсите на двигателя, както и от силата на фазовия ток и времето за включване и изключване. Пълен анализ е направен в [7].

Някои типични приложения на ПРД включват: горивни и маслени помпи, високоскоростни компресори, тягови задвижвания на минна механизация, вентилатори, електрически локомотиви, минни фрези, гумено лентови транспортьори. Тези двигатели са широко разпространени в индустрията за електрически превозни средства.

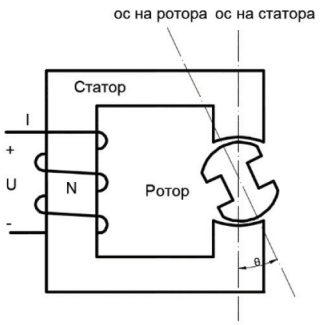
В статията се разглежда подход за намиране на въртящия момент на превключваем реактивен двигател (ПРД), основаващ се на запасената коенергия и позицията на ротора. Целта на теоретичното изследване е намиране на параметрите, от които зависи въртящият момент, за да се формира подходяща стратегия за управление. В [3] е направена теоретична оценка на мощността на ПРД при безсензорно управление. В [1] е предложена методология за намиране на момента на ПРД, разгледани са режимите на работа на ПРД и управлението на конкретен 12/8 ПРД с посочена структура на контролера и алгоритми на управление.

Освен анализ на методологията за определяне на въртящия момент е направена и симулация на ПРД 6/4 с помощта на софтуер JMAG-Express [3].

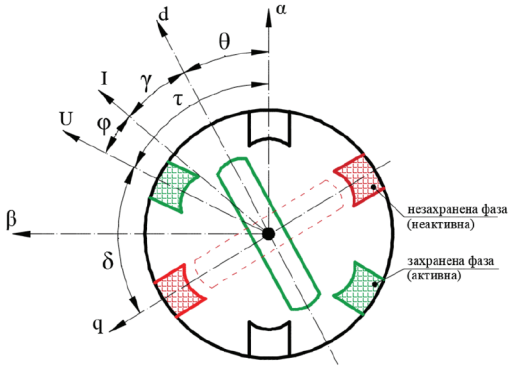
2. Методология на изследването

2.1. Определяне на въртящия момент на ПРД чрез коенергията и позицията на ротора

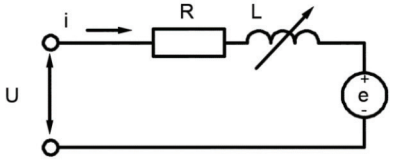
На *фиг. 1, 2* и *3* са показани съответно принципна схема на една от фазите на ПРД, съотношение на пространствените ъгли, еквивалентна електрическа схема и векторна диаграма. По-нататъшното изследване се основава на тези фигури.



Фиг. 1. Една фаза на ПРД



Фиг. 2. Съотношение на пространствените ъгли на ПРД



Фиг. 3. Еквивалентна електрическа схема на една фаза

От векторната диаграма, показана на *фиг. 2*, за фазовия ъгъл между напрежението и тока може да се запише

(1) $\varphi = \frac{\pi}{2} - \gamma - \delta$,

където φ е фазовият ъгъл между векторите на напрежението и тока, $\delta = arctg\ \frac{U_d}{U_q}$ е фазов ъгъл между ос q и вектора на напрежението, $\gamma = arctg\ \frac{I_q}{I_d}$ е фазов ъгъл между ос d и вектора на тока.

За магнитния поток, например за фаза А, може да се запише

(2) $\psi(A,\theta) = L(A\theta).i_a + M(AB).i_b + M(AC).i_c$,

където Ψ(A,θ) е началният магнитен поток на фаза А, L(A,θ) е самоиндукцията на фаза А, M(AB) е взаимната индукция между фази А и В, M(AC) е взаимната индуктивност между фази А и С, i_a, i_b, i_c са съответно токовете в трите фази.

Взаимните индуктивности са равни помежду си при трифазна симетрична система:

(3) $M(AB) = M(AC) = M(BC) = M$.

Взаимната индуктивност е много малка в сравнение със самоиндукцията и тя може да се пренебрегне в по-нататъшни изчисления

(4) $$\begin{bmatrix}\psi_A\\ \psi_B\\ \psi_C\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}L_A & M_{AB} & M_{AC}\\ M_{BA} & L_B & M_{BC}\\ M_{CA} & M_{CB} & L_C\end{bmatrix}.\begin{bmatrix}i_A\\ i_B\\ i_C\end{bmatrix} \rightarrow \psi = L.i\ .$$

На базата на електрическата схема може да се разработи математичен модел на машината, включващ съпротивлението на машината, индуктивността, тока и напрежението на изводите.

Въпреки че работата на ПРД изглежда проста, правата на точен анализ на поведението на двигателя изисква сравнително сложен математически подход, който е разгледан подробно в [7]. Напрежението на клемите на една фазна намотка на двигателя е свързано с магнитния поток и се изразява със закона на Фарадей.

(5) $$U = i.R_m + \frac{d\psi}{dt},$$

където R_m е съпротивлението на една фазна намотка на двигателя; Ψ е пълният магнитен поток на фазната намотка.

Поради изменението на магнитното съпротивление и насищането на явните полюси на статора и ротора магнитният поток се променя и е функция на позицията на ротора (θ) и тока на двигателя. След така направеното уточнение за формула (5) може да се напише

(6) $$U = i.R_m + \frac{\partial\psi.di}{\partial i.dt} + \frac{\partial\psi.d\theta}{\partial\theta.dt}, [V],$$

където $\frac{\partial\psi}{\partial i}$ се дефинира като L (θ, i), моментна индуктивност.

Индуцираното електродвижещо напрежение се дефинира като

(7) $$e = i.\omega.\frac{\partial L(\theta,i)}{d\theta} = K_b.i.\omega\ ,$$

където $\frac{\partial L(\theta,i)}{d\theta}$ е K_b е електромагнитна константа. Тази константа определя наклона на профила на индуктивността. Той е положителен при нарастваща индуктивност и отрицателен при намаляваща. Също така този коефициент зависи от тока и скоростта на въртене.

Въз основа на формула (6) се записва уравнението, което отговаря на еквивалентната електрическа схема на *фиг. 3*

(8) $$U = i.R_m + L.\frac{di}{dt} + i.\omega.\frac{\partial L(\theta,i)}{d\theta}\ .$$

Уравнение (8) описва преноса на електрическата енергия към магнитното поле. По-долу ще поясним как енергията на полето се превръща в механична. Умножаването на всяка от страните на уравнение (6) с електрическия ток дава израз за моментната мощност на машината

(9) $$P = u.i = i^2.R_m + i.\frac{\partial\psi.di}{\partial i.dt} + i.\frac{\partial\psi.d\theta}{\partial\theta.dt}\ .$$

Съответно за електрическата енергия се записва

(10) $$W_{el} = u.i.dt = i^2.R_m.dt + i.\frac{\partial\psi.di}{\partial i} + i.\frac{\partial\psi.d\theta}{\partial\theta}\ .$$

Лявата част на уравнение (9) показва моментната електрическа мощност, подадена на машината. Първият член на дясната част представляват омичните загуби в намотката на ПРД. Вторият член представлява сумата от изходната механична мощност и мощността, съхранявана в магнитното поле. Математически погледнато това се изразява, чрез следното уравнение:

(11) $$i.\frac{\partial\psi.di}{\partial i.dt} + i.\frac{\partial\psi.d\theta}{d\theta.dt} = \frac{dW_m}{dt} + \frac{dW_f}{dt},$$

където $\frac{dW_m}{dt}$ е моментна механична мощност, а $\frac{dW_f}{dt}$ е моментната мощност, която се съхранява в магнитното поле. За нея може да се запише

(12) $$dW_f = i.\frac{\partial\psi.di}{\partial i} + i.\frac{\partial\psi.d\theta}{\partial\theta}\ .$$

Съответно W_m е механичната енергия, а W_f е енергията на магнитното поле. За механичната енергия се знае, че зависи от момента и скоростта и може да се запише

(13) $$\frac{dW_m}{dt} = M.\omega = M.\frac{d\theta}{dt},$$

където M е механичният момент, а $\omega = \frac{d\theta}{dt}$ е ъгловата скорост на вала на машината.

За механичната работа също може да се запише

(14) $$dW_m = \left(i.\frac{\partial\psi}{\partial\theta} - \frac{\partial W_f}{\partial\theta}\right).d\theta + \left(i.\frac{\partial\psi}{\partial i} - \frac{\partial W_f}{\partial i}\right).di\ .$$

От кривата на намагнитване *фиг. 4* е възможно да се определи зависимостта на магнитната енергия от магнитното поле и тока при постоянен ъгъл на вала на машината ($\frac{d\theta}{dt} = 0$). В съответствие с *фиг. 4* се записва следният интеграл:

(15) $$W_f = \int_0^{\psi} i(\theta,\psi).d\psi = i.\psi - \int_0^{i}\psi.di\ .$$

Частната производна спрямо тока е равна на

(16) $$\frac{\partial W_f}{\partial i} = i.\frac{\partial\psi}{\partial i} - \int_0^{i}\frac{\partial\psi}{\partial i}.di = i.\frac{\partial\psi}{\partial i}\ .$$

След преобразуване на формула (15) и формула (16) вторият член от дясната страна на уравнение (14) се елиминира и то добива вида

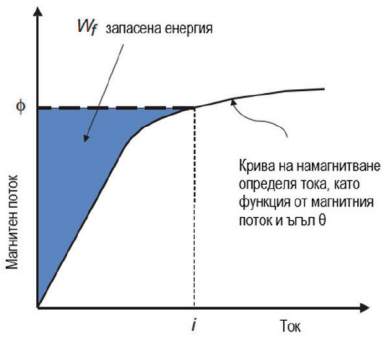
(17) $$dW_m = \left(i.\frac{\partial\psi}{\partial\theta} - \frac{\partial W_f}{\partial\theta}\right).d\theta\ .$$

Електромагнитният момент може да се запише като промяна на електромагнитната енергия в резултат на промяната на ъгловото положение на ротора

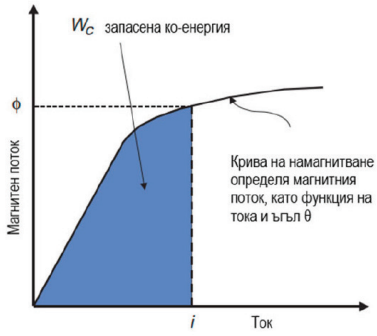
(18) $$M = \frac{\partial W_m}{\partial \theta} = i.\frac{\partial \psi}{\partial \theta} - \frac{\partial W_f}{\partial \theta}.$$

Изследване на зависимостта на момента от ъгловото положение на ротора е направено в [6].

Тъй като по-често и по-удобно е да се изразява моментът чрез тока, а не чрез магнитния поток, трябва да го изразим чрез коенергията W_c вместо с енергията W_f. Площта от Вебер-Амперната характеристика, еквивалентна на коенергията за завъртането на двигателя от неподравнена до подравнена позиция дава възможност да се изчисли средната стойност на въртящия момент [4]. На *фиг. 5* е показана графичната интерпретация на коенергията.



Фиг. 4. Интерпретация на запасена магнитна енергия



Фиг. 5. Интерпретация на запасената коенергия

Дефинирането на коенергията се прави за магнитен поток, който се отчита за определен ток при фиксиран ъгъл θ, както е показано на *фиг. 5*

(19) $$W_c = \int_0^i \psi(\theta, i).di.$$

От сравняването на *фиг. 4* и *5* за областта на съхранената магнитна енергия и съхранената коенергия може да се запише

(20) $$W_c + W_f = i.\psi.$$

След диференциране на уравнение (20) получаваме следния запис:

(21) $$dW_c + dW_f = \psi.di + i.d\psi;$$

(22) $$\frac{\partial W_c}{\partial \theta} = i.\frac{\partial \psi}{\partial \theta} - \frac{\partial W_F}{\partial \theta}.$$

Решавайки уравнение (19) и след заместването му в уравнение (18), за момента се получава

(23) $$M = \frac{id\psi - (\psi di + id\psi - dW_c(\theta, i))}{d\theta}.$$

Обикновено уравнение (23) се опростява за стойности на постоянен ток.

Коенергията я представяме чрез нейното диференциално уравнение

(24) $$dW_c(\theta, i) = \frac{\partial W_c}{\partial \theta} d\theta + \frac{\partial W_c}{\partial i} di.$$

За моментната стойност на въртящия момент при постоянен ток се получава

(25) $$M(i, \theta) = \left(\frac{\partial W_c(i, \theta)}{\partial \theta} \right)_{i=const}.$$

Пълният въртящ момент се изразява с формулата:

(26) $$M_t = \sum_{s=1}^{m} M(i, \theta),$$

където m е броят на фазите на двигателя.

След интегриране на формула (26) се получава средната стойност на въртящия момент

(27) $$M_{cp} = \frac{1}{\theta}.\int_0^{\theta} M_t.d\theta.$$

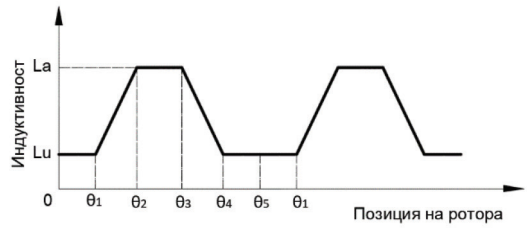
За опростяване на анализа се прави предположението, че машината остава в ненаситено състояние по време на работа – пренебрегва се магнитното насищане. Индуктивността на двигателя се променя само от ъгъла на ротора

(28) $$W_c = \int_0^i \psi.di = \frac{L(\theta) i^2}{2}.$$

За момента се получава

(29) $$M = \frac{i^2}{2}\frac{dL}{d\theta}.$$

В зависимост от профила на индуктивността спрямо позицията на ротора (*фиг. 6*) се определят четири зони на работа на двигателя.



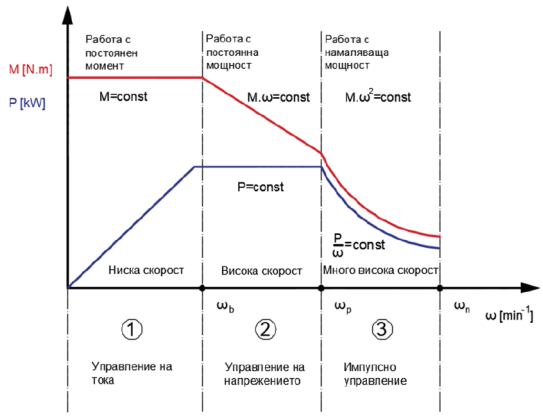
Фиг. 6. Зависимост на индуктивността от позицията на ротора

- **Зони на минимална индуктивност** 0-θ_1, (θ_5-θ_1) и θ_4-θ_5 – полюсите на статора не се припокриват – в тази област магнитният поток се определя предимно от пътя по въздуха, следователно индуктивността е минимална и почти постоянна. Тези зони не допринасят за създаване на въртящ момент. Индуктивността в тези зони се нарича ненасочена индуктивност (L_u).

- **Зона на нарастване на индуктивността** θ_1-θ_2 – полюсите на статора и на ротора се припокриват и магнитния поток минава през тях. Това увеличава индуктивността и се създава двигателен момент. Тази зона завършва, когато припокриването на полюсите е пълно.
- **Зона на максимална индуктивност** θ_2-θ_3 – през този период движението на полюса на ротора не променя пълното припокриване на полюса на статора и не променя пътя на потока. Това води до поддържане на максимална и постоянна индуктивност (подравнена индуктивност L_a). Тъй като няма промяна в индуктивността в тази област, няма генериране на въртящ момент, когато в този интервал има ток. През този период фазната намотка се комутира и токът намалява до нула, като по този начин се предотвратява възможността за създаване на отрицателен въртящ момент в следващата зона.
- **Зона на намаляване на индуктивността** θ_3-θ_4 – в нея полюсът на ротора се отдалечава от полюса на статора. Този участък от диаграмата е много подобен на θ_1- θ_2, но има намаляване на индуктивността и отрицателен наклон на областта, което води до отрицателен въртящ момент, т.е. генериране на електрическа енергия от механичен момент на вала на ПРД.

2.2. Режими на работа на ПРД

На *фиг. 7* е показана механичната характеристика на ПРД. Ясно се открояват три режима на работа на ПРД в зависимост от скоростта.



Фиг. 7. Механична характеристика на ПРД

Първият режим на работа се характеризира с постоянен момент. Ограничаването на момента е следствие от максимално токовите възможности на намотките на двигателя и въз основа на механични съображения. Постига се чрез регулиране на тока от електронния преобразувател посредством коефициента на запълване на захранващите импулси. Характерни са високи загуби в медта.

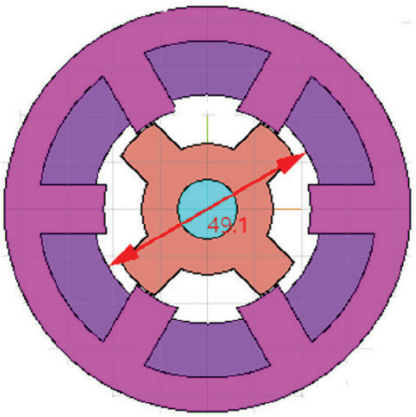
След достигане на определена скорост моментът намалява обратнопропорционално на скоростта – **втори режим.** Поради високата скорост на ротора времето за включено състояние на всяка от фазите намалява. Освен това с нарастване на скоростта се увеличава електродвижещото напрежение, индуцирано в намотката. Голямата времеконстанта на електрическата верига и нарасналото обратно електродвижещо напрежение не позволява токът да нарасне до максимално допустимите си стойности, съответно моментът започва да спада. Известна компенсация се прави чрез изменение на ъгъла на изпреварващо включване, което води до увеличаване на средната стойност на напрежението върху фазата.

В **третия режим** се развива естествената крива на механичната характеристика. Ъгълът на изпреварващо включване е достигнал своето ограничение. Произведението на момента и квадрата на скоростта е постоянно. Мощността намалява с увеличаване на скоростта. В тази зона магнитното поле е най-слабо. При малък товар ПРД може да работи на много високи скорости.

Работната точка на скоростта на ПРД по същество е програмируема и определена почти изцяло от управлението, това прави ПРД доста удобни за управление на различни задвижвания. Ограниченията в управлението са с физически смисъл: номинално напрежение, допустимо нарастване на температурата при нарастващо натоварване и други.

3. Симулационно изследване на ПРД чрез софтуер JMAG-Express

С помощта на този софтуер могат да се построят характеристики в зависимост от токовото натоварване и честотата на въртене. Програмата дава възможност за избор на броя на статорните и роторните зъби, материала на статора и ротора, както и материала на статорната намотка и схема на свързване. Симулационното изследване е направено за трифазен двигател с шест статорни и четири роторни зъба. На *фиг. 8* е показан симулационният модел с параметри от *табл. 1*.

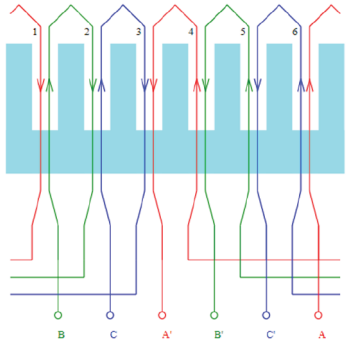


Фиг. 8. Симулационен модел

Табл. 1. Параметри на симулирания двигател

№	Параметър	Стойност
Касаещи габаритните размери и теглото		
1	Външен диаметър на статора	87 mm
2	Ширина на въздушната междина	0.43 mm
3	Ширина на статорния зъб	10 mm
4	Външен диаметър на ротора	43 mm
5	Ширина на роторния зъб	10 mm
6	Брой статорни зъби	6 бр.
7	Брой роторни зъби	4 бр.
8	Тегло на двигателя	4 kg.
9	Тегло на намотката	1,3 kg.
Касаещи материалите за изработка		
1	Материал на статорния пакет	JSOL Steel_ Sheets 50A230
2	Плътност на статорната стомана	7 600 kg/m3
3	Материал на роторния пакет	JSOL Steel_ Sheets 50A230
4	Плътност на роторната стомана	7 600 kg/m3
5	Материал на намотката	МЕД (Cu)
6	Плътност на материала на намотката	8 960 kg/m3

Намотката на статора е медна и е свързана последователно, както е показано на *фиг. 9.* Резултатите от симулацията са поместени в следващите фигури.

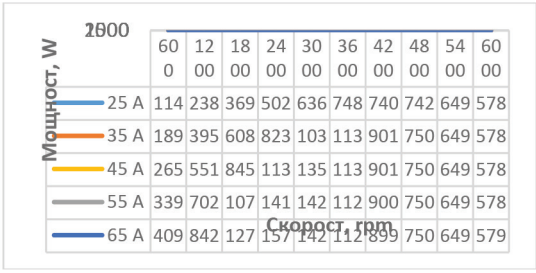


Фиг. 9. Свързване на статорната намотка

	600	1200	1800	2400	3000	3600	4200	4800	5400	6000
25 A	1,8	1,9	2,0	2,0	2,0	2,0	1,7	1,5	1,1	0,9
35 A	3,0	3,1	3,2	3,3	3,3	3,0	2,0	1,5	1,1	0,9
45 A	4,2	4,4	4,5	4,5	4,3	3,0	2,0	1,5	1,1	0,9
55 A	5,4	5,6	5,7	5,6	4,5	3,0	2,0	1,5	1,1	0,9
65 A	6,5	6,7	6,8	6,3	4,5	3,0	2,0	1,5	1,1	0,9

Фиг. 10. Въртящият момент в зависимост от скоростта при различно токово натоварване

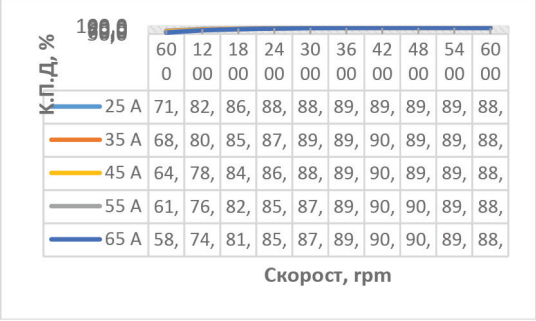
На *фиг. 10* е показана симулираната механична характеристика на моделирания ПРД. При по-големите токове се открояват участъците, отговарящи на режимите на работа, описани за *фиг. 7*. При ниски скорости на въртене въртящият момент се ограничава от стойностите на зададените симулационни токове. Следват участъците с намаляване на момента с увеличаване на скоростта на въртене. При най-високите скорости въртящият момент е малък и не зависи от зададения симулационен ток.



	600	1200	1800	2400	3000	3600	4200	4800	5400	6000
25 A	114	238	369	502	636	748	740	742	649	578
35 A	189	395	608	823	103	113	901	750	649	578
45 A	265	551	845	113	135	113	901	750	649	578
55 A	339	702	107	141	142	112	900	750	649	578
65 A	409	842	127	157	142	112	899	750	649	579

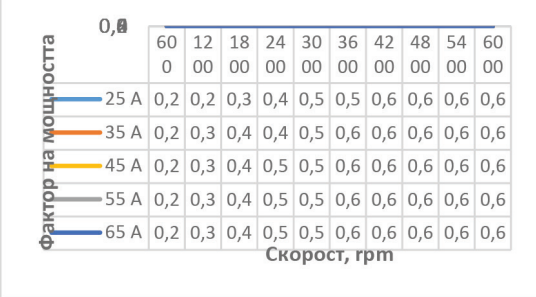
Фиг. 11. Мощността в зависимост от скоростта при различно токово натоварване

Механичната мощност на вала на двигателя е произведение от въртящия момент и скоростта на въртене. При механична характеристика от вида на *фиг. 7*, съответно и *фиг. 10* характеристиката на мощността (*фиг. 11*) има изразен максимум. При по-големите токове той е при по-ниска скорост.



	600	1200	1800	2400	3000	3600	4200	4800	5400	6000
25 A	71,	82,	86,	88,	88,	89,	89,	89,	89,	88,
35 A	68,	80,	85,	87,	89,	89,	90,	89,	89,	88,
45 A	64,	78,	84,	86,	88,	89,	90,	89,	89,	88,
55 A	61,	76,	82,	85,	87,	89,	90,	90,	89,	88,
65 A	58,	74,	81,	85,	87,	89,	90,	90,	89,	88,

Фиг. 12. Коефициент на полезно действие в зависимост от скоростта при различно токово натоварване

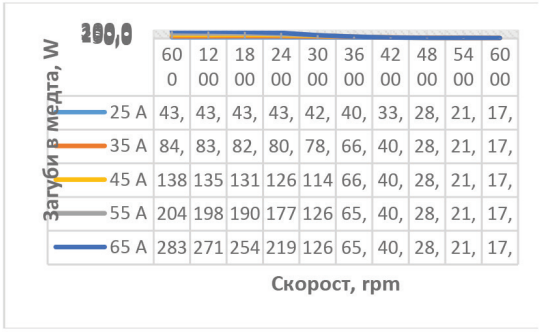


	600	1200	1800	2400	3000	3600	4200	4800	5400	6000
25 A	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6
35 A	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
45 A	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
55 A	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
65 A	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6

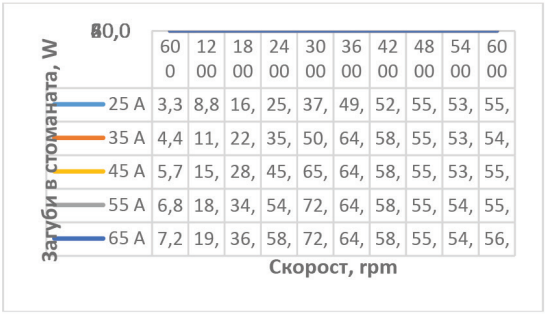
Фиг. 13. Факторът на мощността в зависимост от скоростта при различно токово натоварване

Енергийните показатели – коефициент на полезно действие (*фиг. 12*) и фактор на мощността (*фиг. 13*), са в пряка зависимост от отдадената на вала на двигателя механична мощност и загубите на мощност в медта и стоманата, показани съответно на *фиг. 14* и *фиг. 15*. Изходната мощност на двигателя и загубите се преобразуват от активната електрическа мощност на източника.

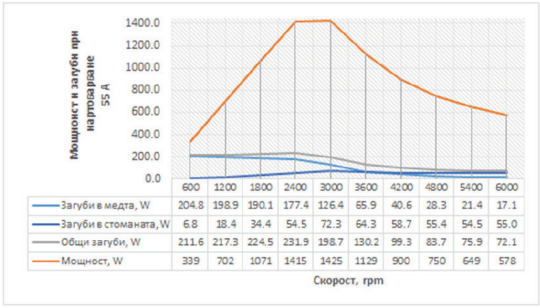
Реактивната мощност се характеризира с обмена на енергия за единица време между двигателя с индуктивност и електронния преобразувател с капацитет.



Фиг. 14. Загуби в медта в зависимост от скоростта при различно токово натоварване



Фиг. 15. Загуби в стоманата в зависимост от скоростта при различно токово натоварване



Фиг. 16. Загуби в медта, загуби в стоманата, общи загуби и мощност в зависимост от скоростта при токово натоварване 55 А

При ниски скорости загубите в стоманата са незначителни в сравнение на тези в медта. Загубите в стоманата се обуславят от честотата на токовете във фазните намотки на двигателя, които възбуждат магнитните потоци. Стоманата в определени участъци се намагнитва периодично, което води до хистерезисни загуби на мощност. Изменението на магнитния поток при всеки токов импулс води до индуктиране на вихрови токове в стоманения магнитопровод. При ниска скорост, съответно ниска честота на управляващите токови импулси загубите в стоманата са малки (*фиг. 15*). С увеличаване на скоростта на въртене загубите в стоманата нарастват.

Загубите в медта за определена фазна намотка зависят от ефективната стойност на тока. Токът е пропорционален на въртящия момент на двигателя, както беше описано по-горе за режимите на работа на ПРД в различните участъци от механичната характеристика. Видът на характеристиката на загубите в медта (*фиг. 14*) е аналогичен на механичната характеристика от фиг. 10. С увеличаване на скоростта на въртене загубите в медта намаляват и при скорост 3600 rpm са почти равни с тези в стоманата (*фиг. 16*). Общите загуби намаляват от 62% при скорост 600 rpm до 12% при скорост 6000 rpm.

4. Заключение

Познаването на начина за създаване на двигателния момент на ПРД е основа за синтез на по-прецизни управляващи алгоритми, които намаляват пулсациите на момента с отчитане на параметрите на задвижвания механизъм. Практическите ползи от реализирането им са намалени вибрации и износване на основните механични възли на работната машина. Също така се подобряват условията на труд на работниците, които оперират с машините. Намаляват се нивата на шум, който се генерира по електромагнитен път.

От полученото уравнение за въртящия момент и симулационното изследване на работа на превключваемия реактивен двигател могат да се направят следните изводи:

1. Моментната стойност на въртящия момент е пропорционален на квадрата на тока, следователно токът може да бъде еднопосочен, за да произведе еднопосочен въртящ момент. Това не е така при другите машини за променлив ток. Възможността за еднопосочен ток има ясното предимство в това, че е необходим само един превключвател на захранването във фазовата намотка, следователно и по-прост, по-евтин и по-надежден силов електронен блок за управление.
2. От пропорционалността на квадрата на тока следва, че ПРД има много добър въртящ момент при пускане.
3. Поради нелинейната индуктивност се наблюдава пулсация на момента. За намаляването им се използват конструктивни решения, комбинирани с подходящо управление.
4. Индуктивността е функция от положението на ротора и от тока, тази функция е нелинейна – това усложнява управлението на ПРД.
5. Тъй като въртящият момент е пропорционален на квадрата на тока, тази машина наподобява двигател с постоянен ток с последователно възбуждане, следователно има добър начален въртящ момент, т.е. има тягови свойства.
6. Посоката на въртене може да бъде обърната чрез промяна на последователността на възбуждане на статора, което е лесна операция.

7. Регулирането на въртящия момент и скоростта се постига с управление на преобразувателя.
8. За работата на машината е необходим управляем преобразувател. Не може да се включи директно към захранващата мрежа, следователно за приложения с постоянна скорост задвижването с ПРД е значително по-скъпо в сравнение с такова с асинхронни или синхронни машини.
9. Има много малка взаимна индуктивност между фазовите намотки на машината и за всички практически цели се счита за незначителна.
10. Тъй като липсва взаимно свързване, всяка фаза е електрически независима от другите фази. Това е особеност, уникална само за тази машина. При повреда (късо съединение) в една фазова намотка това не влияе на другите фази. При определени условия двигателят може да запази работоспособността на останалите фази. Това тяхно предимство ги прави предпочитани за по-специфични приложения.
11. Механичната характеристика на превключваемия реактивен двигател е близка до тази на постояннотоков двигател с последователно възбуждане. ПРД имат добра претоварваща способност.

Литература

1. DiRenzo, M. T. Switched Reluctance Motor Control – Basic Operation and Example Using the TMS320F240. Application Report, 2000.

2. Gorbounov, Y., R. Alexandrov, H. Chen. Power Estimation in Sensorless Control of Switched Reluctance Motors. – *Journal of Mining and Geological Sciences*, 64, 2021, 147-151, University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", ISSN 2738-8816, 21 Oct. 2021.

3. JMAG: Simulation Technology for Electromechanical Design. Available from: https://express.jmaginternational.com/express/main_d.html.

4. Miller, T. Electronic Control of Switched Reluctance Machines. Reed Educational and Professional Publishing Ltd, ISBN 0 7506 50737, 2001.

5. Nishimiya, A., H. Goto, H. Guo, O. Ichinokura. Control of SR motor EV by Instantaneous Torque Control Using Flux-Based Commutation and Phase Torque Distribution Technique. 13th International Conference on Power Electronics and Motion Control (EPE-PEMC), Poznan, Poland, 2008.

6. Pavlitov, C., H. Chen, Y. Gorbounov, T. Georgiev, W. Xing, X. Zan. Neural Network Torque Estimator for Switched Reluctance Motor. 13th European Conference on Power Electronics and Applications, 1-9, 2009.

7. Ramu, Krishnan. Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications. New York, CRC Press, 2001.

8. Yang, F., H. Chen, V. Pires, J. Martins, Y. Gorbounov, X. Li, M. Orabi. Improved Direct Torque Control Strategy for Reducing Torque Ripple in Switched Reluctance Motors. – *Journal of Power Electronics*, IF 1.114, 2020, 603-613, ISSN 1598-2092.

За контакти:
Маг. инж. **Георги Костов**
Докторант към катедра "Автоматизация на производствени системи"
Минно-електромеханичен факултет
Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски" – София
e-mail: georgi_kostov@mgu.bg
Доц. д-р **Ромео Александров**
Ръководител на катедра "Автоматизация на производствени системи"
Минно-електромеханичен факултет
Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски" – София
e-mail: romeo.alexandrov@mgu.bg