

# DYNAMICKÝ MODEL DVOJFÁZOVÉ SYNCHRÓNNEHO MOTORČEKA S PERMANENTNÝM MAGNETOM

## DYNAMIC MODEL OF TWO-PHASE PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

Pavel Záskalický, \*Mária Záskalická

Technická univerzita v Košiciach

Katedra elektrických pohonov a mechatroniky, FEI

\*Katedra aplikovanej matematiky, Sjf

Letná 9, 04001 Košice, Slovensko

**Abstrakt** Predkladaný článok sa zaoberá novým typom elektronicky komutovaného synchronného motorčeka s vyniknutými statorovými pólmi a permanentným magnetom na rotore. Predpokladané použitie je v priemysle, ale aj pre zariadenia domácností. Motor je napájaný jednoduchým polovodičovým meničom s obdĺžnikovým dvojfázovým výstupným napätím. Matematický model stroja a meniča bol realizovaný za pomoci simulačného programu Matlab- Simulink.

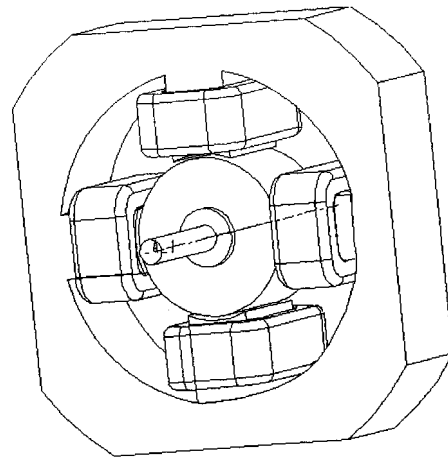
**Summary** The paper deals with a new type of an electronically commuted two-phase salient pole permanent magnet synchronous motor for an industrial and household appliances. The motor is fed from a single voltage-source inverter with 2 phase rectangular output voltage. The inverter is controlled by a microcomputer. The mathematical model of the machine was realized by means of the Matlab-Simulink program.

### 1. ÚVOD

Synchronne motorčeky s permanentnými magnetmi sa v ostatnom období stávajú veľmi atraktívnymi pohonnými strojmi v rôznych oblastiach priemyselných aplikácií. Veľmi často sú používané aj v zariadeniach pre domácnosti, ako sú automatické práčky alebo umývačky riadu. Ich veľkou prednosťou je veľmi jednoduchá konštrukcia. Statorové valcové cievky sú oveľa menej náročné na výrobu v porovnaní s vinutím jednofázového asynchrónneho motora, kde je vinutie potrebné vkladať do drážok. Aj rotor z permanentného magnetu je výrobne oveľa jednoduchší ako je výroba rotora s kotvou nakrátko a navyše v rotore nevznikajú elektrické straty.

Nevýhodou takýchto strojov je potreba polovodičového meniča, ktorý je schopný frekvenčne motor rozbehnúť. Avšak s ohľadom na malé napájacie prúdy motora vychádza menič malý. Jeho riadenie zabezpečuje mikropočítačový integrovaný obvod, takže prídavné zariadenia svojou cenou nepredrazia celý pohon.

Pre potreby pohonu čerpadla umývačiek riadu bol vyvinutý a postavený dvojfázový synchronný motorček s vyniknutými statorovými pólmi a dvojpólovým permanentným magnetom na rotore. Jeho konštrukčné usporiadanie je uvedené na obrázku 1. Dve protifaľlé statorové cievky ktoré tvoria jednu fázu sú zapojené do série. Napájanie je zabezpečené jednoduchým dvojfázovým polovodičovým meničom. Výstupné napätie meniča je obdĺžnikové. Napájacie napätia sú vzájomne posunuté o  $\pi/2$ . Rotor je vyrobený z plastického magnetického materiálu.



Obr.1. Dvojfázový synchronný motorček  
Fig.1. Design of the two-phase permanent magnets  
motor

Parametre motora:

*Magnetický obvod statora:*

- vonkajší priemer	100 mm
- vnútorný priemer	40 mm
- dĺžka	27 mm
- šírka pólu	15 mm

*Rotor*

-vonkajší priemer	36 mm
- vnútorný priemer	16 mm
- dĺžka	27 mm

*Vzduchová medzera*

1 mm

*Statorové vinutie*

1500 závitov/pól

Priebeh magnetických polí bol simulovaný metódou konečných prvkov. Výpočtom bolo zistené, že priebeh indukovaného napätia je sínusový.

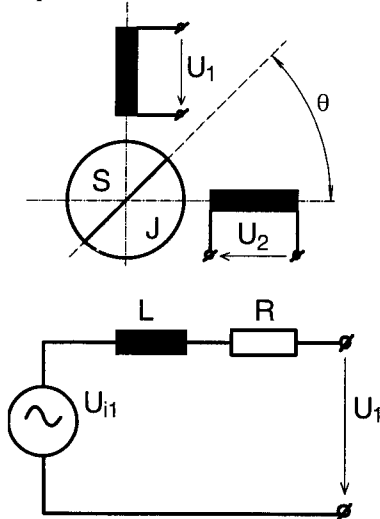
Vypočítané parametre motora:

Indukované napätie	155 V
pri $n = 3000 \text{ ot/min}$	
Synchronná indukčnosť	1,27 H
pre $f = 50 \text{ Hz}$	
Odpor vinutia fázy	240 $\Omega$

Platnosť všetkých parametrov bola overená meraním na realizovanej vzorke motora.

## 2. MATEMATICKÝ MODEL

Matematický model dvojfázového synchronného motora je oveľa jednoduchší ako trojfázového. Fázy sú na seba kolmé, tým sú vzájomne magneticky nezávislé. Pre výpočet elektrických a mechanických vlastností stačí uvažovať len jednu fázu. Na obr. 2. je uvedené schematické usporiadanie a náhradná schéma motora.



Obr.2. Jednofázová náhradná schéma motora

Fig. 2. One-phase model of a two-phase synchronous motor

Predpokladáme, že vinutia fáz sú identické a že magnetický obvod je symetrický. Pri výpočtoch budeme zanedbávať reluktančný moment. Zanedbanie tohoto momentu nám umožňuje vzduchová medzera, ktorá je s ohľadom na motor relatívne veľká.

Okamžitý príkon motora je daný súčtom príkonov jednotlivých fáz:

$$p = u_1 i_1 + u_2 i_2. \quad (1)$$

Tento sa v motore delí na tri časti:

$$p = p_j + p_m + p_e, \quad (2)$$

kde:

$$p_j = R \left( i_1^2 + i_2^2 \right)$$

reprezentuje Jouleove straty v statorovom vinutí,

$$p_m = L \left( \frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt} \right)$$

je jalový výkon statorových vinutí a

$$p_e = u_{11} i_1 + u_{12} i_2 \quad (3)$$

predstavuje elektrický výkon motora.

Rýchlosť rotora synchronného motora je konštantná a je závislá len od frekvencie napájacieho napätia. Takže okamžitú hodnotu momentu motora môžeme určiť zo vzťahu:

$$M = \frac{p_e}{\omega}, \quad (4)$$

kde  $\omega$  je mechanická rýchlosť motora.

Priebeh indukovaných napätí pre danú rýchlosť je známy z výpočtov magnetických polí motora, pre určenie okamžitej hodnoty momentu potrebujeme vypočítať priebehy fázových prúdov. Tieto je možné vypočítať z napäťovej rovnice jednej fázy motora. Z náhradnej schémy z obr. 2. vyplýva:

$$u_1 = R i_1 + L \frac{di_1}{dt} + u_{11}. \quad (5)$$

Pri predpoklade konštantnej rýchlosti motora, môžeme napäťovú rovnicu zjednodušiť tým, že nahradíme čas  $t$  uhlom natočenia rotora ( $\omega = d\theta/dt$ ).

Po dosadení do (4) dostávame:

$$u_1 = R i_1 + L \omega \frac{di_1}{d\theta} + u_{11}. \quad (6)$$

Podobne pre druhú fázu, ktorá je posunutá o  $\pi/2$ .

$$u_2 = R i_2 + L \omega \frac{di_2}{d\theta} + u_{12}. \quad (7)$$

Motor je napájaný z polovodičového meniča obdĺžnikovým napätím s amplitúdou rovnou maximálnej hodnote sieťového napätia.

Vnútorný elektromagnetický moment je daný súčtom okamžitých hodnôt momentov jednotlivých fáz:

$$M = M_1 + M_2 = u_{11} i_1 + u_{12} i_2. \quad (8)$$

Rýchlosť motora dostaneme z dynamickej rovnice:

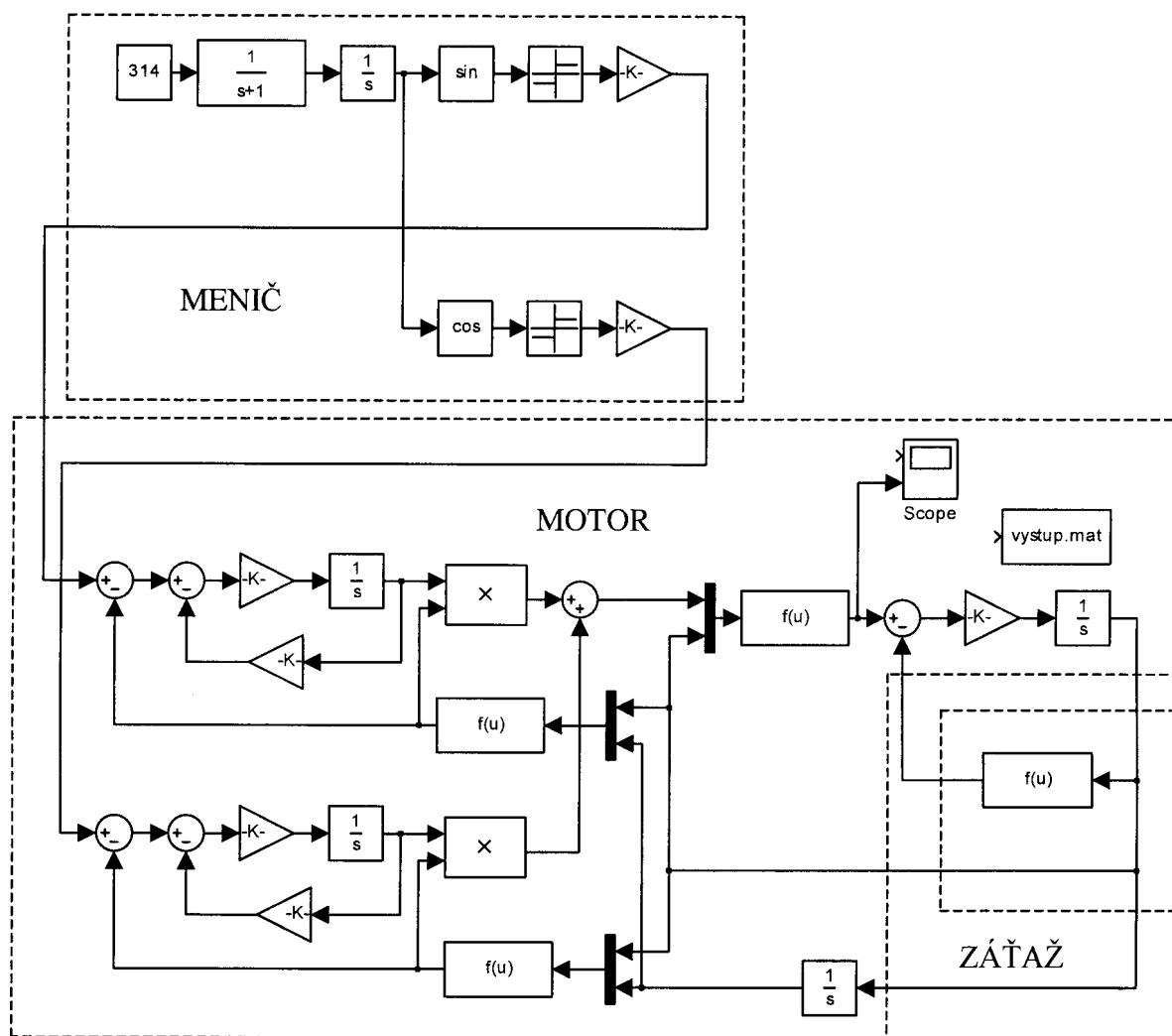
$$M - M_p = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (9)$$

kde  $M_p$  je mechanický záťažový moment motora a  $J$  je moment zotrvačnosti rotora motora.

## 3. ŠTRUKTÚRA SIMULAČNÉHO MODELU

Na základe rovníc matematického modelu bola zostavená simulačná schéma (obr. 3.) v programe Matlab. V hornej časti je vytvorený menič, ktorý vytvára dvojicu obdĺžnikových napätí fázovo posunutých o  $90^\circ$ . Rozbehový člen zabezpečuje frekvenčný rozbeh motora.

Motor je zaťažovaný záťažou s ventilátorovou záťažovou charakteristikou. Predpokladané nasadenie motorčeka je v umývačkách riadu, ako pohonného motora obehovej čerpadla.



Obr. 3. Bloková štruktúra simulačnej schémy  
 Fig. 3. The block structure of simulation scheme

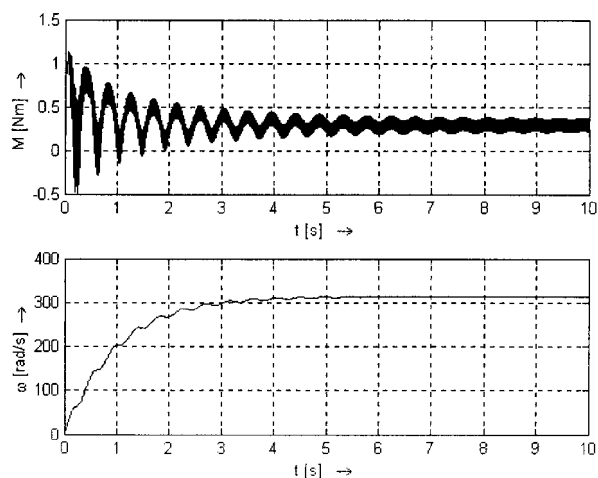
#### 4. VÝSLEDKY SIMULÁCIE

Pomocou simulačnej schémy boli simulované rozbehové vlastnosti motorčeka. Boli vypočítané priebehy fázových prúdov, ako aj priebeh momentu motora. Zvlnenie momentu je v súlade s teoretickými výsledkami uvedenými v prácach [1,2].

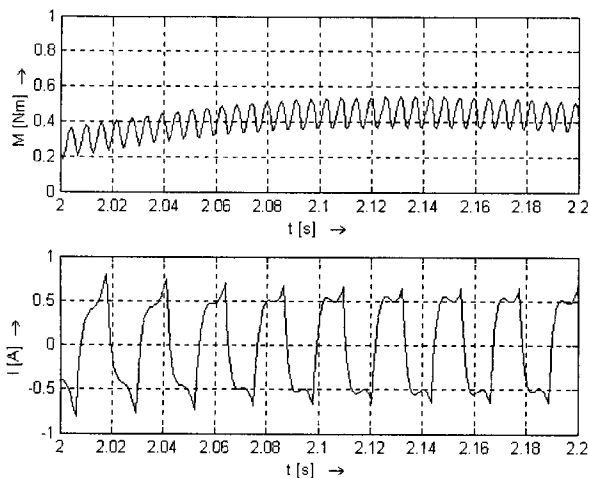
Na obr. 4. je uvedený priebeh momentu motora a priebeh rýchlosti pri frekvenčnom rozbehu. Na obrázku je viditeľné kývanie rotora, ktoré sa ustáli po niekoľkých sekundách. Vlastný priebeh momentu je značne zvlnený.

Na obr. 5. je uvedený priebeh zvlnenia momentu a jemu odpovedajúci priebeh fázového prúdu. Pulzácia momentu odpovedá frekvencii napájacieho obdĺžnikového napätia. Z priebehu je zrejmé, že prúdové špicie vznikajú pri odľahčení motora. So

zvyšovaním záťažového momentu sa priebeh prúdu viac približuje k obdĺžniku.



Obr. 4. Frekvenčný rozbeh motorčeka  
 Fig. 4. The run-up of the machine



Obr. 5. Pribeh zvlnenia momentu a pribeh fázového prúdu motor

Fig. 5. The torque and the phase current waveforms

## 5. ZÁVER

V predloženom článku je uvedený dynamický model dvojfázového synchronného stroja s permanentným magnetom na rotore. Merania na realizovanom prototypu motora poukázali veľkú zhodnosť meraných veličín so simuláciou.

Pri napájaní obdĺžnikovými napätiami je zvlnenie momentu rovné približne 20% strednej hodnoty momentu stroja. Zníženie zvlnenia je možné buď reguláciou prúdu, čo je dosť technicky nákladné, alebo zužovaním dĺžky impulzu napájacieho napätia. Týmto postupom ale klesá aj stredná hodnota momentu stroja. Výpočtom je možné nájsť optimum medzi zvlnením a strednou hodnotou momentu stroja.

## LITERATÚRA

- [1] Zásalický, P., Ferková, Ž.: *Design of two-phase synchronous permanent magnet motor drive*; 14<sup>th</sup> International Conference on Electrical Drives and Power Electronics, pp. 133-135, 3-5 October 2001, Vysoké Tatry, Slovensko
- [2] Klug, L.: *Elektromechanická premena energie*; Časopis EE, III – N° 6, December 1997, pp: 6-7, Bratislava, Slovensko
- [3] Hrabovcová, V., Janoušek, L., Rafajdus, P., Ličko, M.: *Moderné elektrické stroje*; EDIS- Žilinská univerzita, 2001, ISBN- 80-7100-809-5. Slovensko.
- [4] Miksiewicz R., Mrozek A.: *Właściwości silników synchronicznych z magnesami trwałymi umieszczonymi na powierzchni wirnika*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka z.168, pp.137-146, Gliwice 1999
- [5] Schreier L., Chomát M., Doležal I.: *Effect of machine geometry on higher harmonics content in air-gap magnetic field of synchronous reluctance machine*; Scientific Letters of Silesian University of Technology, z.176, pp.259-266, Gliwice 2001, Poland
- [6] Klug, L.: *Brushless Permanent Magnet Machine Design and Simulation*; 14<sup>th</sup> International Conference on Electrical Drives and Power Electronics, 3-5 October 2001, Vysoké Tatry, Slovensko
- [7] Hájek, V., Kuchyňková, H.: *Losses Analysis and the Efficiency Optimization of the Automotive Electric Machines*; 14<sup>th</sup> International Conference on Electrical Drives and Power Electronics, 3-5 October 2001, Vysoké Tatry, Slovensko
- [8] Zásalický, P.: *Mathematical Model of Self Starting Single Phase Permanent Magnet Synchronous Motor*, MicroCAD'99 International Computer Science Conference, February 24-26, 1999, Miskolc, Hungary

## POĎAKOVANIE

Táto práca vznikla vďaka finančnej podpore Vedeckej grantovej agentúry Slovenskej republiky. Problematika bola riešená v rámci výskumnej úlohy číslo: 1/8127/01.

Autori ďakujú spoločnosti BSH Drives and pumps s.r.o. Michalovce za výrobu prototypu motora a financovanie prác na realizácii napájacích a riadiacích obvodov motora.