

# Bezsnímačové riadenie spínaného reluktančného motora

Želmíra Ferková

## Úvod

Spínaný reluktančný motor (SRM) sa vyznačuje jednoduchou konštrukciou bez magnetov, rotorového vinutia a kief, preto aj nízkou výrobnou cenou. Ako nevýhoda sa javí pulzujúci moment, väčšia hlučnosť a horší účinník. Riadenie vyžaduje presnú znalosť uhla natočenia z vhodného snímača na hriadeľ, čo je v niektorých aplikáciách neželateľné vzhľadom na rozmery, spoľahlivosť alebo cenu. Snaha o odstránenie tejto nevýhody vedie k riadeniu založenému na odhade polohy – sensorless control. Zodpovedajúce metódy vykazujú rôzne prístupy k riešeniu úlohy:

- Injektuje sa vhodný prídavný signál (najčastejšie vyššej frekvencie), pomocou ktorého sa indikuje poloha s minimálnou alebo maximálnou indukčnosťou zodpovedajúca súhlasnej, resp. nesúhlasnej polohe pólu rotora a statora [7]. Prídavný signál sa pripája k bezprúdovej fáze, čím zaniká problém s jeho oddelením od riadiaceho signálu. Dostatočne presná identifikácia polohy vyžaduje zvýšenie frekvencie so stúpajúcou požadovanou rýchlosťou, preto táto metóda našla uplatnenie pri nízkych a stredných otáčkach motora.
- Polohu možno odvodiť aj z tvaru prúdu fázy (current gradient sensorless control) [6]. V nesúhlasnej polohe pólov je indukčnosť najmenšia, preto prúd po pripojení napätia rýchlo stúpa a pri priblížení pólov prúd začne klesať. Pri regeneratívnom brzdení a vzdalovaní pólov prúd dosahuje maximum po dosiahnutí minimálnej indukčnosti. Predpokladom vyhodnotenia tvaru krivky prúdu je jeho zmena. Pri malých otáčkach je však prúd udržiavaný na príпустnej hodnote prepínaním, preto táto metóda je použiteľná iba od určitých otáčok. Oblasťou použitia sú stredné a vysoké rýchlosti. Za výhodu možno považovať skutočnosť, že sa nevyžaduje predbežná znalosť priebehu indukčnosti od polohy.
- Odhad polohy rotora a jeho mechanickej rýchlosti pomocou pozorovateľa je problémom vzhľadom na nelineárny a dvojdimenzionálny matematický model SRM [5]. Boli realizované rôzne typy pozorovateľov pri zjednodušujúcich podmienkach, ako je predpoklad lineárnej magnetizačnej charakteristiky alebo identifikačnej etapy na začiatku rozbehu. Dosiahol sa stabilný chod a primerané odchýlky od skutočných hodnôt za cenu použitia rýchlych procesorov. Práce v tomto smere ešte nemožno považovať za uzavreté.
- Umelá neurónová sieť umožňuje vytvoriť model SRM vrátane nelineárnych závislostí. Vstupnými veličinami pri off-line predbežnom tréningu je meraný prúd a estimátor toku. Výstupnou veličinou je uhol polohy rotora. Používa sa trojvrstvová sieť s niekoľkými desiatkami neurónov [10]. Potom sa neurónový pozorovateľ zapojí do on-line schémy riadenia. Metóda vykazuje vyhovujúce výsledky.

## 1. Model SRM

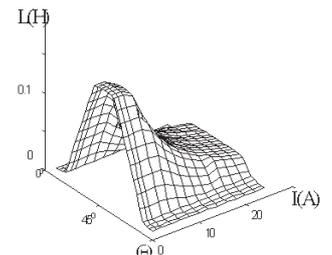
Spínaný reluktančný motor je opísaný nasledovnými rovnicami:

$$U = R i + \frac{d\Psi(i, \Theta)}{dt} = R i + \frac{\partial \Psi(i, \Theta)}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial \Psi(i, \Theta)}{\partial \Theta} \frac{d\Theta}{dt} \quad (1)$$

$$M(i, \Theta) = \frac{\partial}{\partial \Theta} \left( \int_0^i \Psi(i, \Theta) di \right) \quad (2)$$

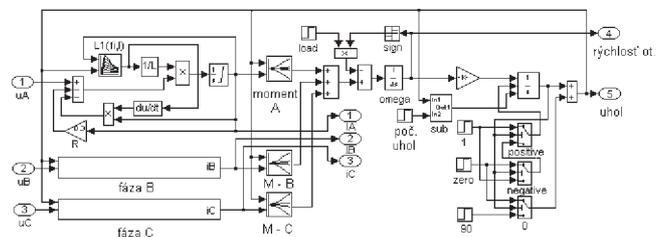


a) tvar magnetického obvodu SRM



b) funkcia indukčnosti fázy  $L(i, \Theta)$

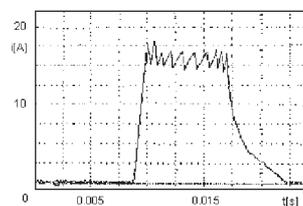
Obr.1



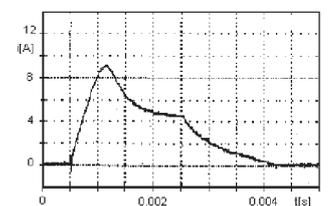
Obr.2 Model spínaného reluktančného motora

Výpočet časových oziev je obtiažny, pretože systém je nelineárny a dvojdimenzionálny v dôsledku závislosti indukčnosti fáz od prúdu a uhla natočenia rotora (obr. 1b). V takomto prípade je výhodné sledovať správanie motora v rôznych režimoch pomocou matematického modelu.

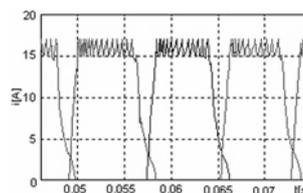
Model motora bol programovaný v programe MATLAB (obr. 2). V záujme urýchlenia výpočtu boli vypočítané funkcie indukčnosti a momentov fáz uložené v tabuľkách. Tieto hodnoty  $L(i, \Theta)$ , ako aj  $M(i, \Theta)$ , boli kontrolované meraním. Motor je napájaný obdĺžnikovými napäťovými impulzmi. Keďže pre motor s pomerom počtu pólov statora a rotora  $2p_1/2p_2 = 6/4$  sa distribúcia napäťových impulzov z meniča opakuje po 90 stupňoch, stačilo navrhnuť model iba pre tento interval. Pri určovaní hodnoty uhla bol zohľadnený aj smer otáčania rotora, pretože časové priebehy uhla sú odlišné (obr. 12). Uvažoval sa konštantný pasívny záťažový moment.



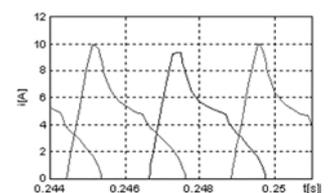
Obr.3 Prúd fázy pri 60 rad/s



Obr.4 Prúd fázy pri 233 rad/s



Obr.5 Simulované prúdy pri 60 rad/s



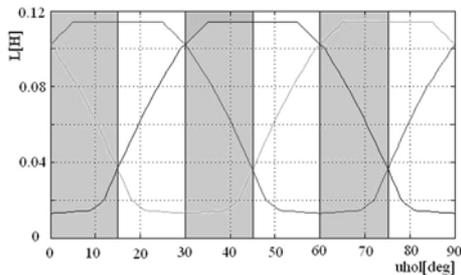
Obr.6 Simulované prúdy pri 233 rad/s

Menič bol simulovaný ako relový člen. Jednu fázu tvoria vinutia dvoch protiláhlych pólov statora.

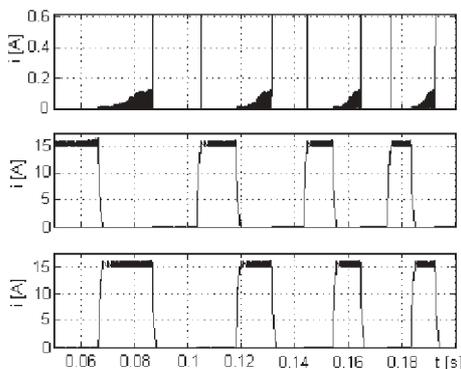
Správnosť modelu bola verifikovaná porovnaním nameraných oscilogramov prúdu s priebehmi získanými simuláciou. Malé rozdiely v doznievajúcej časti krivky boli spôsobené mierne rozdielnym spôsobom rekuperácie v reálnom meniči a v modeli.

## 2. Bezsniáčové riadenie SRM

Pred spustením motora je potrebné určiť fázu, ktorá sa má ako prvá pripojiť pre zvolený smer otáčania. Podľa zvolenej identifikačnej metódy sa najprv pripojí k všetkým trom fázam krátky napätový impulz. Volí sa dostatočne malý, aby vytvorený moment bol menší ako záťažový (resp. trecí) moment. Indukčnosť fáz a veľkosť prúdov potom zodpovedá vzájomnej polohe statorových a rotorových pólov. Keďže ich hodnoty sa opakujú po  $90^\circ$ , tento uhol sa rozdelí na šesť intervalov (obr. 7) a aktuálny interval sa zvolí po vyhodnotení pomeru veľkostí prúdov. Priesečníky kriviek indukčností umožňujú stanoviť presnú hodnotu uhlov pre  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  a  $90^\circ$ . Skutočná poloha rotora sa stanoví s presnosťou lepšou ako  $7,5^\circ$ , čo stačí pre daný účel, pretože je potrebné len vybrať jednu z troch fáz. Napätové impulzy sa pripájajú po dobu 1 ms a prebieha identifikácia. Po 2 ms logika môže pripojiť príslušnú fázu a motor sa rozbieha. Zároveň sa pripája identifikačný 2 kHz signál do zodpovedajúcej bezprúdovej fázy.



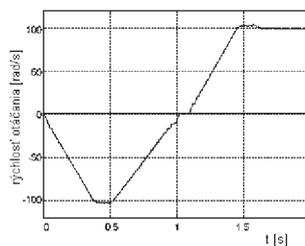
Obr.7 Priebeh indukčností fáz



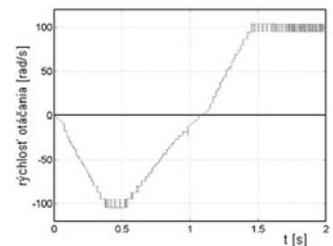
Obr.8 Fázové prúdy s prídavným signálom

Motor s pomerom pólov 6/4 umožňuje identifikovať nesúosovú polohu každých  $30^\circ$ . Injektovaný identifikačný signál sa pripája na nasledujúcu bezprúdovú fázu v motorickom chode a na predchádzajúcu fázu pri brzdení. Maximálna hodnota identifikačného signálu zodpovedá nesúosovej polohe pólov a najmenej indukčnosti, čo umožňuje identifikovať túto polohu. Odhadovaná poloha je upravovaná každých  $30^\circ$ . Delením uhla  $30^\circ$  časom uplynulým od predchozej identifikácie je možné určiť hodnotu rýchlosti a použiť ju na korekciu odhadovanej rýchlosti. V obr. 8 sú zachytené prúdy fáz, kde malé hodnoty identifikačného signálu v prvej fáze sú pre ilustráciu primerane zväčšené. Na identifikáciu sú použité štyri rozdielne programové bloky pre obidva smery otáčania v motorickom a brzdnom chode.

Dva nasledujúce obrázky obsahujú krivky rýchlosti z modelu motora a odhadovanej rýchlosti pri rozbehu, reverzácii a zatažení. Krivka rýchlosti modelu SRM je filtrovaná momentom zotrvač-



Obr.9 Priebeh rýchlosti SRM

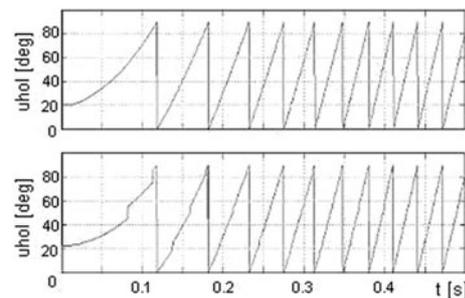


Obr.10 Odhadovaná rýchlosť

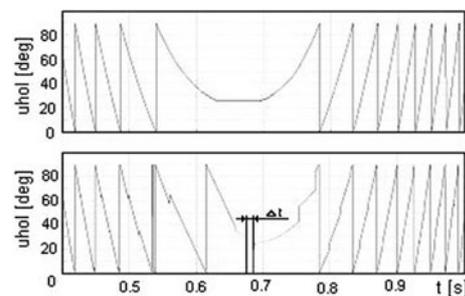
nosti a má o málo vyššiu hodnotu pri ideálnom chode naprázdno v dôsledku pulzujúceho momentu. Po zatažení stredná hodnota rýchlosti je rovná zadaniu. Odhadovaná krivka rýchlosti v obr. 10 narastá stupňovito počas prechodného deja a osciluje pri konštantnej rýchlosti. Na konci brzdenia rýchlosť motora je nulová, avšak táto hodnota nie je potvrdená meraním. Keďže odhadovaná rýchlosť ostáva nezmenená do nasledujúcej korekcie a zaošáva za skutočnou hodnotou, je pri prechode nulou potrebná malá bezpečnostná pauza  $\Delta t$ . Táto zabezpečí dosiahnutie zhodnej nulovej hodnoty oboch veličín.

Na obr. 11 možno porovnať obidva uhly počas rozbehu. Najprv začiatkový uhol rotora je identifikovaný a vložený do riadiaceho programu. Identifikácia uhla prebieha každých  $30^\circ$ , a v týchto bodoch sa hodnoty rýchlosti a uhla korigujú. Na zhodu oboch kriviek postačuje menej než jedna otáčka.

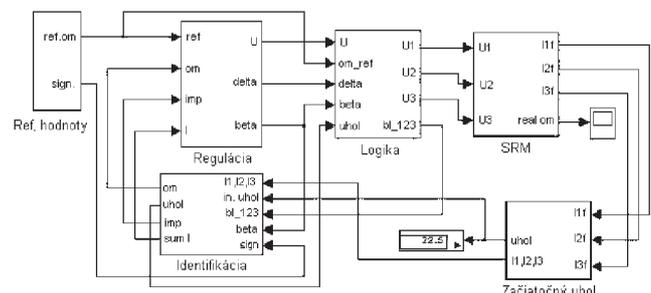
Obr. 12 zobrazuje časový priebeh hodnôt uhlov v blízkosti nulovej rýchlosti pri reverzácii. Od malej rýchlosti cca 20 rad/s pri brzdení je rýchlosť SRM nútená znižovaná bez čakania na odhadovanú hodnotu. Zatiaľ čo uhol motora je už približne konštantný (nulová



Obr.11 Uhol motora a jeho odhad pri štarte



Obr.12 Uhol motora a jeho odhad pri reverzácii



Obr.13 Bezsniáčové riadenie spínaného reluktančného motora

rýchlost), odhadovaný uhol sa ešte mení a môže dôjsť k ďalšej identifikácii. Po bezpečnostnej pauze sa opäť identifikuje začiatočný uhol a môže nastať rozbeh v opačnom smere.

Obr. 13 obsahuje schému použitú pri simulácii. Výstupy riadenia zadávajú do logiky signál riadenia (U), znamienko regulačnej odchýlky rýchlosti (delta) a pomocný signál (beta), ktorý uvádza rýchlosť menšiu než 20 rad/s pri brzdení. Výstup bl\_123 logiky zadáva identifikačné impulzy prúdov pre spätné väzby. Výstup „imp“ identifikačného bloku určuje dobu korekcie uhla a umožňuje začať brzdenie v správnom okamihu. Suma všetkých prúdov (sum I) predstavuje spätnú väzbu riadenia.

## Záver

V príspevku uvedený model bezsnímačového riadenia umožňuje sledovať základné vlastnosti SRM. Použitá metóda identifikácie s vnútnym signálom je vhodná pre nižší rozsah riadenia rýchlosti a vyšší moment zotrvačnosti. V sledovanom rozsahu do 160 rad/s sa dosiahla spoľahlivá činnosť s 2 kHz injektovaným signálom. Pri požiadavke vyššej rýchlosti treba buď zvýšiť frekvenciu a napätie priloženého signálu, alebo aplikovať metódu identifikácie založenú na vyhodnotení tvaru prúdu. Simulácia preukázala použiteľnosť uvedenej metódy aj počas prechodných dejov.

*Problematika bola riešená v rámci projektu VEGA 1/9277/02.*

## Literatúra

- [1] BU, J., XU, L.: Eliminating Starting Hesitation for Reliable Sensorless Control of Switched Reluctance Motors. IEEE Trans. Ind. Appl. vol. 37 (2001), no.1/2, pp. 59 – 66.
- [2] ČORDA, J., MAŠIČ, S.: Computation of Torque Pulsation of Switched Reluctance Drive. Int. Conf. in Electrical Machines and Drives, London 1989, pp. 308 – 311.
- [3] DARSON, G. E., EASTHAM, A. R.: Switched Reluctance Motor Torque Characteristics: Finite-Element Analysis and Test Results. IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 23 (1987), no. 3, pp. 532 – 537.
- [4] DUC, LE QUANG, FERKOVÁ, Ž.: Modelling of a SRM in Dynamical Performance. J. El. Eng. 1998, no.7 – 8, pp.190 – 193.
- [5] ELMAS, C., ZELAYA, H., DE LA PARRA: Position Sensorless Operation of a Switched Reluctance Drive Based on Observer. The EPE Ass., 1993, pp. 82 – 87.
- [6] GALLEGOS-LOPEZ, G., KJAER, P. C., MILLER, T. J. E.: A New Sensorless Method for SRM Drives. IEEE Trans. Ind. Appl. 1998, no. 4, pp. 832 – 840.
- [7] GUO, H. J., LEE, W. B., WATANABE, T., ICHINOKURA, O.: An Improved Sensorless Driving Method of SRM Using Impressed Voltage Pulse. PCC Osaka 2002, pp. 977 – 980.
- [8] ILIĆ-SPONG, M., MARINO, R., PERESADA, S. M, TAYLOR, D.G.: Feedback Linearizing Control of Switched Reluctance Motors. IEEE Trans. Aut. Control, 1987, vol. AC-32, pp. 371 - 379.
- [9] LAWRENSON, P. J., STEPHENSON, J. M., ČORDA, J., BLENKINSON, P.T. – Fulton: Variable-Speed Reluctance Motors. Proc. IEE, 1980, vol.127, pp. 253 – 265.
- [10] MESE, E., TORREY, D. A.: An Approach for Sensorless Position Estimation for Switched Reluctance Motors Using Artificial Neural Network. IEEE Trans. on Power Electronics, 2002, No.1, pp. 66 – 75.

**Želmíra Ferková**

44

**Katedra elektrických pohonov a mechatroniky  
FEI TU v Košiciach  
Letná 9, 042 00 Košice  
e-mail: ferkova@tuke.sk**