

## IŠMANIOJI ASINCHRONINĖ PAVARA

Donatas Uznys

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: donatas.uznys@gmail.com

**Santrauka.** Nagrinėjama neraiškioju reguliatoriumi valdoma asinchroninė pavara. Regulatorius įgyvendina tiesioginį momento valdymą. Pagrindinis jo tikslas – sumažinti elektromagnetinio momento ir statoriaus srovės švytavimus. Aprašomi tiesioginio momento valdymo pagrindai. Pateikti neraiškiojo reguliatoriaus sudarymo principai ir išmaniosios pavaros kompiuterinis modelis. Gauti imitacijos rezultatai lyginami su klasikinio tiesioginio momento valdymo kompiuterinio modelio rezultatais. Neraiškiojo reguliatoriaus naudojimas leidžia gauti perpus mažesnius momento, statoriaus srovės ir srauto švytavimus, mažesnes didžiausias dinamines nuokrypas.

**Reikšminiai žodžiai:** asinchroninis variklis, vektorinis valdymas, tiesioginis momento valdymas, neraiškioji logika.

### Įvadas

Tiesioginis momento valdymas (TMV, angl. *Direct torque control, DTC*) pristatytas 1986 m. ir yra vis dažniau naudojamas pavaroms valdyti dėl didelės greitaveikos ir tikslaus momento valdymo nenaudojant sudėtingų algoritmų. TMV sistema reikalauja momento, statoriaus srauto amplitudės ir srauto sektoriaus signalų, tačiau galutinė struktūra yra labai paprasta. Tai vienas pagrindinių šio valdymo pranašumų (Sheidaei *et al.* 2007).

Šis valdymo metodas supaprastina ir pačios asinchroninės pavaros struktūrą, nes leidžia valdikliu tiesiogiai valdyti galios dalies raktus nenaudojant modulatoriaus.

Tinkamai valdant srautą ir momentą, tiesioginis momento valdymas tampa atsparus išoriniams trikdžiams ir variklio parametrų nuokrypoms. Tačiau esant nuostoviam darbo režimui susidaro pastebimi srauto ir momento švytavimai, ypač taikant histerezės kilpas žemų greičių srityje (Pujar, Kodad 2009, Sheidaei *et al.* 2007).

### Tiesioginio momento valdymo pagrindai

Statoriaus srautas ir kuriamas momentas skaičiuojami įvertinant tik statoriaus srovės ir įtampas. Jų projekcijoms į nejudančiąją koordinačių sistemą gauti taikoma Parko transformacija:

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{2}{3}i_A - \frac{1}{3}i_B - \frac{1}{3}i_C, \\ i_{sq} = -\frac{1}{\sqrt{3}}i_B + \frac{1}{\sqrt{3}}i_C, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_d = \frac{2}{3}u_A - \frac{1}{3}u_B - \frac{1}{3}u_C, \\ u_q = -\frac{1}{\sqrt{3}}u_B + \frac{1}{\sqrt{3}}u_C, \end{cases} \quad (2)$$

čia  $i_{sd}$  – statoriaus srovės  $d$  ašies projekcija;  $i_{sq}$  – statoriaus srovės  $q$  ašies projekcija;  $u_{sd}$  – statoriaus įtampos  $d$  ašies projekcija;  $u_{sq}$  – statoriaus įtampos  $q$  ašies projekcija.

Taikant TMV metodą naudojama tik vieno variklio parametro vertė – statoriaus varža  $R_s$ . Norint gauti gerus pavaros valdymo rezultatus, reikia žinoti tikslią statoriaus varžos vertę, ypač mažų greičių zonoje (Draou, Miloudi 2010):

$$\begin{cases} \Psi_{sd} = \int (u_{sd} - R_s \cdot i_{sd}) dt, \\ \Psi_{sq} = \int (u_{sq} - R_s \cdot i_{sq}) dt. \end{cases} \quad (3)$$

Statoriaus srauto vektoriaus amplitudės ir fazės išraiškos:

$$|\overline{\Psi}_s| = \sqrt{\Psi_{sd}^2 + \Psi_{sq}^2}, \quad (4)$$

$$\angle \overline{\Psi}_s = \tan^{-1} \left( \frac{\Psi_{sq}}{\Psi_{sd}} \right). \quad (5)$$

Elektromagnetinio momento išraiška:

$$M = \frac{3}{2} p (\Psi_{sd} i_{sq} - \Psi_{sq} i_{sd}), \quad (6)$$

čia  $p$  – variklio polių porų skaičius.

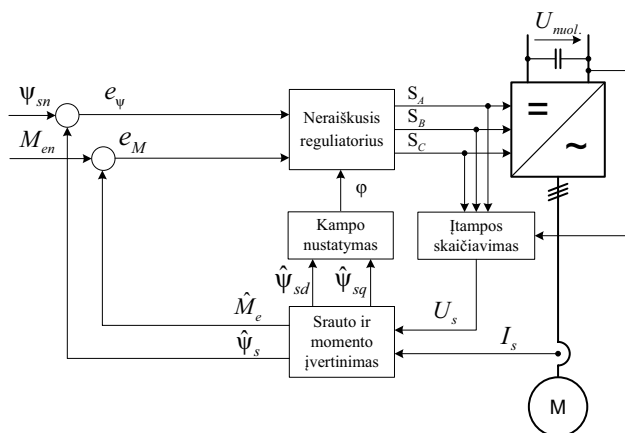
(1) ir (2) formulės verčia fazinių įtampų ir srovių vertes į dvimatę koordinačių sistemą. Srauto  $d$ - $q$  dedamosioms skaičiuoti reikalinga sudėtingesnė aritmetinė funkcija – in-

tegravimas (3), srauto transformacijai į polinę koordinatinių sistemą – šaknis (4) ir arktangentas (5). Šie srauto, momento ir fazės skaičiavimai skirti būtiniams TVM valdymo vidiniams kintamiesiems rasti (Metidji *et al.* 2011).

Šiuo metu vis dažniau pavaroms valdyti naudojamas dirbtinis intelektas (Lisauskas, Rinkevičienė 2010; Mahendran, Gurusamy 2011). Neraiškiosios logikos valdikliai gali būti naudojami vietoj klasikinių pavarų reguliatorių.

### Neraiškiosios logikos valdiklis

Taikant neraiškiają logiką (angl. *Fuzzy logic*) tiesioginio momento valdymo pagrindas išlieka nepakitęs. Neraiškasis valdiklis atlieka momento ir srauto histerezinių valdiklių ir vektorių parinkimo lentelės funkcijas, todėl funkcinė schema (1 pav.) daugiausia atitinka tradicinį valdymą (Liu *et al.* 2010).



1 pav. Neraiškiojo tiesioginio momento valdymo schema

Fig. 1. Direct torque fuzzy control scheme

Statoriaus srautas ir kuriamas momentas valdomi tiesiogiai tinkamai parenkant erdvinius statoriaus įtampų vektorius, t. y. parenkant inverterio raktų būsenas. Kadangi pasirinktas inverteris turi šešis raktus, neraiškasis valdiklis taip pat turi šešis išėjimus, kuriuose formuoja signalus kiekvienam raktui valdyti. Šie signalai gali įgyti tik dvi vertes – 0 ir 1.

Tradicionio ir neraiškiojo valdymų įėjimo signalai yra statoriaus srauto ir elektromagnetinio momento nuokrypos:

$$e_{\psi} = \psi_{sn} - \hat{\psi}_s, \quad (7)$$

$$e_M = M_{en} - \hat{M}_e, \quad (8)$$

čia  $\psi_{sn}$  – statoriaus srauto nuostatas;  $\hat{\psi}_s$  – apskaičiuota statoriaus srauto amplitudė;  $M_{en}$  – momento nuostatas;  $\hat{M}_e$  – apskaičiuotas momentas.

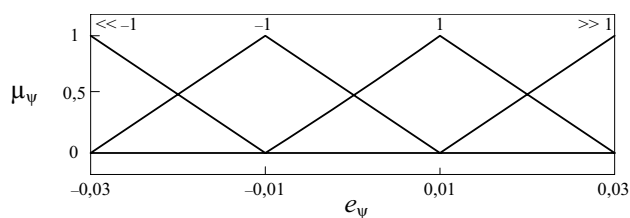
Neraiškiojo reguliatoriaus taisyklės (1 lentelė) sudarytos remiantis tradicinio valdymo vektorių parinkimo lentele (Mahendran, Gurusamy 2011; Toufouti *et al.* 2007), tačiau skiriasi keliomis taisyklėmis, skirtomis didelėms nuokrypoms ( $\gg 1$  ir  $\ll -1$ ) apriboti. Šis pakeitimas taip pat įgyvendina variklio paleidimą, kai nėra liekamojo statoriaus srauto.

1 lentelė. Neraiškiojo valdiklio taisyklių rinkinys

Table 1. Rules for fuzzy controller

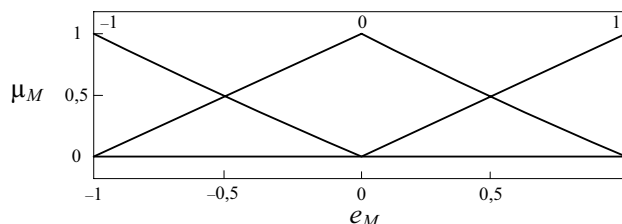
$e_{\psi}$	$e_M$	S. 1	S. 2	S. 3	S. 4	S. 5	S. 6
$\gg 1$	-	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	U <sub>3</sub>	U <sub>4</sub>	U <sub>5</sub>	U <sub>6</sub>
+1	+1	U <sub>2</sub>	U <sub>3</sub>	U <sub>4</sub>	U <sub>5</sub>	U <sub>6</sub>	U <sub>1</sub>
	0	U <sub>7</sub>	U <sub>0</sub>	U <sub>7</sub>	U <sub>0</sub>	U <sub>7</sub>	U <sub>0</sub>
	-1	U <sub>6</sub>	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	U <sub>3</sub>	U <sub>4</sub>	U <sub>5</sub>
-1	+1	U <sub>3</sub>	U <sub>4</sub>	U <sub>5</sub>	U <sub>6</sub>	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>
	0	U <sub>0</sub>	U <sub>7</sub>	U <sub>0</sub>	U <sub>7</sub>	U <sub>0</sub>	U <sub>7</sub>
	-1	U <sub>5</sub>	U <sub>6</sub>	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	U <sub>3</sub>	U <sub>4</sub>
$\ll -1$	-	U <sub>4</sub>	U <sub>5</sub>	U <sub>6</sub>	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	U <sub>3</sub>

1 lentelė garantuoja optimalaus vektoriaus parinkimą. Išėjimo signalai priklauso nuo statoriaus srauto nuokrypos, momento nuokrypos ir srauto fazės. +1 atitinka padidėjimą, -1 atitinka sumažėjimą,  $\gg 1$  – ribinį padidėjimą,  $\ll -1$  – ribinį sumažėjimą, 0 – tinkamą vertę. Nuo S.1 iki S.6 – tai fazės sektoriaus numeris. Sudarytos aštuonių įtampų vektorių priklausomybės, t. y. trifazio inverterio su šešiais raktais. Nuo U<sub>0</sub> iki U<sub>7</sub> – visos leidžiamos raktų būsenų kombinacijos.



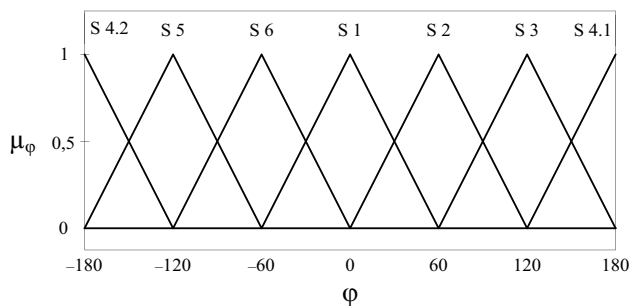
2 pav. Statoriaus srauto nuokrypos priklausomybės funkcijos

Fig. 2. Membership functions of stator flux deviation



3 pav. Momento priklausomybės funkcijos

Fig. 3. Membership functions of torque



4 pav. Fazės priklausomybės funkcijos  
Fig. 4. Membership functions of phase

Neraiškiajam valdikliui sudaryti pasirinktas Mamdani metodas. Jis leidžia formuoti diskrečiuosius išėjimo signalus, todėl galima tiksliai valdyti inverterį.

4 pav. matyti, kad fazinis kampas padalijamas į šešis sektorius. Pažymėtina, kad ketvirtas sektorius turi dvi priklausomybių funkcijas. Tai būtina, nes fazės signalas kinta srityje  $[-180\ 180]$ , o sektorius ribojasi su abiem ribomis, t. y.  $[-180\ -120]$  ir  $[120\ 180]$ . Taip sukuriamos papildomos aštuonios neraiškiojo valdiklio taisyklės (1 lentelė) ir jų skaičius iš 48 tampa 56.

### Imitacijos rezultatai

Imituoto asinchroninio variklio parametrai pateikti 2 lentelėje.

2 lentelė. Imituoto asinchroninio variklio parametrai

Table 2. Simulated induction motor parameters

$P_n$	$U$	$f$		
4000 W	400 V	50 Hz		
$R_s$	$L_s$	$R_r$	$L_r$	
1,405 $\Omega$	5,839 mH	1,395 $\Omega$	5,839 mH	
$L_m$	$J$	$k_{tr}$	$p$	
0,1722 H	0,0131 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$	2,985 $\text{mN}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$	2	

Sudaryti klasikinio TMV ir neraiškiojo reguliatoriumi valdomo TMV kompiuteriniai modeliai buvo išbandomi įvairiais darbo režimais.

Imitacijos sąlygos:

$t = 0$  s pagreitis 900 iki 500 aps./min ( $t = 0,556$  s);

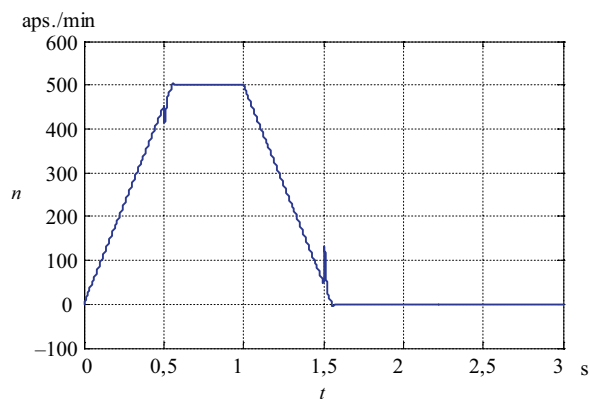
$t = 0,5$  s statinė apkrova lygi 15 N·m;

$t = 1$  s pagreitis minus 900 iki 0 aps./min (at  $t = 1,56$  s);

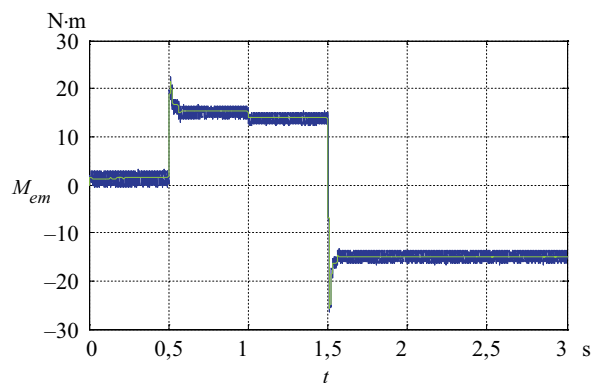
$t = 1,5$  s statinė apkrova lygi minus 15 N·m.

5 pav. pateiktas neraiškiojo valdymo greičio pereinamųjų vyksmų grafikas, kuris sutampa su klasikinio valdymo grafiku (6 pav.) dėl aukštų dinaminų rodiklių. Šuoliai įjungiant apkrovą sutampa.

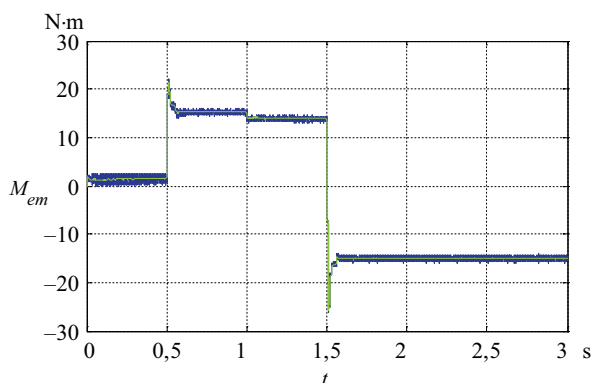
6 pav. ir 7 pav. pateiktų pereinamųjų vyksmų maksimalios dinaminės nuokrypos skirtumas – tik 1,9 %, tačiau



5 pav. Greičio grafikas  
Fig. 5. Motor speed graph



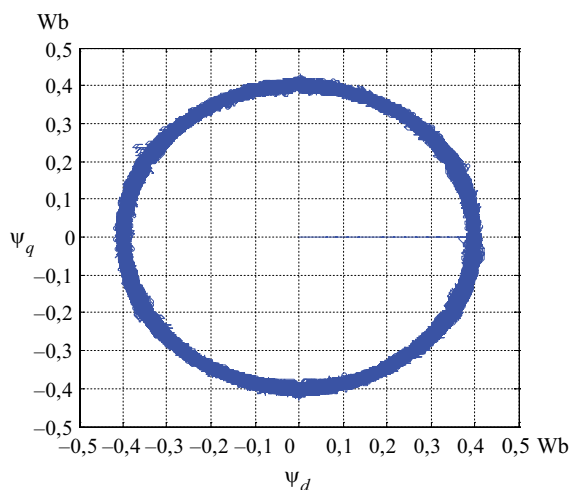
6 pav. Klasikinio valdymo elektromagnetinis momentas  
Fig. 6. Electromagnetic torque of traditional DTC



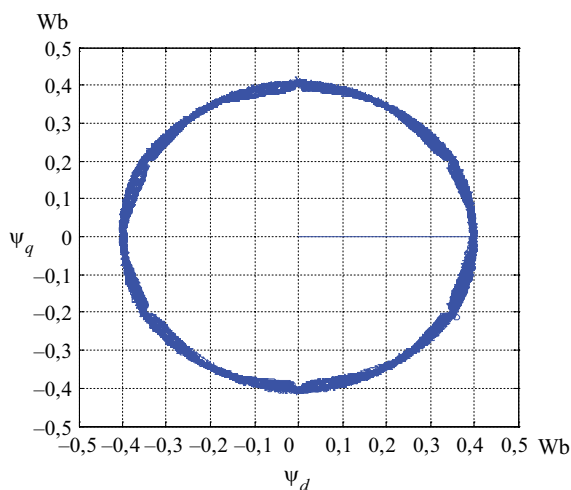
7 pav. Neraiškiojo valdymo elektromagnetinis momentas  
Fig. 7. Electromagnetic torque of DTFC

vidutiniai momento švytavimai sumažėjo beveik perpus.

Sukuriamo besisukančio statoriaus srauto trajektorija pateikta 8 pav. ir 9 pav. Tiesi linija iš centro rodo, kad srautas buvo kuriamas nuo nulio. Taikant neraiškųjį valdymą, vidutiniai švytavimai sumažėjo perpus, o maksimali dinaminė nuokrypa – net 48,5 %.



8 pav. Klasikinio valdymo statoriaus srauto trajektorija  
Fig. 8. Stator flux trajectory of traditional DTC



9 pav. Neraiškiojo valdymo statoriaus srauto trajektorija  
Fig. 9. Stator flux trajectory of DTFC

## Išvados

1. Sukurtas tiesioginio momento valdymo pavaros kompiuterinis modelis. Momentui ir srautui valdyti naudojamas neraiškūs reguliatorius, tiesiogiai valdantis inverterio raktus. Toks valdymas garantuoja puikų sistemos darbą bet kuriuo darbo režimu.
2. Klasikinį tiesioginį momento valdymą pakeitus neraiškiojo valdymu, galima pasiekti tokius pat gerus dinaminis rodiklius, t. y. greitą atsaką į greičio ir momento pokyčius bei trikdžius.
3. Gauti imitacijos rezultatais rodo, kad, naudojant neraiškųjį valdymą, pagrindinį valdymo trūkumą – momento ir statoriaus srovės švytavimus – pavyko sumažinti perpus.
4. Neraiškūs tiesioginio momento valdymas mažina maksimalias dinamines elektromagnetinio momento nuokrypas 1,9 %, o statoriaus srauto – 48,5 %.

## Literatūra

- Draou, A.; Miloudi, A. 2010. A simplified speed controller for direct torque neuro fuzzy controlled induction machine drive based on a variable gain pi controller, in *The 4<sup>th</sup> international Power Engineering and Optimization Conf. PEOCO2010, Shah Alam, Selangor, Malaysia, 2010*: 533–538.
- Lisauskas, S.; Rinkevičienė, R. 2010. Model of ventilation system drive with fuzzy controller, *Electronics and Electrical Engineering* 10(106): 13–16.
- Liu, S. X.; Wang, M. Y.; Chen, Y. G.; Li, S. 2010. A novel fuzzy direct torque control system for three-level inverter-fed induction machine, *International Journal of Automation and Computing* 7(1): 78–85.  
<http://dx.doi.org/10.1007/s11633-010-0078-7>
- Mahendran, N.; Gurusamy, G. 2011. Reduction of torque and seed pulsation in direct torque control of large induction motor using fuzzy logic controller, *European Journal of Scientific Research* 4(48): 559–566.
- Metidji, B.; Tazart, F.; Azib, A.; Taib, N.; Rekioua, T. 2011. A new fuzzy direct torque control strategy for induction machine based on indirect matrix converter, *International Journal of Research and Reviews in Computing Engineering* 1(1): 18–22.
- Pujar, J. H.; Kodad, S. F. 2009. AI based direct torque fuzzy control of AC drives, *International Journal of Electronic Engineering Research* 1(3): 233–244.
- Sheidaei, F.; Sedighzadeh, M.; Mohseni-Zonoozi, S. H.; Alinejad-Beromi, Y. 2007. A fuzzy logic direct torque control for induction motor sensorless drive, in *The 42<sup>nd</sup> International Universities' power Engineering Conference UPEC2007, Brighton, United Kingdom, 2007*: 197–202.
- Toufouti, R.; Meziane, S.; Benalla, H. 2007. Direct torque control for induction motor using intelligent techniques, *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*: 35–44.

## SMART INDUCTION DRIVE

### D. Uznys

#### Abstract

The article focuses on the induction drive with a fuzzy controller. This controller adopts direct torque control. It aims to halve pulsations of electromagnetic torque and stator current. The author introduces the basics of direct torque control as well as principles of fuzzy controller development and computer model of smart induction drive. Simulation results were compared to results of traditional direct torque control computer model. The use of fuzzy controller achieved two-times lower pulsations of torque, stator current and flux, plus lowered maximum overshoots.

**Keywords:** induction motor, vector control, direct torque control, fuzzy logic.