

SKALIARINIŲ BŪDU VALDOMOS DAŽNINĖS ELEKTROS PAVAROS  
IMITACINIS TYRIMASJonas Kriauciūnas<sup>1</sup>, Laurynas Kerpė<sup>2</sup>

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: <sup>1</sup>jonas.kriauciunas@vgtu.lt; <sup>2</sup>laurynaskr@gmail.com

**Santrauka.** Nagrinėjamas dažninės elektros pavaros, valdomos skaliariniu būdu, imitacinių modelių sudarymas ir dinaminė charakteristikų analizė. Sudarytas uždarnosios elektros pavaros su proporciniais-integraliniais-diferencialiniais reguliatoriais (PID) *Simulink* modelis. Variklio modelis sudarytas sinchroniniu greičiu besisukančioje koordinatinių sistemoje. Išnagrinėti dažninės elektros pavaros pereinamieji vyksmai, esant skirtingiems greičio nuostatams, skirtingoms statinėms apkrovoms ir skirtingiems reguliatoriaus suderinimo koeficientams  $K_p$ ,  $K_I$ ,  $K_D$ . Parinktas ir sukonfigūruotas reguliatorius labai sumažina variklio paleidimo trukmę bei, įjungus apkrovą, atkuria greitį į pradinę, iš anksto nustatytą vertę, lygią nuostatui.

**Reikšminiai žodžiai:** dažninė pavaara, skaliarinis valdymas, imitacinis tyrimas.

## Įvadas

Pastaruoju metu kintamosios srovės elektros variklių (angl. *Induction motors*) naudojimo greičio ir reguliavimo pozicionavimo pavarose mastas labai padidėjo. To priežastis – kintamosios srovės variklių naudojimas įvairiose pramonės šakose, kuriose anksčiau buvo naudojami nuolatinės srovės varikliai. Plečiantis šių variklių taikymo sričiai, atsiranda poreikis kuo efektyviau juos išnaudoti ir taupyti elektros energiją. Tai daroma optimizuojant jų valdymo algoritmus.

Siekiant, kad technologiniai procesai ir automatinio valdymo sistemos būtų efektyvios, dauguma nevaldomų kintamosios srovės pavarų yra tobulinamos. Jos papildomos dažnio keitikliais, kurie pastaruoju metu dažnai naudojami elektros pavarų greičiui reguliuoti. Dažninių asinchroninių elektros pavarų greitį galima reguliuoti taikant skaliarinio ir vektorinio valdymo metodus. Darbe pagrindinis dėmesys skiriamas skaliarinio valdymo metodui. Jis tinka sistemoms, kurioms nėra keliami ypač griežti valdymo tikslumo kriterijai. Tokios sistemos pavyzdys – patalpų vėdinimo sistema (Rinkevičienė, Petrovas 2008; Emmanuel *et al.* 2001).

Skaliarinio valdymo atveju įtampos ir tinklo dažnio santykis  $U/f$  turi būti keičiamas proporcingai. Keičiant statoriaus maitinimo įtampos dažnį, proporcingai turi būti keičiama įtampa, siekiant palaikyti pastovų variklio sukuriama magnetinį srautą  $\Phi$ . Remiantis statistika, šiuo metodu valdomų pavarų pasirinkamumas siekia ~80 % atvejų (Baškys *et al.* 2008). Svarbiausi kriterijai, lemiantys šį pasirinkimą, yra: paprastas valdymas ir nesudėtingas parengimas darbui, patogi vartotojo sąsaja ir nedidelė kaina.

Taigi pramoninėse valdymo sistemose ir kituose technologinių procesų valdymo įrenginiuose naudojamos valdomos elektros pavaros. Pavarų valdymas paprastai siejamas su greičio keitimu. Šiuo metu vienas populiariausių asinchroninio variklio greičio reguliavimo būdų yra dažninis valdymas (angl. *Variable-frequency control*). Šis būdas labai išplėtė elektros pavarų naudojimo sritį. Valdymui naudojami įvairių tipų (pvz., veikiantys vektorinio arba skaliarinio valdymo metodo pagrindu) pramoniniai dažnio keitikliai (Al-Jufout, Khandakji 2008).

Dažnio keitiklio paskirtis – keisti išėjimo įtampą, kuri maitinamos variklio apvijos, tam tikru dėsniu. Variklis paprastai maitinamas sinusine įtampa. Ji gaunama iš inverterio, kuris gali būti srovės arba įtampos inverteris. Jį sudaro šešių pakopų tranzistoriniai komutavimo raktai (pvz., *Insulated Gate Bipolar Transistor*), t. y. išėjimo įtampa turi impulsų pločio moduliacijos (IPM) (angl. *Pulse Width Modulation*) būdu formuojamą tam tikrą impulsų seką tranzistoriams veikiant rakto režimu. Kad impulsų seka būtų artima sinusinei įtampai, būtina nustatyti pagrindinius impulsų parametrus (impulsų skaičių per periodą, plotį ir kt.) (Baškys *et al.* 2007).

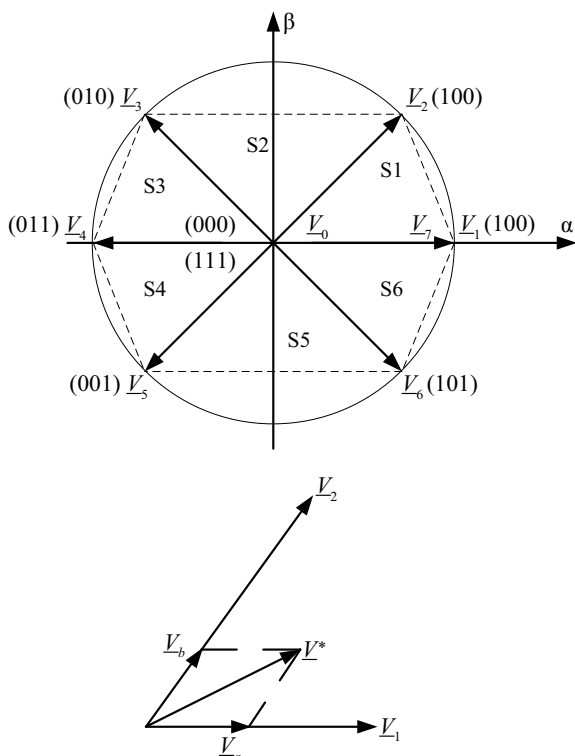
Dažnio keitikliai būna dviejų pagrindinių tipų: įtampos inverteriai ir srovės inverteriai. Įtampos inverteriai naudojami varikliams valdyti, indukciniam kaitinimui, kintamajai srovei tiekti iš baterijų, saulės elementų, vandenilio kuro elementų, kaip nepertraukiamo maitinimo

kintamosios srovės šaltiniai, taip pat kaip statiniai reaktyviosios galios generatoriai arba kompensatoriai bei aktyvieji harmonikų filtrai.

Dažnai pramoniniuose įrenginiuose sprendžiama greičio palaikymo/stabilizavimo problema, naudojant dažnio keitikliu valdomas pavaras (Ali, Abozaed 2010). Darbe nagrinėjamas uždarnosios greičio reguliavimo sistemos su dažnio keitikliu imitacinio modelio sudarymas ir imitacijos rezultatai.

### Erdvinio vektoriaus impulsų pločio moduliacija

Erdvinio vektoriaus impulsų pločio moduliacija (angl. *SV PWM*) – impulsų pločio moduliacijos algoritmas, taikomas trifaziam inverteriui valdyti, kuris yra paprastas. Tačiau kartais, atsižvelgiant į didelį elementų būsenų skaičių, šį algoritmą taikyti tampa sudėtinga. Skirtingai nei sinusinė IPM, šis būdas paremtas įtampų pateikimu erdviniais vektoriais  $d$  ir  $q$  koordinatų plokštumoje. Komponentės  $d$  ir  $q$  surandamos pagal Parko transformaciją. Iš stačiakampės bangos galima gauti 90,7 % dydžio pagrindinės harmonikos amplitudę, kai inverterio darbo charakteristikos yra tiesinės, o sinusinė IPM duoda 78,55 %. Erdvinio vektoriaus moduliacija yra interaktyvus metodas, tinkamas skaitmeniniam įgyvendinimui, valdant elektros pavaras realiuoju laiku (Chikkegowda 2007; Petrovas, Rinkevičienė 2009).



1 pav. Inverterio įtampų erdviniai vektoriai  
Fig. 1. Voltage space vectors of inverter

Tiesinė moduliavimo srityje valdymo vektoriaus ( $V^*$ ) vertė ir raktų įjungimo laiko momentai apskaičiuojami pagal (1) ir (2) išraiškas.

$$\underline{V}^* = \underline{V}_a + \underline{V}_b = \underline{V}_1 \frac{t_a}{T_c} + \underline{V}_2 \frac{t_b}{T_c} + (\underline{V}_0 \text{ arba } \underline{V}_7) \frac{t_0}{T_c}. \quad (1)$$

Laiko momentai  $t_a, t_b, t_0$  apskaičiuojami taip:

$$t_a = \frac{V_a}{V_1} \cdot T_c; \quad t_b = \frac{V_b}{V_2} \cdot T_c; \quad t_0 = T_c - (t_a + t_b), \quad (2)$$

čia  $V^*$  – valdymo vektorius;  $V_a, V_b$  – valdymo vektoriaus dedamosios;  $T_c$  – periodo vidurkis;  $t_a, t_b, t_0$  – fazių A, B ir C valdymo įtampos laiko trukmė.

### Sinusinė impulsų pločio moduliacija

Sinusinė impulsų pločio moduliacija (SIPM) pramonėje dažnai vadinama sinusu užkoduota IPM, skirta keitiklio įtampai valdyti. Kai moduliacijos indekso  $m$  vertė viršija vienetą, tiesinis santykis tarp moduliacijos indekso ir išėjimo įtampos nebepalaikomas, todėl šiuo momentu reikia pritaikyti permoduliavimo metodus.

Norint pasiekti reikiamas dažniu valdomų pavarų statines ir dinamines charakteristikas, būtina žinoti kuo daugiau informacijos apie valdomą objektą. Tikslus variklio parametrų nustatymas – svarbi veiklos sritis. Yra įvairių tipų trifazio variklio ekvivalentinių schemų, naudojamų charakteristikoms ir parametrams apskaičiuoti. Apskaičiuoti parametrai toliau naudojami pavarų dinaminiam modeliui sudaryti (Rinkevičienė, Lisauskas 2003).

Trifazio asinchroninio variklio dinaminės charakteristikų tyrimas tampa daug paprastesnis, transformuojant trifazę įtampų sistemą į dvifazę. Kadangi variklio netiesinių diferencialinių lygčių sprendimas analiziniu būdu dažnai yra labai komplikotas, todėl lygtys sprendžiamos skaitiniais metodais. Transformuojant statoriaus arba rotorius kintamuosius, koordinatų sistemos skirstomos į sinchroniškai besisukančią  $d^e-q^e$  ir stacionarią (nejudančią)  $d^s-q^s$  (Batkauskas 2010). Tiriomojo variklio vardiniai duomenys pateikiami 1 lentelėje.

1 lentelė. Variklio 4A1000S2Y3 techniniai duomenys  
Table 1. Parameters of 4A1000S2Y3 induction motor

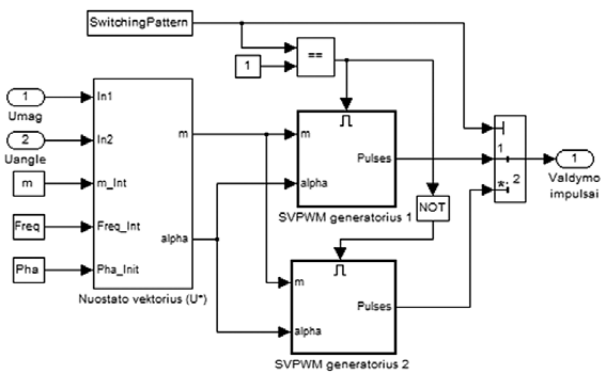
Parametras	Vertė
$P_n$ , kW	4
$U_{1f}$ , V	400
$f$ , Hz	50
$n$ , aps./min	2890
$I_n$ , A	8,5
$M_n$ , N·m	13,21
$\eta$ , %	81
$\cos \varphi$	0,88
$J$ , kg·m <sup>2</sup>	0,007

## Dažninės asinchroninės pavaros kompiuterinis modelis

Naudojant *Matlab Simulink* programinį paketą, buvo sudaryti skaliarinio būdu valdomi dažninės asinchroninės pavaros kompiuteriniai modeliai. Dalis naudojamų elementų yra standartiniai, t. y. paimti iš *Simulink* bibliotekos ir pririnkti pakoreguoti, siekiant sukurti greičio reguliavimo sistemos modelį.

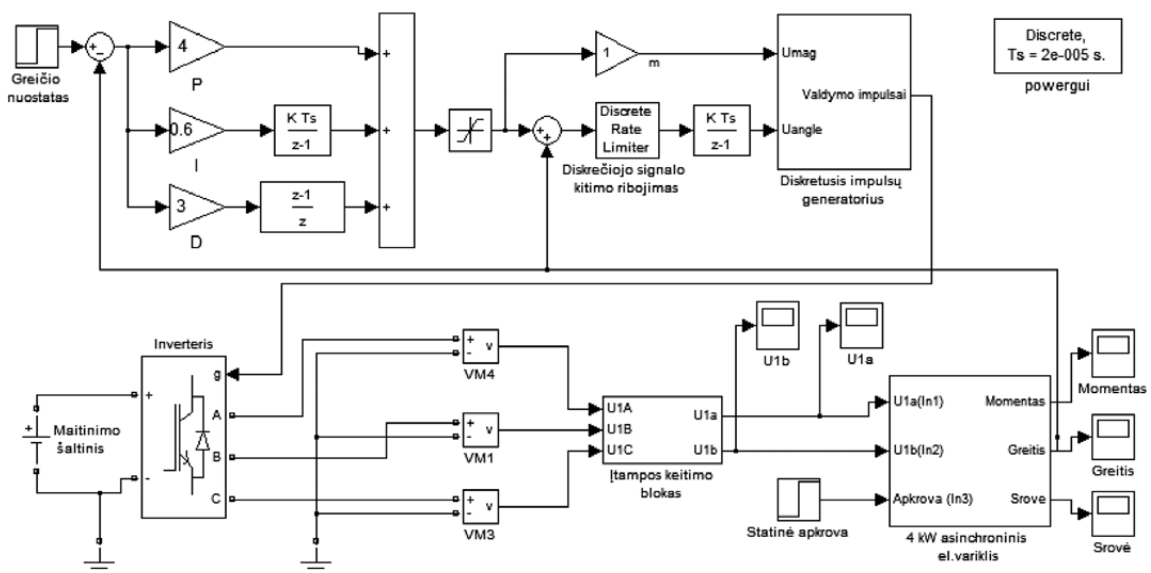
Dažninės pavaros kompiuterinis modelis su erdvinio vektoriaus impulsų pločio moduliacija pateiktas 3 pav. Modelio sudarymo tikslas – išanalizuoti pavaros, maitinamos erdvinio vektoriaus principu valdomu inverteriu, dinamines charakteristikas. Erdvinio vektoriaus impulsų pločio moduliacijos principu valdomas *IGBT* inverteris išėjime formuoja sinusinės formos įtampas.

Impulsų generavimo funkciniam bloke yra sudėtingi vidinių elementų loginiai ryšiai. Funkcinio bloko struktūra ir funkciniai elementų ryšiai pateikti 2 pav.



2 pav. Erdvinio įtampas vektoriaus impulsų generatoriaus funkcinis blokas

Fig. 2. Subsystem of voltage space vector PWM generator



3 pav. Skaliarinio valdymo dažninės asinchroninės pavaros kompiuterinis modelis

Fig. 3. Model of scalar controlled variable frequency drive

## Imitacijos rezultatai

Dažninės pavaros dinaminės charakteristikos gautos sudarytu skaliarinio valdymo pavaros kompiuteriniu modeliu, pateiktu 3 pav. Variklį apkraunant ir sumažinant apkrovą, variklio sukimosi greitis sumažėja. Šiuo atveju jo sukimosi greičiui palaikyti naudojamas greičio grįžtamasis ryšys, o paklaidos signalas perduodamas į diskretųjį PI arba PID reguliatorių. Variklio statinis apkrovos momentas  $M_a$  keičiamas nuo 10 iki 20 N·m. Prijungus apkrovą greitis turi būti kuo greičiau atstatytas ir su kuo mažesne paklaida. Tikslumas pasiekiamas parenkant reguliatoriaus  $K_p$ ,  $K_I$  ir  $K_D$  koeficientų vertes.

4 pav. pateiktas variklio elektromagnetinio momento pereinamasis vyksmas, kai variklio greitis  $\omega = 157$  rad/s. Laiku  $t = 0,15$  s variklis apkraunamas statine apkrova, kuri lygi  $M_a = 10$  N·m. Pereinamajam vyksmui stabilizuoti naudojamas PID reguliatorius. Momentas nusistovėjusią vertę pasiekia per 0,07 s.

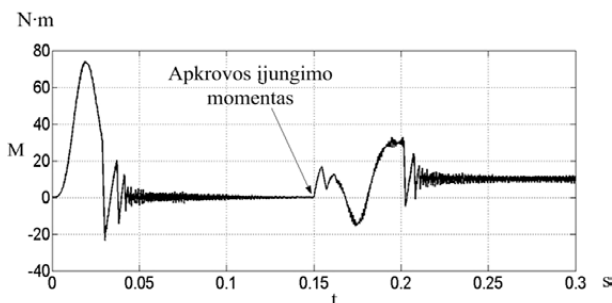
5 pav. pavaizduotas variklio greičio pereinamasis vyksmas. Čia greičio nuostatas –  $\omega = 157$  rad/s. Iš charakteristikos matyti, kad variklis nuostatą pasiekia mažiau nei per 0,05 s, o laiku  $t = 0,15$  s variklis apkraunamas statine apkrova, lygia  $M_a = 10$  N·m. Apkrovus variklį pereinamojo vyksmo charakteristikoje matoma maždaug 0,02 s delsa, kuri atsiranda dėl variklio inercijos. Įjungus apkrovą greitis nusistovėjusią vertę pasiekia per 0,07 s. Pereinamajam vyksmui stabilizuoti naudojamas PI tipo reguliatorius.

6 pav. pateiktas variklio statoriaus A fazės srovės pereinamasis vyksmas, kai variklio greitis  $\omega = 157$  rad/s, o laiku  $t = 0,15$  s variklis apkraunamas statine apkrova  $M_a = 10$  N·m. Pereinamajam vyksmui stabilizuoti naudojamas PI reguliatorius.

7 pav. pateiktas variklio elektromagnetinio momento pereinamasis vyksmas, kai variklio greitis  $\omega = 270$  rad/s. Laiku  $t = 1$  s variklis apkraunamas statine apkrova, kuri lygi  $M_a = 13$  N·m. Pereinamajam vyksmui stabilizuoti naudojamas PID reguliatorius. Momentas nusistovėjusią vertę pasiekia per 0,2 s.

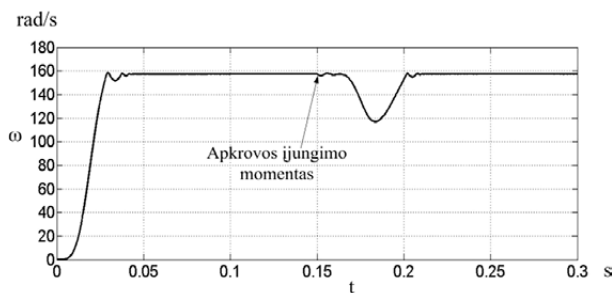
8 pav. pavaizduotas variklio greičio pereinamasis vyksmas, čia greičio nuostatas –  $\omega = 270$  rad/s.

Iš charakteristikos matyti, kad variklis nuostatą pasiekia mažiau nei per 0,5 s, o laiku  $t = 1$  s variklis apkraunamas statine apkrova, kuri lygi  $M_a = 13$  N·m. Įjungus apkrovą greitis stabilizuojamas trumpiau nei per 0,1 s. Čia naudojamas PID tipo reguliatorius.



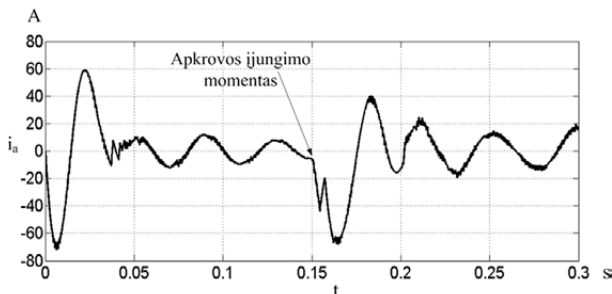
4 pav. Elektromagnetinio momento pereinamojo vyksmo charakteristika, kai  $K_p = 1,6$ ,  $K_I = 0,2$ ,  $K_D = 4$

Fig. 4. Transients of induction motor torque, when  $K_p = 1.6$ ,  $K_I = 0.2$ ,  $K_D = 4$



5 pav. Greičio pereinamojo vyksmo charakteristika, kai  $K_p = 0,8$ ,  $K_I = 0,5$

Fig. 5. Transients of rotor speed, when  $K_p = 0.8$ ,  $K_I = 0.5$

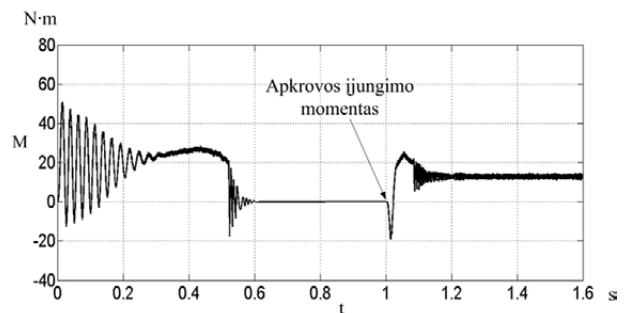


6 pav. Statoriaus srovės pereinamojo vyksmo charakteristika, kai  $K_p = 0,8$ ,  $K_I = 0,5$

Fig. 6. Transients of stator phase A current, when  $K_p = 0.8$ ,  $K_I = 0.5$

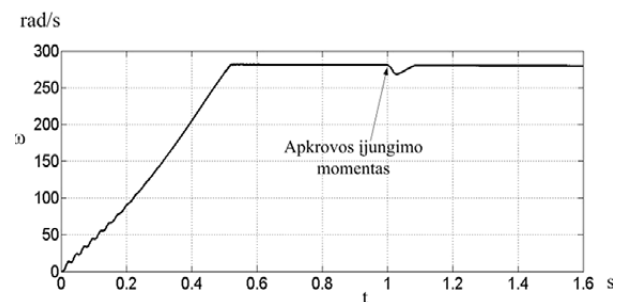
9 pav. pavaizduotas variklio statoriaus fazės A srovės pereinamasis vyksmas, kai variklis paleidžiamas be apkrovos ir laiku  $t = 1$  s įjungiama statinė apkrova  $M_a = 13$  N·m. Iš pateiktos charakteristikos matyti, kad apkrauto variklio apvija teka 20 A srovė, o paleidimo ir apkrovimo metu ji siekia beveik 80 A. Čia greičio nuostatas yra  $\omega = 270$  rad/s.

10 pav. pateiktas elektromagnetinio momento pereinamasis vyksmas, kai variklio greitis  $\omega = 270$  rad/s. Laiku  $t = 1$  s variklis apkraunamas statine apkrova, kuri lygi  $M_a = 20$  N·m. Iš charakteristikos matyti, kad padidinus apkrovą elektromagnetinis momentas nusistovėjusią vertę pasiekia per 0,3 s. Pereinamasis vyksmas stabilizuojamas PID reguliatoriumi.



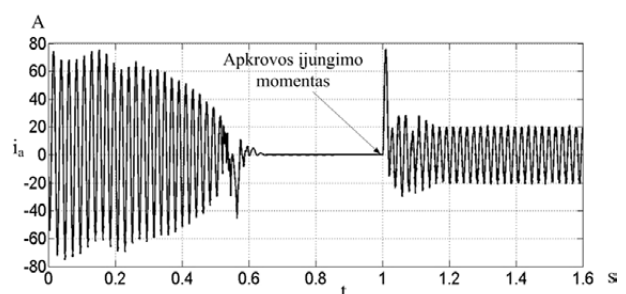
7 pav. Elektromagnetinio momento pereinamojo vyksmo charakteristika, kai  $K_p = 4$ ,  $K_I = 0,6$ ,  $K_D = 2$

Fig. 7. Transients of induction motor torque, when  $K_p = 4$ ,  $K_I = 0.6$ ,  $K_D = 2$



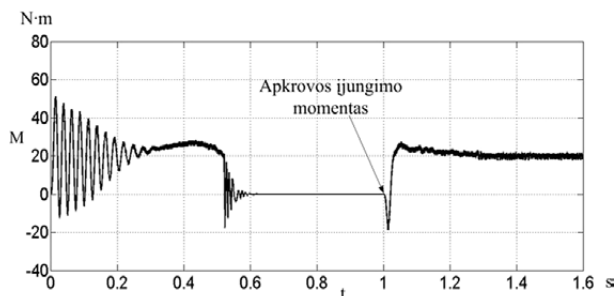
8 pav. Greičio pereinamojo vyksmo charakteristika, kai  $K_p = 4$ ,  $K_I = 0,6$ ,  $K_D = 2$

Fig. 8. Transients of rotor speed, when  $K_p = 4$ ,  $K_I = 0.6$ ,  $K_D = 2$



9 pav. Statoriaus srovės pereinamojo vyksmo charakteristika, kai  $K_p = 4$ ,  $K_I = 0,6$ ,  $K_D = 2$

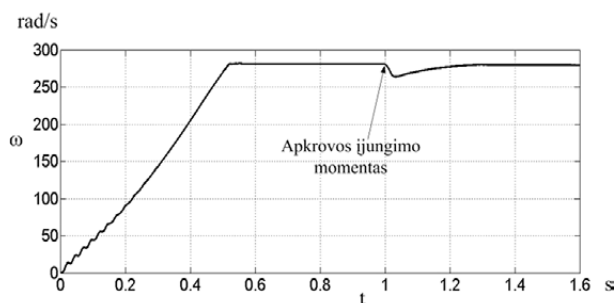
Fig. 9. Transients of stator phase A current, when  $K_p = 4$ ,  $K_I = 0.6$ ,  $K_D = 2$



10 pav. Elektromagnetinio momento pereinamojo vyksmo charakteristika, kai  $K_P = 4$ ,  $K_I = 0,6$ ,  $K_D = 2$

Fig. 10. Transients of induction motor torque, when  $K_P = 4$ ,  $K_I = 0,6$ ,  $K_D = 2$

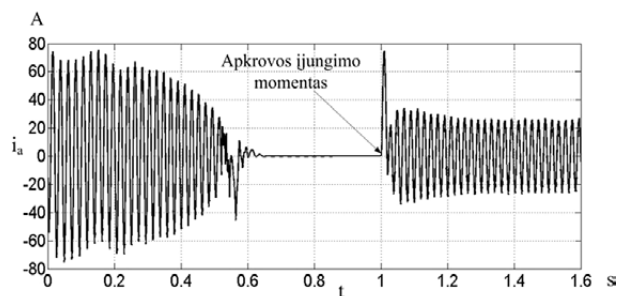
11 pav. pavaizduotas variklio greičio pereinamasis vyksmas, kur greičio nuostatas –  $\omega = 270$  rad/s. Iš pereinamojo vyksmo charakteristikos matyti, kad variklis greičio nuostatą pasiekia greičiau nei per 0,5 s. Laiku  $t = 1$  s variklis apkraunamas statine apkrova, lygia  $M_a = 13$  N·m. Įjungus apkrovą greitis staigiai sumažėja, tačiau stabilizuojamas greičiau nei per 0,3 s. Čia naudojamas PID tipo reguliatorius.



11 pav. Greičio pereinamojo vyksmo charakteristika, kai  $K_P = 4$ ,  $K_I = 0,6$ ,  $K_D = 2$

Fig. 11. Transients of rotor speed, when  $K_P = 4$ ,  $K_I = 0,6$ ,  $K_D = 2$

12 pav. pavaizduotas variklio statoriaus fazės A srovės pereinamasis vyksmas. Čia pateikta charakteristika, kai variklis paleidžiamas be apkrovos ir laiku  $t = 1$  s įjungiamas statinė apkrova, kuri 1,5 karto didesnė už nominaliąją ir lygi  $M_a = 20$  N·m. Šio bandymo metu greičio nuostatas –  $\omega = 270$  rad/s. Iš pateiktos charakteristikos matyti, kad apkrauto variklio apvija teka apie 23 A srovė, o paleidimo ir apkrovimo metu ji siekia beveik 78 A. Šis bandymas tik imitacinio pobūdžio, todėl praktiškai jo kartoti nepatartina, nes bus sugadintas variklis.



12 pav. Statoriaus srovės pereinamojo vyksmo charakteristika, kai  $K_P = 4$ ,  $K_I = 0,6$ ,  $K_D = 2$

Fig. 12. Transients of stator phase A current, when  $K_P = 4$ ,  $K_I = 0,6$ ,  $K_D = 2$

## Išvados

1. Sudarytas uždarnosios dažninės elektros pavaros, kuriai valdyti pritaikytas erdvinio vektoriaus impulsų pločio moduliacijos metodas, kompiuterinis modelis sistemos dinamiškai tirti.
2. Ištirtas dažninės pavaros greičio reguliavimas kintant greičio nuostato signalui, PID reguliatoriaus koeficientams ir statinės apkrovos dydžiui.
3. Pastebėta, kad nuostato signalui atkurti didžiausią įtaką turi PID reguliatoriaus stiprinimo koeficientas (proporcinė dedamoji  $K_P$ ) ir integralinė dedamoji ( $K_I$ ).
4. Didinant proporcingojo reguliatoriaus P stiprinimo koeficientą, mažėja statinė paklaida, o integralinės dedamosios (I) didinimas stiprina sistemos švytavimus.
5. Paleidimo metu variklio momentas siekia 75 N·m vertę, kai greičio nuostatas yra 157 rad/s, ir 50 N·m vertę, kai nuostatas 270 rad/s. Pirmuoju atveju nominalusis variklio momentas viršijamas 5,7 karto, o antruoju – beveik 4 kartus.
6. Kai greičio nuostatas 157 rad/s, greičio pereinamojo vyksmo trukmė – 0,04 s, o kai greičio nuostatas 270 rad/s – 0,5 s.
7. Apkrovos įtaka variklio sukimosi greičiui yra didesnė mažų greičių srityje.
8. Atlikta statinės apkrovos įtakos analizė greičio atkūrimo trukmei rodo, kad greičio pereinamasis procesas nusistovi su neviršijančia 3 % statine paklaida arba be paklaidos.

## Literatūra

- Ali, K. A. M.; Abozaed, M. E. S. 2010. Microcontroller based variable frequency power inverter, in *Proc. of the International Multiconference of Engineers and Computer Scientists IMECS, Hong Kong, Kinija, 2010*. Hong Kong: Newswood Limited, 1258–1261.

- Al-Jufout, S.; Khandakji, K. 2008. Dynamic simulation of starting and chopper speed control of wound-rotor induction motor, *International Journal of Simulation* 2(8):1–7.
- Batkauskas, V. 2010. *Dažninių elektros pavarų dinaminiai modeliai*: daktaro disertacija. Vilnius: Technika. 96 p.
- Baškys, A.; Gobis, V.; Zlosnikas, V.; Augustinas, D.; Košur, V.; Dervinis, A.; Bleizgys, V. 2007. Dažnio keitiklių tyrimo stendas, iš *Puslaidininkų fizikos instituto mokslinės konferencijos darbai*, 125–128.
- Baškys, A.; Gobis, V.; Zlosnikas, V.; Augustinas, D.; Košur, V.; Dervinis, A.; Bleizgys, V.; Platakis, A. 2008. Specializuotas dažnio keitiklis, iš *Puslaidininkų fizikos instituto mokslinės konferencijos darbai*, 141–144.
- Chikkegowda, N. H. 2007. *Space Vector PWM Sequence and Harmonic Comparison for High Power Current Source Rectifier*: Dissertation. Ryerson University. Toronto. 172 p.
- Emmanuel, D.; Jean-Paul, L.; Romeo, O. 2001. Modelling and control of induction motors, *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science* 1(11): 105–159.
- Petrovas, A.; Rinkevičienė, R. 2009. Model of vector controlled induction drive, *Mechatronic Systems and Materials* 10(4028): 149–154.
- Rinkevičienė R., Lissauskas S. 2003. Tiesiaiegių mechatroninių sistemų modeliai, *Elektronika ir elektrotechnika* 4(46): 69–73.
- Rinkevičienė R.; Petrovas A. 2008. *Mechatroninių sistemų modeliavimas*: mokojoji knyga. Vilnius: Technika. 165 p.

## **SIMULATION OF FREQUENCY CONTROLLED ELECTRIC DRIVE USING SCALAR CONTROL METHOD**

**J. Kriauciūnas, L. Kerpė**

### **Abstract**

This paper presents scalar controlled induction motor model and analysis of dynamic characteristics. The paper considers the closed loop electric drive system with proportional-integral-derivative (PID) regulator. The model of AC drive is presented in synchronous reference frame. Simulation of the proposed system is considered with different speed reference and load signals, also with different PID regulator parameters (coefficients  $K_p$ ,  $K_I$ ,  $K_D$ ). The selected and tuned regulator significantly decreased speed transient time, and after loading restored it to the reference signal.

**Keywords:** frequency controlled drive, scalar control, simulation model.