

IMITACINIS ELEKTRONIŠKAI KOMUTUOJAMOS NUOLATINĖS SROVĖS PAVAROS MODELIS

Aurelijus Pitrenas

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
El. paštas aurelijus.pitrenas@gmail.com

Santrauka. Straipsnyje analizuojamas elektroniškai komutuojamų nuolatinės srovės variklių veikimas ir valdymas, išnagrinėtas nuolatinės srovės pavaros matematinis modelis. *Matlab Simulink* terpėje sukurtas ir ištirtas elektroniškai komutuojamos pavaros imitacinis modelis. Naudojant sudarytą imitacinį modelį gautos pereinamųjų vyksmų kreivės yra idealizuotos, tačiau gaunamos jų parametrų vertės yra artimos gamintojo pateiktiems kataloginiams duomenims. Modelis pasižymi didele greita-veika, t. y. laikas, per kurį įvykdoma imitacija, yra trumpas.

Reikšminiai žodžiai: elektroniškai komutuojamas nuolatinės srovės variklis, imitacinis modelis, matematinis modelis, *Matlab Simulink*.

Įvadas

Pagrindiniai mechatroninės sistemos elementai yra įvairių rūšių elektros varikliai. Kolektoirinių nuolatinės srovės variklių charakteristikos yra tiesinės, jų paprastas valdymas, jie atitinka pavaroms keliamus reikalavimus, tačiau turi ir trūkumų – jų mechaninio komutatoriaus šepečiai susidėvi ir juos būtina keisti. Mechaninis komutatorius taip pat turi nepageidaujamų šalutinių veiksnių – kibirkščiuoja, kelia triukšmą, skleidžia dylančių šepečių dulkes.

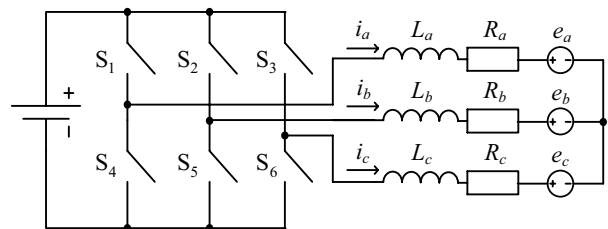
Elektroniškai komutuojami (EK) nuolatinės srovės varikliai turi daug pranašumų, lyginant su kolektoiriais nuolatinės srovės varikliais:

- geresnės greičio ir momento charakteristikos;
- aukštas naudingumo koeficientas;
- ilgas naudojimo laikas;
- tylus darbas;
- platesnis greičių diapazonas;
- didesnis kuriamo momento ir paties variklio dydžio santykis (Yedamale 2003).

Dėl šių priežasčių EK varikliai taikomi vis plačiau, o tai skatina tobulinti valdiklius bei tirti EK variklių valdymą. Valdymui tirti tikslinga sukurti patikimą imitacinį pavaros modelį.

Elektroniškai komutuojamų variklių modeliai

EK variklio su simetriškais žvaigžde sujungtomis apvijomis atstojamoji schema pateikta 1 pav. EK varikliai dažniausiai jungiami prie trifazio tiltelio, sudaryto iš šešių lauko tranzistorių ar IGBT modulių (1 pav. jungikliai S_1 – S_6).



1 pav. Elektroniškai komutuojamo variklio atstojamoji schema
Fig. 1. Equivalent circuit of BLDC motor

Variklio su simetrinėmis žvaigžde sujungtomis apvijomis fazinių įtampų lygtys yra tokios (Ganesh *et al.* 2009):

$$U_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + M_{ab} \frac{di_a}{dt} + M_{ac} \frac{di_a}{dt} + e_a, \quad (1)$$

$$U_b = R_b i_b + L_b \frac{di_b}{dt} + M_{ba} \frac{di_b}{dt} + M_{bc} \frac{di_b}{dt} + e_b, \quad (2)$$

$$U_c = R_c i_c + L_c \frac{di_c}{dt} + M_{ca} \frac{di_c}{dt} + M_{cb} \frac{di_c}{dt} + e_c, \quad (3)$$

čia $e_i = K_{ei} \omega_m$ – trapecinės formos fazinė elektrovara; K_{ei} – fazinės elektrovaros konstanta; $i = a, b, c$ – fazė.

EK variklio matematinis modelis gali būti užrašytas matriciniu pavidalu:

$$\begin{pmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_b & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_c \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Tarus, kad elektroniškai komutuojamo nuolatinės srovės variklio statoriaus induktyvumas nepriklauso nuo rotoriaus padėties, gaunama: $L_a = L_b = L_c = L$. Jei sistema yra subalansuota, visų apvijų varžos yra lygios (Pragasen, Ramu 1989):

$$R_a = R_b = R_c = R. \quad (5)$$

Kai kurie EK variklių gamintojai savo kataloguose nepateikia variklio apvijų abipusio induktyvumo. Tokiu atveju (5) išraišką galima supaprastinti tarus, kad $M = 0$:

$$\begin{pmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Elektromagnetinis momentas išreiškiamas inercija, trintimi bei apkrova (Luk, Lee 1994):

$$T_{em} = \frac{1}{\omega_m} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c), \quad (7)$$

$$T_{em} = J \frac{d}{dt} \omega_m + \beta \omega_m + T_L, \quad (8)$$

čia J – inercijos momentas; T_L – apkrova; β – klampiosios trinties konstanta.

Laikantis prielaidos, kad fazinės elektrovaros forma yra trapecinė, maksimali jos vertė randama taip:

$$E_n = (Bl)N = N(Blr\omega) = N\Phi\omega = \lambda\omega, \quad (9)$$

čia B – magnetinio srauto tankis; L – rotoriaus ilgis; N – apskukų per fazę skaičius; ω – kampinis greitis rad/s, $\Phi = Blr$ – magnetinis srautas; $\lambda = \Phi N$.

$$\frac{d\theta}{dt} = \left(\frac{P}{2}\right)\omega, \quad (10)$$

čia P – variklio polių skaičius.

Indukuotas elektrovaras galima aprašyti taip:

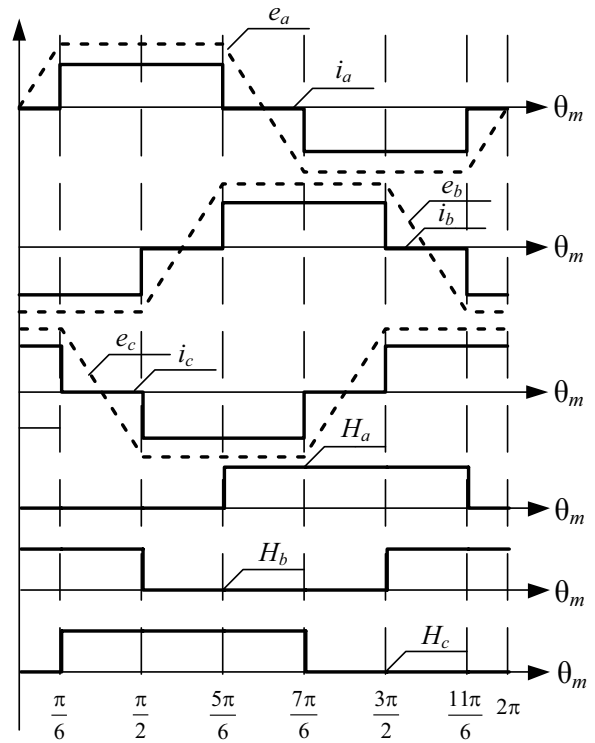
$$E_n = f_n(\theta)\lambda\omega, \quad (11)$$

čia n – fazė; $f_n(\theta)$ – funkcija, turinti indukuotos elektrovaros formą, jos vertės kinta nuo -1 iki $+1$.

Realiu atveju fazinės elektrovaros neturi stačių kampų, tačiau, imituojant variklio pereinamuosius vyksmus, to nepaisoma. Reikiamos formos netiesines funkcijas galima atvaizduoti keliomis tiesinėmis funkcijomis (2 pav.). Iš šio paveikslėlio matyti, kad visų trijų elektrovarų fazės tarpusavyje skiriasi 120° .

EK varikliai dirba dviejų įjungtų apvijų režimu, t. y. dvi didžiausią sukimo momentą sukuriančios apvijos prijungiamos prie maitinimo šaltinio, o trečioji apvija būna atjungta. Rotoriaus padėtis nusako, kurios dvi apvijos turi būti prijungtos.

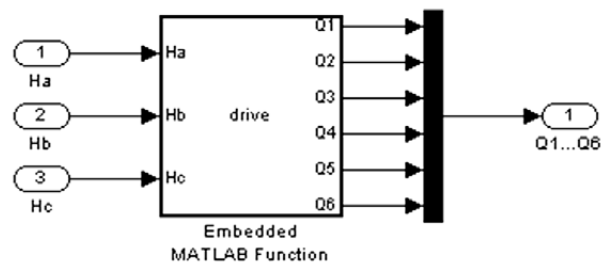
Rotoriaus padėtis gali būti nustatoma pagal Halo jutiklių signalus arba matuojant fazinę elektrovarą atjungtoje apvijoje. 2 pav. pateikti EK trifazio žvaigžde sujungto variklio apvijų srovės ir Halo jutiklių signalai idealiuoju atveju (Sathyan *et al.* 2009).



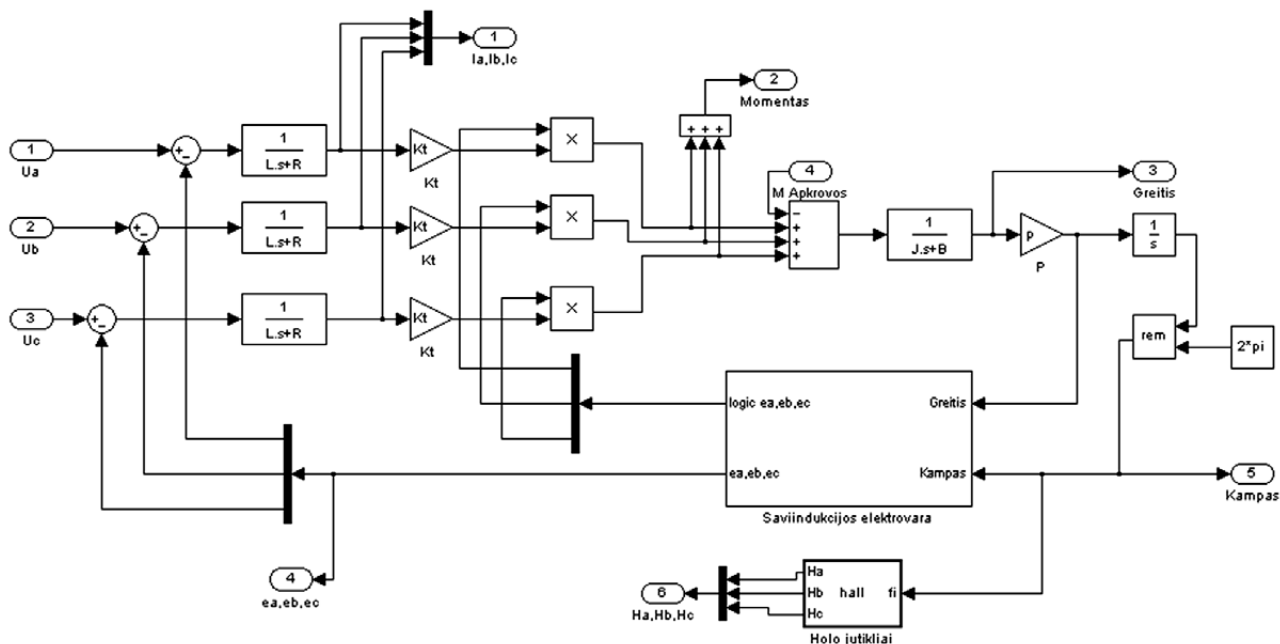
2 pav. Apvijų srovių, elektrovarų ir Halo jutiklių diagrama
Fig. 2. Phase currents, back-emf and Hall sensor signals

Sudarytas EK variklio modelis Matlab/Simulink aplinkoje pateiktas 4 pav. Galios grandinė Matlab/Simulink programiniame pakete sudaryta iš idealių jungiklių ir konstantų. Tai atitinka idealųjį atvejį.

Valdymo signalus keitiklis gauna iš valdiklio bloko, parodyto 3 pav. Valdiklis sudarytas naudojant Matlab M funkcijos bloką. Naudojant šį bloką būtina sudaryti funkciją, kuri pagal rotoriaus padėtį formuoja keitikliui valdy-



3 pav. Valdiklio blokas
Fig. 3. Controller block



4 pav. Elektroniskai komutuojamo variklio imitacinis modelis

Fig. 4. BLDC motor model in Matlab/Simulink

mo signalus. Rotoriaus padėtis nustatoma matuojant Holo jutiklių būsenas. Sudaryti tokią funkciją galima keliais skirtingais būdais. Tyrimo metu ši funkcija buvo sudaryta naudojant *if* ir *else* būsenų sąlygas. Jos formuojami signalai pateikti 1 lentelėje.

1 lentelė. Keitiklio valdymo signalų formavimas

Table 1. Inverter driving signals

Įėjimai			Išėjimai					
H_a	H_b	H_c	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
1	0	0	1	0	0	0	0	1
1	1	0	0	0	1	0	0	1
0	1	0	0	1	1	0	0	0
0	1	1	0	1	0	0	1	0
0	0	1	0	0	0	1	1	0
1	0	1	1	0	0	1	0	0

Analogiškai sudaromas Holo jutiklių blokas, kuriame formuojami rotoriaus padėties nusakantys Holo jutiklių signalai.

Imitavimo rezultatai

Naudojant sudarytą kompiuterinį modelį buvo imituojami Maxon firmos, EC-4 pole 22 BL A serijos EK variklio pereinamieji vyksmai. Pagrindiniai variklio parametrai pateikiami 2 lentelėje.

Imitacijos metu variklis laiku $t = 0,01$ s buvo apkrautas maksimaliu ilgalaikiu apkrovos momentu $M_{apkr} = 51,1$ mN·m.

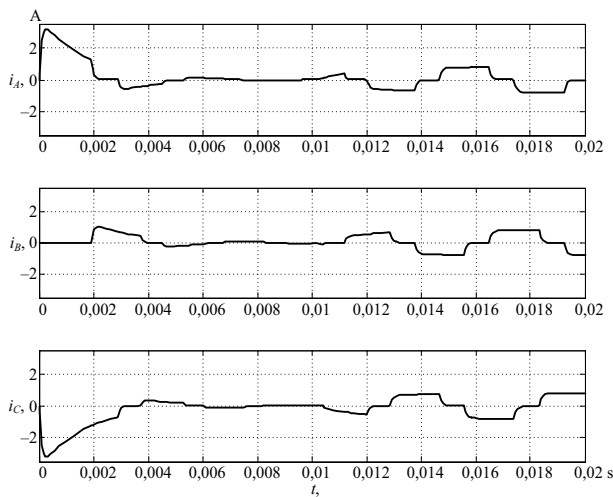
2 lentelė. Variklio kataloginiai parametrai

Table 2. BLDC motor parameters

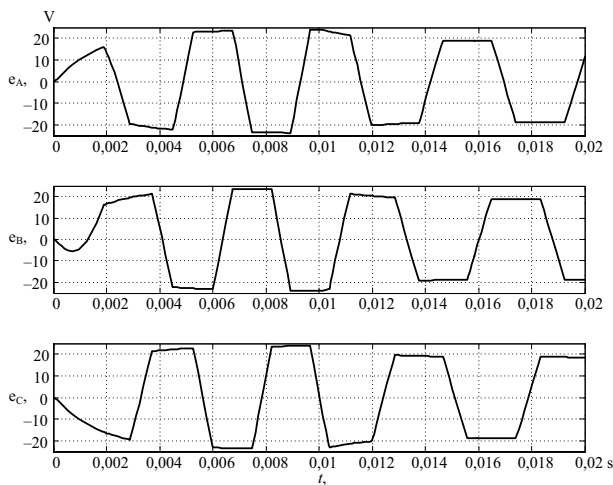
Eil. Nr.	Parametras	Vertė	Vienetai
1	Veleno galia	90	W
2	Vardinė įtampa	48	V
3	Statoriaus apvijų varža	13,5	Ω
4	Statoriaus apvijų induktyvumas	1110	μH
5	Tuščiosios veikos greitis	6900	aps./min
6	Sukimosi greičio pastovioji	145,0	aps./min/V
7	Rotoriaus inercijos momentas	5,54	$g \cdot cm^2$
8	Polių porų skaičius	2	vnt.

Atlikus pasirinkto variklio imitaciją buvo gauti fazinių srovių (5 pav.), fazinių elektrovartų (6 pav.), variklio sukimosi greičio, rotoriaus kampo ir variklio kuriamo momento (7 pav.) pereinamieji vyksmai.

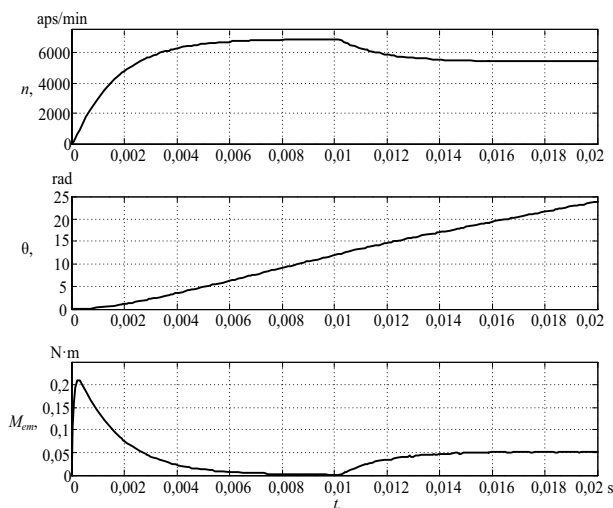
Iš 5 pav. matyti, kad paleidimo momentu neapkrauto variklio srovė pasiekia 3,2 A. Gamintojo pateikiama paleidimo srovė yra 9,85 % didesnė. Apkrauto variklio srovė – 0,794 A, skirtumas nuo gamintojo deklaruojamų parametru neviršija 1 %.



5 pav. Apkrauto variklio fazinių srovių pereinamieji vyksmai
Fig. 5. Motor current characteristics under load condition



6 pav. Apkrauto variklio fazinės elektrovaros
Fig. 6. Back-emf characteristics under load condition



7 pav. Variklio sukimosi greičio, kampo ir momento pereinamieji vyksmai

Fig. 7. Motor speed, angle and torque characteristics under load condition

Iš 6 pav. matyti, kad varikliui dirbant tuščiaja veika, fazinių elektrovarų maksimalios amplitudinės vertės siekia 23,8 V. Apkrovus variklį ir pasibaigus pereinamiesiems vyksmams fazinių elektrovarų dažnis sumažėja, o maksimalios amplitudinės vertės nusistovi ties 19,3 V.

Iš 7 pav. matyti, kad neapkrauto variklio sukimosi greitis nusistovi ties 6918 aps./min, skirtumas nuo gamintojo deklaruojamos vertės sudaro 0,26 %.

Apkrovus variklį jo sukimosi greitis nusistovi ties 5404 aps./min. Gaunamas variklio sukimosi greitis yra 1,4 % didesnis už gamintojo deklaruojamą greitį.

Variklio paleidimo momentas yra 209 mN·m. Paleidimo momentas gaunamas 10,6 % mažesnis už gamintojo deklaruojamą.

Išvados

1. Atlikus tyrimą pastebėta, kad modelio parametų pereinamųjų vyksmų kreivių formos, pvz., variklio fazinių srovių, yra idealizuotos, tačiau gaunamos variklio paleidimo srovės, tuščiosios veikos srovės, maksimalios ilgalaikės srovės, neapkrauto variklio greičio, apkrauto variklio greičio, variklio momento vertės artimos gamintojo pateiktoms kataloginėms vertėms.
2. Gautų parametų ir gamintojo pateiktų verčių skirtumas yra nuo 0,26 % iki 10,6 %. Modelio greitaveika yra didelė, t. y. imitacija įvykdoma labai greitai.
3. Įvertinus visus gautus rezultatus, galima daryti išvadą, kad EK variklių tyrimams taikyti sukurtą modelį yra tikslinga.

Literatūra

- Ganesh, C.; Jeba, S.; Saranya, R.; Geethu, S.; Patnaik, S. K. 2009. A Non-iterative controller design for a BLDC drive system, in *International Conference on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing, Kottayam*, 141–145. <http://dx.doi.org/10.1109/ARTCom.2009.86>
- Yedamale, P. 2003. *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*. Application Note 885. Microchip Technology Inc., Chandler: AZ. 20 p.
- Luk, P. C. K.; Lee, C. K. 1994. Efficient Modeling for a brushless DC motor drive, *IEEE Industrial Electronics, Control and Instrumentation* 1: 188–191.
- Pragasen, P.; Ramu, K. 1989. Modeling, Simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives, Part 2: The brushless DC motor drive, *IEEE Transactions on Industry Applications* 25(2): 274–279. <http://dx.doi.org/10.1109/28.25542>
- Sathyan, A.; Milivojevic, N.; Lee, Y.; Krishnamurthy, M.; Emadi, A. 2009. An FPGA-based novel digital PWM control scheme for BLDC motor drives, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 56(8): 3040–3049. <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2009.2022067>

THE MODEL OF BRUSHLESS DC MOTOR DRIVE

A. Pitrėnas

Abstract

The research considered the operation, control, mathematical and simulation models of BLDC motor. A simplified idealized simulation model was designed and tested using Matlab Simulink software package. The simulation model uses Hall effect sensor signals for determining the rotor position. Simulation was done for Maxon, EC-4 pole 22 BL A series motor. The obtained model testing results deviate from the data supplied by the motor manufacturer by as little as 0.2–10.6%; consequently, the implemented model is suitable for BLDC motor control study and research.

Keywords: BLDC motor control, model of electric drive, simulation model.