

## Tiesiaeigės asinchroninės pavaros modelis

R. Rinkevičienė, A. Petrovas

Automatikos katedra, Vilniaus Gedimino technikos universitetas,  
Naugarduko g. 41, 03227 Vilnius, el. paštas [roma.rinkeviciene@el.vtu.lt](mailto:roma.rinkeviciene@el.vtu.lt)

### Ižanga

Tiesiaeigiais asinchroniniais varikliais (TAV) labai susidomėta iškilus greitaeigio transporto, branduolinės energetikos, metalurgijos ir kitoms problemoms [1]. Palyginus sukamojo judesio pavarą ir pavarą su tiesiaeigiu asinchroniniu varikliu, aiškiai matyti pastarosios pranašumai: mažesnis mechaninių grandžių skaičius, mažesnė inercija dėl sumažėjusios judančių dalių masės, mažesnis nusidėvėjimas [2]. Tačiau dėl didesnio oro tarpo padidėja nuostoliai ir tikslingiausia TAV taikymo sritimi tampa mechanizmai, veikiantys trumpalaikiu ar trumpalaikiu kartotiniu režimu. Veikiant pavarai tokiais režimais, judamosios dalies greitis paprastai nepasiekia nusistovėjusios vertės, todėl ir statoriaus apvijų srovės nepasiekia nusistovėjusių verčių. Pavara dirba dinaminio režimu. Tiriant tokių elektros pavarų charakteristikas, būtina įvertinti elektromagnetinius pereinamuosius procesus elektros variklyje. Straipsnyje nagrinėjamas naujas tiesiaeigio asinchroninio variklio apibendrintasis matematinis modelis, kuriame atsižvelgiama į variklio elektrinę ir magnetinę asimetriją, kurią sukelia atvira magnetinė grandinė.

### Tiesiaeigių asinchroninių variklių dinaminiai modeliai

Pavaros dinamikai tirti automatizuotų elektros pavarų teorijoje bet kuri elektros mašina su  $n$ -faze statoriaus apvija ir  $m$ -faze rotoriaus apvija, esant vienodoms statoriaus ir rotoriaus pilnutinėms varžoms, gali būti pakeista ekvivalentine dvifaze mašina, kuri vadinama apibendrintąja elektros mašina [3,4]. Apibendrintoji elektros mašina yra supaprastintas realios elektros mašinos modelis. Joje neatsižvelgiama į apvijų magnetovarų nesimetriškumą ir magnetinio lauko netolygumą oro tarpe. Analizuojant dinaminį procesą tariama, kad mašinos magnetinė grandinė neišsotina ir magnetinė skvarba yra didelė. Be to, laikoma, kad daugiafazė mašina yra simetrinė, todėl ekvivalentinės dvifazės mašinos fazinių pilnutinės varžos yra lygios [3,4].

Pagal tradiciją trifaziai sukieji ar tiesiaeigiai varikliai modeliuojami transformuojant trifazį variklį į jam ekvivalentų dvifazį ir užrašant lygtis tvirtai susietoje su statoriumi arba rotoriumi, taip pat judančioje koordinatinių sistemose.  $\alpha, \beta$  yra koordinatinių sistema, standžiai susieta su statoriumi,  $d, q$  – sistema, standžiai susieta su rotoriumi,  $u, v$  – koordinatinių sistema, besisukanti greičiu  $\omega_k$  (ar judanti greičiu  $v_k$ ). Jei  $\omega_k$  ( $v_k$ ) yra lygus

magnetinio lauko greičiui  $\omega_{0el}$  ( $v_{0el}$ ), tai tokios koordinatinių sistemos ašys yra  $x, y$ . Straipsniuose [5-9] nagrinėjama elektros pavarų su mažo greičio tiesiaeigiais varikliais, kurių judamasis elementas neišeina už induktoriaus ribų, dinamika. Tokių variklių išilginis kraštų reiškinys yra silpnas ir į jį galima neatsižvelgti. Pagrindu tirti imamos TAV, kaip elektromechaninio energijos keitiklio, dinaminės mechaninės charakteristikos diferencialinės lygtys, užrašytos  $x, y$  koordinatinių sistemoje, judančioje sinchroniniu greičiu  $v_0$ .

Straipsnyje [10] nagrinėjami ir lyginami tiesiaeigių pavarų tyrimo ir modeliavimo rezultatai  $x, y$  ir  $\alpha, \beta$  koordinatinių sistemoje rodo, kad rezultatai nepriklauso nuo koordinatinių sistemos, tačiau  $\alpha, \beta$  koordinatinių sistemoje modelis yra paprastesnis.

Skirtingai negu sukiosiuose varikliuose, TAV magnetolaidis yra baigtinio ilgio. TAV oro tarpe, be slenkamojo magnetinio lauko, egzistuoja pulsuojamasis laukas, kuris judančiame antriniame elemente indukuoja srovės, sukeliančias nuostolius, didinančias fazinių induktyvijas varžas. Šis reiškinys vadinamas išilginiu kraštų efektu. Išilginis kraštų reiškinys labiau pasireiškia galinguose ir greitaeigiuose varikliuose. Atstojamojoje schemoje išilginis kraštų reiškinys įvertinamas papildomomis varžomis, kurios priklauso nuo slydimo. Išilginis kraštų reiškinys gali būti statinis arba dinaminis. Statinis yra tipiškas varikliams su nedideliu polių skaičiumi ( $2p=2, 4$ ). Jo prigimtis yra nesimetrinės pirminio elemento srovės, atsirandančios dėl nesimetrinės (atviros) variklio magnetinės grandinės. Dinaminis kraštų reiškinys susietas su antrinio elemento judesiu.

Straipsnyje nagrinėjamas apibendrintojo pavaros su tiesiaeigiu varikliu modelio sudarymas, kai variklio apvijoms maitinamos simetrine ar nesimetrine įtampa, esant simetrinei ar nesimetrinei variklio magnetinei grandinei, t.y. kai variklio fazinių apvijų aktyviosios bei induktyviosios varžos yra vienodos arba skirtingos.

### Tiesiaeigio asinchroninio variklio diferencialinės lygtys

Tiesiaeigį asinchroninį variklį aprašanti lygčių sistema sudaroma iš statoriaus ir antrinio elemento apvijų įtampų balanso lygčių, pilnutinių magnetinių srautų ir elektromechaninės jėgos išraiškų ir pagrindinės pavaros judesio lygties. Trifazio sukiojo variklio apvijoms užrašytos įtampų balanso lygtys yra [3,4]:

$$\begin{cases} u_A = \frac{d\Psi_A}{dt} + R_A i_A \\ u_B = \frac{d\Psi_B}{dt} + R_B i_B \\ u_C = \frac{d\Psi_C}{dt} + R_C i_C; \\ u_a = \frac{d\Psi_a}{dt} + R_a i_a \\ u_b = \frac{d\Psi_b}{dt} + R_b i_b \\ u_c = \frac{d\Psi_c}{dt} + R_c i_c \end{cases} \quad (1)$$

čia  $u_A, u_B, u_C, u_a, u_b, u_c$  – indukatoriaus ir antrinio elemento fazinių įtampų momentinės vertės [V];  $\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C, \Psi_a, \Psi_b, \Psi_c$  – indukatoriaus ir antrinio elemento pilnutiniai magnetiniai srautai [Wb];  $R_A, R_B, R_C, R_a, R_b, R_c$  – indukatoriaus ir antrinio elemento fazinių apvijų aktyviosios varžos [ $\Omega$ ];  $i_A, i_B, i_C, i_a, i_b, i_c$  – indukatoriaus ir antrinio elemento fazinių srovių momentinės vertės [A].

TAV pilnutiniai apvijų srautai bus gauti iš analogiškų sukiojo variklio pilnutinių srautų, aprašomų lygčių sistema:

$$\begin{cases} \Psi_A = L_A i_A + M_S (i_B + i_C) + M_{SR} i_a \cos \varphi + \\ + M_{SR} [i_b \cos(\varphi + 120^\circ) + i_c \cos(\varphi - 120^\circ)] \\ \Psi_B = L_B i_B + M_S (i_A + i_C) + M_{SR} i_b \cos \varphi + \\ + M_{SR} [i_a \cos(\varphi - 120^\circ) + i_c \cos(\varphi + 120^\circ)] \\ \Psi_C = L_C i_C + M_S (i_A + i_B) + M_{SR} i_c \cos \varphi + \\ + M_{SR} [i_b \cos(\varphi - 120^\circ) + i_a \cos(\varphi + 120^\circ)]; \\ \Psi_a = L_a i_a + M_R (i_b + i_c) + M_{SR} i_A \cos \varphi + \\ + M_{SR} [i_B \cos(\varphi - 120^\circ) + i_C \cos(\varphi + 120^\circ)] \\ \Psi_b = L_b i_b + M_R (i_a + i_c) + M_{SR} i_B \cos \varphi + \\ + M_{SR} [i_A \cos(\varphi + 120^\circ) + i_C \cos(\varphi - 120^\circ)] \\ \Psi_c = L_c i_c + M_R (i_a + i_b) + M_{SR} i_C \cos \varphi + \\ + M_{SR} [i_B \cos(\varphi + 120^\circ) + i_A \cos(\varphi - 120^\circ)] \end{cases} \quad (2)$$

čia  $M_{SR}$  – statoriaus ir rotoriaus ričių abipusis induktyvumas, kai ričių ašys sutampa [H];  $M_S$  ( $M_R$ ) – skirtingų statoriaus (rotoriaus) apvijų ričių abipusis induktyvumas;  $\varphi$  – kampas tarp rotoriaus bei statoriaus ričių ašių elektriniais laipsniais.

Sukiojo variklio kuriamas elektromagnetinis momentas apskaičiuojamas taip:

$$M_{em} = p \frac{\partial W_m}{\partial \varphi} = \frac{p \partial (\Psi_A i_A + \Psi_B i_B + \Psi_C i_C)}{\partial \varphi} + \frac{p \partial (\Psi_a i_a + \Psi_b i_b + \Psi_c i_c)}{\partial \varphi}; \quad (3)$$

čia  $W_m$  – visose variklio apvijose sukaupta magnetinio lauko energija [J];  $p$  – polių porų skaičius.

(3) lygtis rodo, kad elektromagnetinis momentas išreiškiamas apvijų pilnutinių srautų ir tose apvijose tekančių srovių sandaugų dalinių išvestinių pagal posūkio kampą suma. Todėl A fazės apvijai galima užrašyti:

$$\frac{\partial (\Psi_A i_A)}{\partial \varphi} = M_{SR} \left\{ \frac{\partial [i_A i_a \cos \varphi]}{\partial \varphi} + \frac{\partial [i_A i_b \cos(\varphi + 120^\circ)]}{\partial \varphi} \right\} + M_{SR} \frac{\partial [i_A i_c \cos(\varphi - 120^\circ)]}{\partial \varphi}; \quad (4)$$

Apskaičiavus išvestines ir sutvarkius (4) išraišką gaunama:

$$\frac{\partial (\Psi_A i_A)}{\partial \varphi} = -M_{SR} [i_A i_a \sin \varphi + i_A i_b \sin(\varphi + 120^\circ)] - M_{SR} i_A i_c \sin(\varphi - 120^\circ). \quad (5)$$

Visiškai analogiškai galima išreikšti ir kitus (3) išraiškos narius. Tai atlikus ir sugrupavus narius, kurie turi vienodas trigonometrines funkcijas, gaunama:

$$M_{em} = -p M_{SR} [(i_A i_a + i_B i_b + i_C i_c) \sin \varphi - p M_{SR} [(i_A i_b + i_B i_c + i_C i_a) \sin(\varphi + 120^\circ)] - p M_{SR} [(i_A i_c + i_B i_a + i_C i_b) \sin(\varphi - 120^\circ)]. \quad (6)$$

Sukiosios mašinos mechaninį judesį aprašo pagrindinė pavaros judesio lygtis:

$$M_{em} - M_{st} = J \frac{d\omega}{dt}; \quad (7)$$

čia  $M_{em}$  ir  $M_{st}$  – variklio sukuriamas ir statinis pasipriešinimo momentai;  $J$  – pavaros inercijos momentas,  $\omega$  – variklio kampinis sukimosi greitis.

(1)-(7) lygtys aprašo sukiają mašiną. Elektriniai procesai, vykstantys sukiajame bei tiesiaiegiame variklyje, kai neatsižvelgiama į išilginį kraštų reiškinį, yra visiškai vienodi.

Taigi modelis turėtų būti toks, kad tikėtų modeliuoti tiek sukiesiems, tiek tiesiaiegiams varikliams. Tiesiaiegio variklio sukuriama jėga skaičiuojama iš galių ekvivalen-tiškumo sąlygos [11]. Sukiojo variklio sukurtas momentas bei tiesiaiegio variklio sukuriama jėga ir mechaniniai

dydžiai susiję šiomis lygybėmis:  $F_{em} = M_{em} \frac{\pi}{\tau}$ ,  $x = \frac{\tau}{\pi} \varphi$ ;

čia  $F_{em}$  – tiesiaiegio variklio kuriama jėga [N];  $\tau$  – tiesiaiegio variklio poliaus žingsnis [m];  $x$  – antrinio elemento nueitas kelias [m].

Pagrindinė tiesiaieigės pavaros judesio lygtis užrašoma taip:

$$F_{em} - F_{st} = m \frac{d^2 x}{dt^2}; \quad (8)$$

$$\frac{dx}{dt} = v; \quad (9)$$

čia  $F_{st}$  – apkrovos jėga [N];  $m$  – antrinio elemento ir apkrovos masė [kg];  $x$  – antrinio elemento koordinatė [m].

(1), (2), (6) ir (8) lygtys aprašo elektrinius ir mechaninius pavaroje su asinchroniniu varikliu procesus ir sudaro tokios pavaros lygčių sistemą. (2) lygtis turi

harmoniskai kintančius koeficientus, o (6) lygtis yra netiesinė, todėl variklį aprašanti diferencialinių lygčių sistema analiziškai neišsprendžiama ir tenka naudoti skaitmeninius diferencialinių lygčių sprendimo metodus.

### Tiesiaeigės pavaros dinaminio režimų tyrimo programa

Galimi du pavaros lygčių sprendimo būdai: *Simulink* sistemoje sudaryti variklio lygtis sprendžiantį modelį ir *Matlab* sistemoje parašyti variklio lygtis sprendžiančią programą. Abu šie būdai turi savų privalumų ir trūkumų ir yra beveik lygiaverčiai. Čia nagrinėjamas antrasis būdas. Pavaros lygtys yra sprendžiamos skaitmeniniais metodais, taikant *Matlab* programinę įrangą.

Programai *Matlab* programavimo kalba sudaryti pavaros lygčių sistema turi būti užrašyta paprastųjų diferencialinių lygčių pavidalu, kuris apibendrintai atrodo taip:

$$M(t)x' = F(t, x); \quad (10)$$

čia  $M(t)$  – sistemos matrica;  $x'$  – nežinomųjų (diferencialų) vektorius;  $F(t, x)$  – dešinėsios lygybės pusės vektorius.

Užrašant variklio lygtis šiuo pavidalu, reikia iš (2) lygties magnetinių srautų išraiškas įrašyti į įtampų balanso lygtis (1). Tuomet kairioji lygybės pusė užrašoma taip:

$$M(t)x' = \begin{pmatrix} L_A & M_S & M_S & M_{SRC} & M_{SRC+} \\ M_S & L_B & M_S & M_{SRC-} & M_{SRC} \\ M_S & M_S & L_C & M_{SRC+} & M_{SRC-} \\ M_{SRC} & M_{SRC-} & M_{SRC+} & L_a & M_R \\ M_{SRC+} & M_{SRC} & M_{SRC-} & M_R & L_b \\ M_{SRC-} & M_{SRC+} & M_{SRC} & M_R & M_R \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} M_{SRC-} & -M_{SR} \begin{pmatrix} i_a S + i_b S_+ + i_c S_- \\ i_a S_- + i_b S + i_c S_+ \end{pmatrix} & 0 \\ M_{SRC+} & -M_{SR} \begin{pmatrix} i_a S_+ + i_b S_- + i_c S \\ i_a S_+ + i_b S_- + i_c S_+ \end{pmatrix} & 0 \\ M_{SRC} & -M_{SR} \begin{pmatrix} i_a S + i_b S_- + i_c S_+ \\ i_a S_+ + i_b S + i_c S_- \end{pmatrix} & 0 \\ M_R & -M_{SR} \begin{pmatrix} i_a S + i_b S_- + i_c S_+ \\ i_a S_+ + i_b S + i_c S_- \end{pmatrix} & 0 \\ M_R & -M_{SR} \begin{pmatrix} i_a S_+ + i_b S_- + i_c S \\ i_a S_+ + i_b S_- + i_c S_+ \end{pmatrix} & 0 \\ L_c & -M_{SR} \begin{pmatrix} i_a S_- + i_b S_+ + i_c S \\ i_a S_- + i_b S_+ + i_c S \end{pmatrix} & 0 \\ 0 & \tau / \pi & 0 \\ 0 & 0 & m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} di_A / dt \\ di_B / dt \\ di_C / dt \\ di_a / dt \\ di_b / dt \\ di_c / dt \\ dv / dt \\ d^2x / dt^2 \end{pmatrix} \quad (11)$$

(11) sistemos koeficientai apskaičiuojami taip:

$$C = \cos \varphi; \quad C_- = \cos(\varphi - 120^\circ); \quad C_+ = \cos(\varphi + 120^\circ); \\ S = \sin \varphi; \quad S_- = \sin(\varphi - 120^\circ); \quad S_+ = \sin(\varphi + 120^\circ).$$

(10) lygybės dešinioji pusė išreiškiama tokiu vektoriumi:

$$F(t, x) = \begin{pmatrix} U_A - R_A i_A \\ U_B - R_B i_B \\ U_C - R_C i_C \\ U_a - R_a i_a \\ U_b - R_b i_b \\ U_c - R_c i_c \\ v \\ F_{em} - F_{st} \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Panaudojus (10) – (12) išraiškas, sudaroma programa pavaros lygtims spręsti. Sukuriama ir grafinė vartotojo sąsaja, palengvinanti ir supaprastinanti darbą su programa. Programa iškviečiama komandų eilutėje surinkus komandą: variklis\_asin. Kai ši programa paleidžiama be jokių parametrų, ji inicijuoja grafinę sąsają. Variklio parametrų įvedimo langas, pavadintas „Trifazio variklio modelio parametrai“, pavaizduotas 1 pav. Parametrų įvedimo lange visi duomenys sugrupuoti į aštuonias grupes. Visi vienai grupei priklausantys duomenys yra viename kvadrante ir logiškai susiję. Rotoriaus bei statoriaus apvijų aprašančių duomenų grupėse įrašomi statoriaus bei rotoriaus apvijų parametrai, t.y. maitinančios įtampos, aktyviosios varžos bei induktyvumai. Visi dydžiai matuojami SI sistemos vienetais.

Duomenų grupei, pavadintai „Kiti variklio parametrai“, priklauso duomenys, kurie yra vienodi visoms apvijoms, bei mechaninę dalį aprašantys duomenys. Parametrų įvedimo lange galima pasirinkti tiriamą variklio tipą – tiesiaeigį asinchroninį variklį arba sukujį. Tiesiaeigį bei sukujį judėjimą apibūdina skirtingi mechaniniai dydžiai, kurie matuojami skirtingais vienetais. Į tai programoje atsižvelgta. Nurodant modeliuojamo variklio tipą, kinta ir įvedami mechaniniai dydžiai. Pavarai su sukijuojamu varikliu imami tokie duomenys, kaip rotoriaus inercijos momentas bei statinis pasipriešinimo momentas, o poliaus žingsnio įvedimo laukelis tampa neaktyvus. Nurodžius tiesiaeigio variklio tipą, imama antrinio elemento masė, statinė pasipriešinimo jėga ir poliaus žingsnis.

Variklio parametrai įvedami skaitmeninėmis ir simbolinėmis vertėmis. Tai reiškia, kad galima naudoti tiek skaičius, pvz., 15.5, 1e-3 ar pan., tiek konstantas, pvz. pi, 2\*pi/3 ar pan.

Parametrų įvedimo lange yra trys valdymo klavišai. Nuspaudus klavišą „Išsaugoti failą“, visi variklio parametrai įrašomi į failą. Failo pavadinimas ir vieta nurodomi standartiniame operacinės sistemos lange. Svarbu paminėti, kad failas išsaugomas \*.vap plėtiniumi. Iš įrašyto \*.vap failo duomenys skaitomi nuspaudus klavišą „Skaityti iš failo“. Failo vardas ir kelias išrenkami standartiniame operacinės sistemos lange. Galiausiai klavišas „Slėpti parametrų langą“ uždaro parametrų įvedimo langą. Įvedus variklio parametrus, uždaromas parametrų langas ir pereinama prie pagrindinio programos lango. Šiame lange, kurio vaizdas pateiktas 2 pav., yra kelios klavišų grupės. Didžiausioje jų, „Tiriamąjį dydžį“ grupėje, yra klavišai tiriamajam dydžiui pasirinkti. Ši grupė, jei programa naujai paleista, yra neaktyvi. Be šios grupės, yra dar trys programos valdymo klavišai. Pirmasis

**Trifazio variklio modelio parametrai**

Statoriaus A apvija		Statoriaus B apvija		Statoriaus C apvija	
Amplitudė [V]	311	Amplitudė [V]	311	Amplitudė [V]	311
Dažnis [Hz]	50	Dažnis [Hz]	50	Dažnis [Hz]	50
Fazė [rad.]	0	Fazė [rad.]	$-2\pi/3$	Fazė [rad.]	$2\pi/3$
Akt. varža [om]	2.82	Akt. varža [om]	2.82	Akt. varža [om]	2.82
Induktyvumas [Hn]	0.1	Induktyvumas [Hn]	0.1	Induktyvumas [Hn]	0.1

Rotoriaus A apvija		Rotoriaus B apvija		Rotoriaus C apvija	
Amplitudė [V]	0	Amplitudė [V]	0	Amplitudė [V]	0
Dažnis [Hz]	0	Dažnis [Hz]	0	Dažnis [Hz]	0
Fazė [rad.]	0	Fazė [rad.]	0	Fazė [rad.]	0
Akt. varža [om]	50	Akt. varža [om]	50	Akt. varža [om]	50
Induktyvumas [Hn]	0.06	Induktyvumas [Hn]	0.06	Induktyvumas [Hn]	0.06

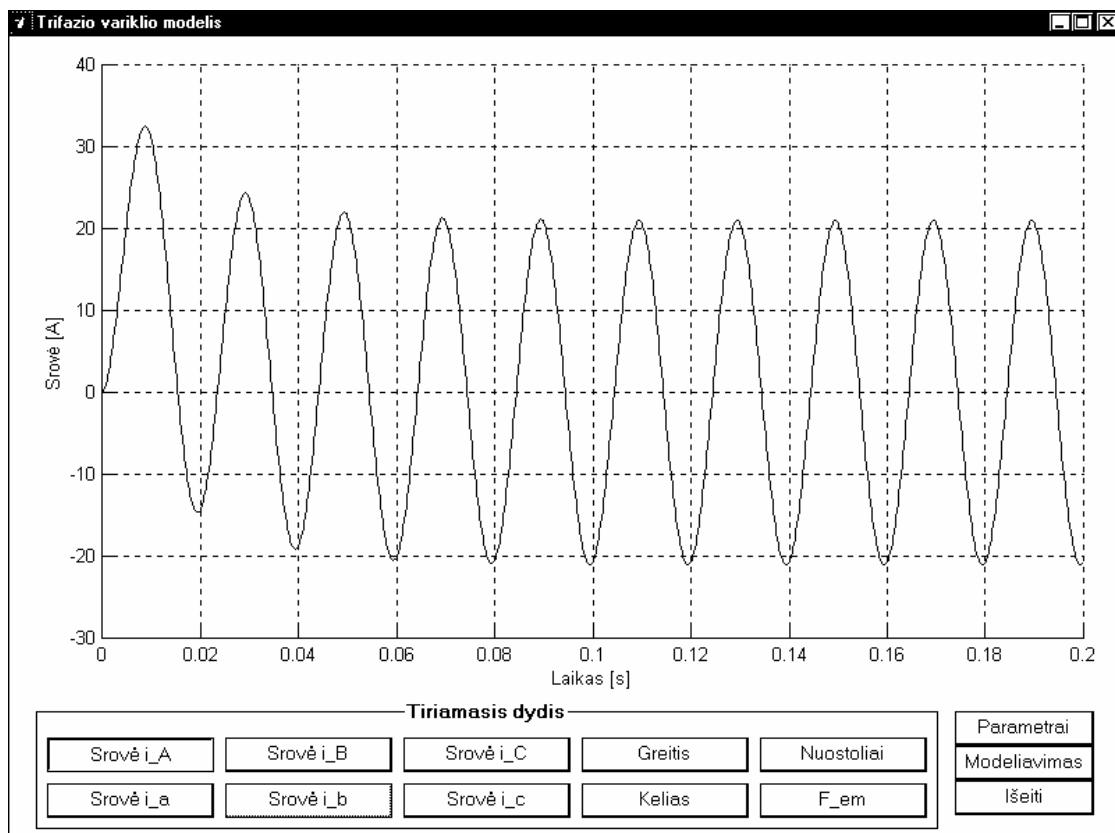
Kiti variklio parametrai	
Abipusis statoriaus apvijų induktyvumas [Hn]	0.0538
Abipusis rotoriaus apvijų induktyvumas [Hn]	0.03
Abipusis rotoriaus ir statoriaus apvijų induktyvumas [Hn]	0.018
Trinties jėga [N]	0
Rotoriaus masė [kg]	2
Polių skaičius	1
Poliaus žingsnis (tik tiesiaieigiems varikliams)	0.06

**Variklio tipas**

Sukusis variklis  
 Tiesiaieigis variklis

1 pav. Parametų įvedimo langas



2 pav. Pagrindinis programos langas

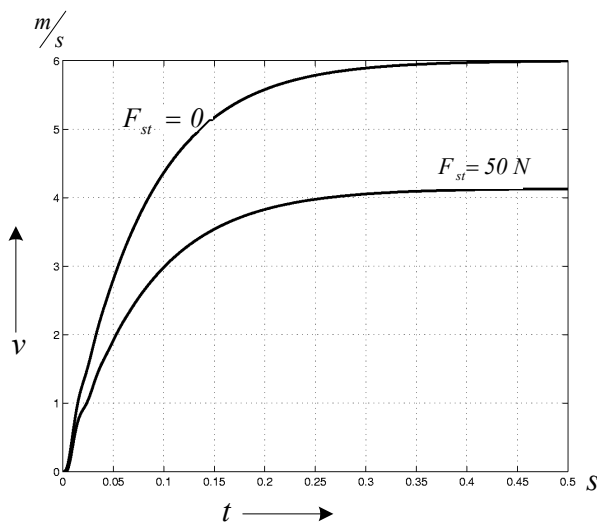
jų – „Parametrai“. Nuspaudus šį klavišą atidaromas, jei buvo uždarytas, arba suaktyvinamas, jei buvo neaktyvus, variklio parametrų įvedimo langas. Kitas klavišas – „Modeliavimas“. Nuspaudus šį klavišą, įvedamas modeliavimo laikas ir pradeda imitacija. Paskutiniojo klavišo „Išeiti“ paskirtis – baigti programą.

Modelis paleidžiamas nuspaudus klavišą „Modeliavimas“. Tuomet atsiranda modeliavimo parametrų įvedimo langas, į kurį įvedamas vienintelis parametras – modeliavimo laiko intervalas.

Prasidėjus imitacijai, atsiradusiame lange atvaizduojama atliktoji užduoties dalis. Šis langas neturi jokių užduoties vykdymo kontrolės elementų. Todėl nutraukti užduoties vykdymą galima tik nutraukus visos „Matlab“ sistemos darbą. Tai yra šios programos trūkumas, kurį būtina pašalinti naujose versijose.

Baigus modeliuoti, grįžtama į pagrindinį programos langą. Dabar tampa aktyvūs ir „Tiriamąjį dydžį“ grupės klavišai. Nuspaudus kurį nors iš jų, lange nubraižomas parametro, užrašyto ant nuspausto klavišo, kitimo laikui bėgant grafikas. Lange, pavaizduotame 2 pav., yra nuspaustas „Srovė A“ klavišas ir nubraižytas A fazės srovės grafikas.

Programos veikimas patikrinamas modeliuojant pavaros su tiesiaiegiu varikliu paleidimo procesus. Variklio parametrai parenkami tokie, kokie yra pateikti 1 pav. Rezultatai pateikti dviem atvejais: variklio paleidimo procesui tuščiosios veikos metu, t.y. kai apkrovos jėga lygi nuliui, ir variklio paleidimo procesui, kai apkrovos jėga nelygi nuliui.



3 pav. Antrinio elemento greičio pereinamieji procesai

Antrinio elemento greičio pereinamieji procesai pateikti 3 pav. Greitis eksponentiškai artėja prie nusistovėjusios vertės. Nusistovėjęs tuščiosios veikos variklio greitis lygus sinchroniniam. Apkrauto variklio, kurio apkrovos jėga lygi 50 N, nusistovėjęs antrinio elemento greitis mažesnis už sinchroninį.

## Išvados

1. Išnagrinėtas naujas apibendrinantis tiesiaiegio elektros variklio modelis, sukurtas atsižvelgiant į variklio magnetinę ir elektrinę asimetriją, kurią sukelia variklio atvira magnetinė grandinė.
2. Sudarytas algoritmas ir programa įgalina tirti elektros pavarų su sukiaisiais ir tiesiaiegiais asinchroniniais varikliais pereinamuosius procesus, esant simetrinėms ar nesimetrinėms maitinimo įtampoms bei fazių kampams tarp jų.
3. Sudaryta programa leidžia tirti tiesiaieigės trifazės elektros pavaros pereinamuosius procesus, atsižvelgiant į tiesiaiegio variklio apvijų nesimetriškumą
4. Sudarytas algoritmas ir programa gerokai palengvina pavaros su varikliu valdymo režimų tyrimą, nes joje koordinatės netransformuojamos.

## Literatūra

1. **Boldea I.** Linear electric actuators and their control: a review // Proceedings of the 10th International Conference European Power and Drives Association PEMC 2002, 9-11 September 2002, Cavtat & Dubrovnik, Croatia. ISBN: 953-184-047-4.– P. 12-19.
2. **Budig P.-K.** The Application of Linear motors. The Third International Power Electronics and Motion Control Conference.–2000.–Vol.3.–P. 1336-1341.
3. **Ключев В.И.** Теория электропривода: Учебник для вузов.–М.: Энергоатомиздат,1985.–560 с.
4. **Копылов И.П.** Электрические машины. - М.: Высшая школа, 2000.–607 с.
5. **Rinkevičienė R.** Elektros pavarų su tiesiniais cilindriniais varikliais dinaminės charakteristikos // Elektrotechnika 17(26): Mokslo darbai. – Kaunas: Technologija, 1992. – P.126-134.
6. **Соколов М. М., Ринкевичене Р. В.** Электромеханические процессы в линейном электроприводе толкателя // Электричество.- 1990.- № 3.- С.75 - 78.
7. **Poška A., Rinkevičienė R., Teišerskas Č.** Tiesiaieigės asinchroninės pavaros skaitmeniniai dinaminiai modeliai// Elektronika ir elektrotechnika. ISSN 1392-1215. – Kaunas: Technologija, 1997.–Nr. 1(10). P. 50-54.
8. **Poška A., Rinkevičienė R., Savickienė Z.** Controlled linear electric drives //Proceedings of the 10th International Conference European Power and Drives Association PEMC 2002, 9-11 September 2002, Cavtat & Dubrovnik, Croatia. ISBN:953-184-047-4, p. 450, issued in CD-ROM.
9. **Poška A., Rinkevičienė R., Teišerskas Č.** Tiesiaieigės elektros pavaros impulsinis valdymas// Elektrotechnika: Mokslo darbai. – Kaunas:Technologija, 1997. –T. 21(30), –P. 137-140.
10. **Rinkevičienė R., Lisauskas S.** Tiesiaiegių mechatroninių sistemų modeliai// Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2003. – Nr. 4(46). –P. 69-73.
11. **Соколов М.М., Сорокин Л.К.** Электропривод с линейными асинхронными двигателями. - Москва: Энергия, 1974. – 136 с.

Pateikta spaudai 2003 09 27

**R. Rinkevičienė, A. Petrovas. Tiesiaieigės asinchroninės pavaros modelis // Elektronika ir elektrotechnika.– Kaunas: Technologija, 2004. – Nr.1(50).– P. 28-33.**

Straipsnyje nagrinėjamas tiesiaieigės asinchroninės pavaros matematinis modelis ir jo pagrindu sukurta programa tiesiaieigių asinchroninių pavarų dinaminiam režimams tirti. Sudarytoji programa leidžia tirti elektros pavarų su sukiaisiais ar tiesiaieigiais asinchroniniais varikliais pereinamuosius procesus, esant simetrinėms ar nesimetrinėms maitinimo įtampoms, vienodiems ar skirtingiems fazinių apvijų parametrų, paleidžiant apkrautą arba neapkrautą variklį. Išvesta formulė variklio sukuriama jėgai ar momentui apskaičiuoti. Į sudarytos programos parametrų įvedimo langą įvedami atskirai kiekvienos statoriaus ir rotorius apvijų (antrinio elemento) parametrai ir maitinimo įtampos parametrai. Skaičiavimo rezultatai: variklio sukuriama jėga, greitis, induktoriaus bei antrinio elemento kiekvienos fazinės apvijų srovės, galios nuostoliai pateikiami grafiniame lange. Il. 3, bibl. 11 (lietuvių kalba; santraukos lietuvių, anglų ir rusų k.)

**R. Rinkevičienė, A. Petrovas. Model of Linear Induction Drive // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2004. – No. 1(50).-P. 28-33.**

The article deals with mathematical model of linear induction drive and a developed program based on that. Developed program gives possibility to investigate transients of electric drives with rotating and linear induction motors at balanced and unbalanced supply voltage and at equal or distinct parameters of phase windings during starting process of motor with load or no-load. Derived formula to calculate developed force or torque is presented. Parameters of every phase winding of stator or rotor (moving element) also parameters of supply voltage are inputs of developed program input window. Calculated results: force developed by linear induction motor, speed, currents of all phase windings of inductor and secondary, power losses are presented in graphical window. Ill. 3, bibl. 11 (in Lithuanian; summaries in Lithuanian, English and Russian).

**Р. Ринкявичене, А. Петровас. Модель линейного асинхронного электропривода // Электроника и электротехника. – Каунас: Технология, 2004. – № 1(50). – С. 28-33.**

В статье рассматривается математическая модель линейного асинхронного электропривода и на этой основе разработанная программа для исследования динамических режимов линейного асинхронного электропривода. Разработанная программа позволяет исследовать переходные процессы электропривода с двигателями линейного и вращательного движения при симметричных и не симметричных напряжениях питания, при одинаковых или разных обмоточных параметрах фазных обмоток. Выведена формула для расчёта развиваемого двигателем момента или силы. В окно для введения параметров вводятся отдельно параметры для каждой из обмоток статора и ротора. Результаты вычислений: электромагнитная сила и скорость, развиваемые прямолинейным асинхронным двигателем, токи в обмотках и потери мощности выдаются в графической форме. Ил. 3, библи. 11 (на литовском языке; рефераты на литовском, английском и русском яз.).