

DVIMASĖ ELEKTROMECHANINĖ SISTEMA SU NERAIŠKIOSIOS LOGIKOS REGULIATORIUMI

Jonas Kriaučiūnas¹, Sigitas Juraitis²

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹jonas.kriauciunas@vgtu.lt; ²sigitas.juraitis@vgtu.lt

Santrauka. Nagrinėjama dvimasė elektromechaninė sistema, kurioje yra galinčių deformuotis grandžių. Dalys, turinčios standumo, sukelia nepageidaujamas virpesius ir švytavimus, todėl būtina ieškoti sprendimų, kaip sumažinti jų įtaką sistemai. Sudarytas uždarnosios dvimasės sistemos su neraiškiosios logikos reguliatoriumi *Simulink* modelis. Variklio modelis sudarytas sinchroniniu greičiu besisukančioje koordinacių sistemoje. Atliktas dvimasės elektromechaninės sistemos imitavimas esant skirtingoms greičio nuostatom. Pateikti sistemos paleidimo proceso imitacijos rezultatai rodo, kad neraiškiosios logikos reguliatorius sumažina tiek variklio, tiek antrosios masės greičio švytavimus.

Reikšminiai žodžiai: dvimasė sistema, elektromechaninė sistema, neraiškioji logika, reguliatorius.

Įvadas

Elektromechaninę sistemą, kaip tyrimų objektą, sudaro elektrinė ir mechaninė dalys. Elektromechaninėje sistemoje būna mechaninių grandžių, kurios vienais atvejais gali būti laikomos absoliučiai standžiomis, kitais – gali deformuotis dėl nepakankamo standumo. Sistemos, kuriose yra galinčių deformuotis grandžių, aprašomos aukštesnių eilių netiesinėmis diferencialinėmis lygtimis, kurių analizinių sprendinių iš esmės nesuprastinus, problemos gauti negalima. Tokiais atvejais sudaromi nagrinėjamos sistemos modeliai ir, naudojant programų paketus, imituojami vyksmai sistemoje. Tokie tyrimai yra supaprastinti, nes nėra antrosios masės grįžtamojo ryšio įtakos varikliui. Sistemos modelis tampa dar sudėtingesnis, jei reikia kompensuoti antrosios masės, apkrovos ir tamprumo įtaką sistemai (Smilgevičius, Rinkevičienė 2005; Smilgevičius *et al.* 2006; Petrovas, Rinkevičienė 2009).

Šiame darbe sudarytas dvimasės sistemos imitacinis modelis su neraiškiosios logikos reguliatoriumi. Pateikiami dvimasės sistemos pereinamieji vyksmai.

Dvimasės sistemos imitacinio modelio sudarymas

Modelį sudaro trys dalys: variklio, antrosios masės ir neraiškiosios logikos reguliatoriaus modeliai.

Variklio modelis sudarytas sinchroniniu greičiu besisukančioje d - q koordinacių sistemoje. Jei būsenos kintamaisiais pasirenkami susietieji srautai, tada asinchroninio variklio įtampų balanso lygtys besisukančioje koordinacių sistemoje (Juraitis *et al.* 2010) gali būti išreikštos taip:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{qs}}{dt} &= U_{1m} \cos \gamma - \omega_e \alpha'_s \psi_{qs} + \omega_e \alpha'_s K_r \psi_{qr} + \omega_e \psi_{ds}; \\ \frac{d\psi_{ds}}{dt} &= U_{1m} \sin \gamma - \omega_e \alpha'_s \psi_{ds} + \omega_e \alpha'_s K_r \psi_{dr} - \omega_e \psi_{qs}; \\ \frac{d\psi_{qr}}{dt} &= -\omega_e \alpha'_r \psi_{qr} + \omega_e \alpha'_r K_s \psi_{qs} + (\omega_e - \omega_r) \psi_{dr}; \\ \frac{d\psi_{dr}}{dt} &= -\omega_e \alpha'_r \psi_{dr} + \omega_e \alpha'_r K_s \psi_{ds} - (\omega_e - \omega_r) \psi_{qr}, \end{aligned} \quad (1)$$

čia ψ_{qs} , ψ_{ds} – pilnutinio statoriaus srauto projekcijos į q , d ašis; ψ_{qr} , ψ_{dr} – pilnutinio rotoriaus srauto projekcijos į q , d ašis; U_{1m} – tinklo fazinės įtampos amplitudinė vertė; γ – tinklo įtampos fazė įjungimo metu; ω_e – vienos polių poros asinchroninio variklio greitis (variklio elektrinis greitis), lygus $\omega_e = 2\pi f$; ω_r – kampinis rotoriaus greitis. Lygčių koeficientai iš variklio parametrų apskaičiuojami taip:

$$\begin{aligned} \alpha_s &= \frac{R_s}{X_s}; & \alpha_r &= \frac{R_r}{X_s}; & \sigma &= 1 - \frac{X_m^2}{X_r X_m}; \\ \alpha'_s &= \frac{\alpha_s}{\sigma}; & \alpha'_r &= \frac{\alpha_r}{\sigma}; \\ K_s &= \frac{X_m}{X_s}; & K_r &= \frac{X_m}{X_r}. \end{aligned}$$

Kiti naudojami žymenys: X_m – įmagnetinimo kontūro induktyvioji varža; $X_s = X_m + X_{ls}$ – statoriaus apvijos pilnutinė induktyvioji varža; $X_r = X_m + X_{lr}$ – rotoriaus apvijos pilnutinė redukuota induktyvioji varža; R_s – aktyvioji statoriaus varža; R_r – rotoriaus apvijos redukuota aktyvioji varža; X_{ls} , X_{lr} – statoriaus ir rotoriaus redukuotos induktyviosios sklaidos varžos.

Variklio momentas M_e apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$M_e = \frac{3}{2} p \frac{\omega_e K_r}{\sigma X_s} (\Psi_{qr} \Psi_{ds} - \Psi_{qs} \Psi_{dr}), \quad (2)$$

čia p – polių porų skaičius.

Pavaros dinamikai tirti užrašoma jos judesio lygtis:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (M_e - M_s), \quad (3)$$

čia M_e ir M_s – variklio sukurtas ir statinis apkrovos momentai, N·m; J – pavaros inercijos momentas, kg·m²; ω – variklio kampinis sukimosi greitis, rad/s.

Rotoriaus kampinio greičio ω išvestinė laike yra rotoriaus posūkio kampas φ :

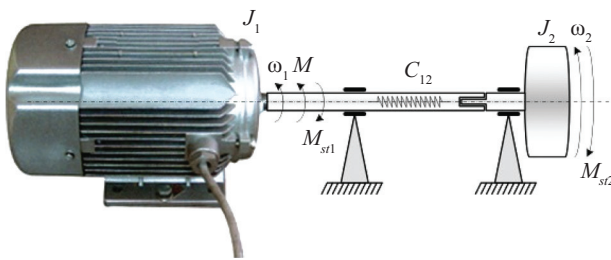
$$\frac{d\omega_r}{dt} = \dot{\varphi}. \quad (4)$$

Dvimasę mechaninę sistemą apibūdina pagrindinės lygtys:

$$\begin{cases} M - M_{st1} - M_{12} = J_1 \frac{d\omega_1}{dt}; \\ -M_{st2} + M_{12} = J_2 \frac{d\omega_2}{dt}, \end{cases} \quad (5)$$

čia M – variklio momentas; M_{12} – tampriosios sąveikos momentas; M_{st1} – pirmosios masės statinis apkrovos momentas; M_{st2} – antrosios masės statinis apkrovos momentas; J_1, J_2 – pirmosios ir antrosios masės inercijos momentai; C_{12} – standumas; ω_1 – pirmosios masės kampinis greitis; ω_2 – antrosios masės kampinis greitis.

Bendruoju atveju dvimasė sistema pavaizduota 1 pav.



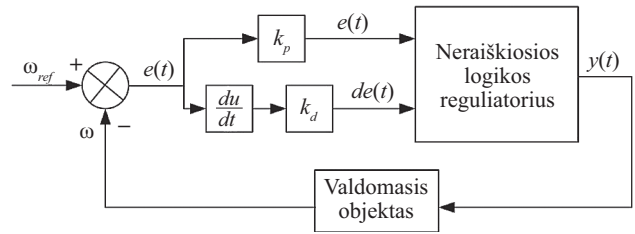
1 pav. Bendroji dvimasė elektromechaninė sistema
Fig. 1. General structure of the two-mass system

Antroji masė pasirenkama laisvai, tai cilindro formos kūnas, pritvirtintas išilgai masių centro. Tai gali būti ir eksperimentiniame stende variklio apkrovai sukurti naudojamo generatoriaus (arba variklio, veikiančio stabdymo režimu) rotoriaus masė (Juraitis *et al.* 2009a, b). Antrosios masės inercijos momentą galima rasti kataloguose.

Neraiškiosios logikos reguliatorius

Pagrindinis valdymo, taikant neraiškiają logiką, privilumas – galimybė valdyti sudėtingas sistemas, panaudojant žmogiškąją patirtį ir protą, nedalyvaujant žmogui (Lisauskas, Rinkevičienė 2010; Chen 2001).

Neraiškiosios logikos reguliatoriaus modelis yra panašus į kitus tradicinių reguliatorių modelius, tačiau išsiskiria iš visų kitų įėjimo ir išėjimo parametrų aprašymo struktūra, taip pat ir pačiu įėjimų transformavimo į išėjimus (sprendinio priėmimo) procesu (Nour *et al.* 2007). 2 pav. pateiktas neraiškiosios logikos reguliatoriaus struktūrinis modelis.



2 pav. Neraiškiosios logikos reguliatoriaus struktūra

Fig. 2. Structure of a fuzzy logic controller

Sudarytas proporcinis diferencialinis Takagi-Sugeno neraiškiosios logikos tipo reguliatorius, kuriame yra du įėjimai ir vienas išėjimas. Įėjimai aprašomi:

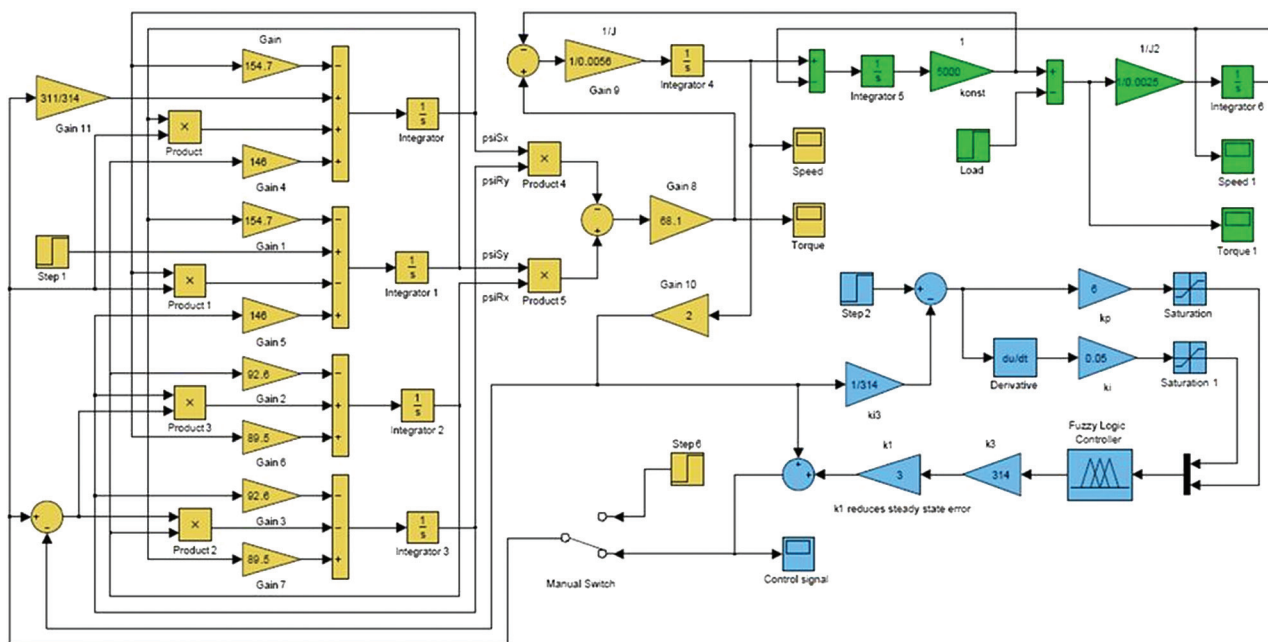
$$\begin{aligned} e(t) &= a - y(t), \\ de(t) &= \dot{a} - \dot{y}(t), \end{aligned} \quad (6)$$

čia $e(t)$ – greičio signalo paklaida; $de(t)$ – greičio signalo paklaidos pokytis; a – nuostatas (ω_{ref}); \dot{a} – greičio nuostato išvestinė; $y(t)$ – išėjimo signalas, $\dot{y}(t)$ – išėjimo signalo išvestinė, k_p ir k_d – stiprinimo koeficientai, skirti reguliatoriui derinti.

Reguliatorių sudaro šios dalys:

- taisyklių bazė (angl. *rule base*) yra „jei... tuomet...“ (angl. *If... – Then...*) taisyklių rinkinys;
- loginių išvadų mechanizmas (angl. *inference mechanism*), parenkantis tinkamiausias taisykles;
- fuzifikacijos sąsaja (angl. *fuzzification interface*), pakeičianti reguliatoriaus įėjimo signalus taip, kad loginių išvadų mechanizmas galėtų suaktyvinti ir pritaikyti logines taisykles;
- defuzifikacijos sąsaja (angl. *defuzzification interface*), keičianti logines išvadas į objekto valdymo signalą.

Apskaičiuotus reikiamus modelio koeficientus (Juraitis *et al.* 2010), suprojektuojamas neraiškūs reguliatorius ir sudaromas valdomos dvimasės sistemos kompiuterinis modelis, pavaizduotas 3 pav.



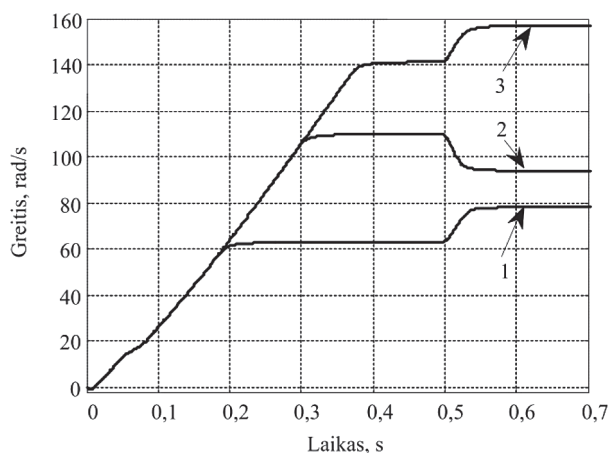
3 pav. Dvimasės elektromechaninės sistemos modelis su neraiškiosios logikos reguliatoriumi *Simulink* terpėje

Fig. 3. *Simulink* model of the two-mass electromechanical system with fuzzy control

Rezultatai

Sudarytas modelis turi greičio ir apkrovos momento nustatymo blokus, kuriais tyrimo metu galima keisti nuostatas. Pasirenkamas antrosios masės standumas, lygus 5000 N·m/rad, ir inercijos momentas, lygus 0,015 kg m².

Imituoti greičio pereinamieji vyksmai įjungiant variklį, esant apkrovai, kuri lygi 7 N·m, ir po 0,5 s pakeičiant greičio nuostatą, parodyti 4 pav.



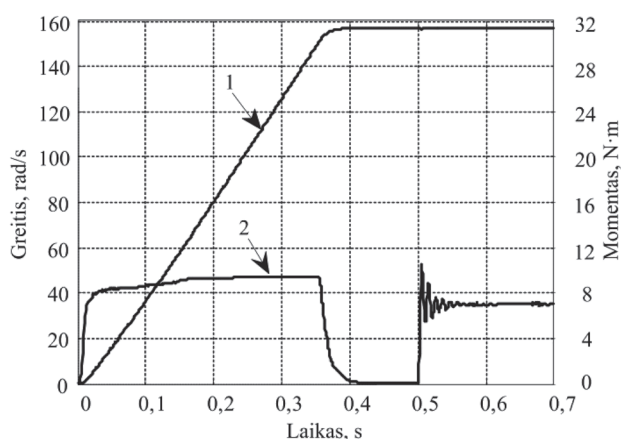
4 pav. Dvimasės sistemos variklio greičio pereinamieji vyksmai, kai: 1 – greičio nuostata pakeičiama nuo 0,4 ω_s iki 0,5 ω_s ; 2 – greičio nuostata pakeičiama nuo 0,7 ω_s iki 0,6 ω_s ; 3 – greičio nuostata pakeičiama nuo 0,9 ω_s iki ω_s

Fig. 4. Speed values of the induction motor in the two-mass system when reference speed: 1 – changes from 0,4 ω_s to 0,5 ω_s ; 2 – changes from 0,7 ω_s to 0,6 ω_s ; 3 – changes from 0,9 ω_s to ω_s

Modelyje greičio nuostata yra vienetinė šuolinė funkcija, kuriai veikiant variklio greičio nusistovėjusi vertė lygi synchroniniam greičiui ω_s .

5 pav. greičio kreivė 1 pateikta kartu su momento pereinamojo vyksmo kreive 2.

Paleidžiant variklį, kai yra apkrova, pereinamojo vyksmo laikas yra 15 % ilgesnis, nei paleidžiant variklį, kai nėra apkrovos.

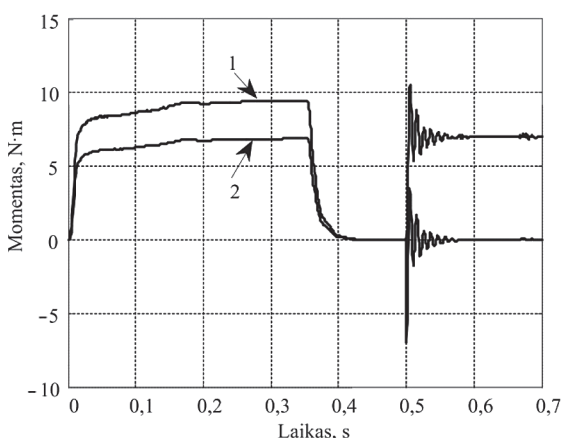


5 pav. Dvimasės sistemos variklio greičio ir momento pereinamųjų vyksmų palyginimas, kai nustatytas greitis 0,9 ω_s pakeičiamas iki ω_s : 1 – greičio pereinamasis vyksmas; 2 – momento pereinamasis vyksmas

Fig. 5. Comparison of the speed and torque of the induction motor in the two-mass system when reference speed is 0,9 ω_s and changed to ω_s : 1 – speed transient; 2 – torque transient

5 pav. pateikti imitacijos rezultatai rodo, kad pradiniu pereinamojo vyksmo metu momentas staiga išauga ir išlieka beveik nepakitęs, kol pasiekiamas nustatytas greitis, paskui jis mažėja ir įgauna naują vertę, reikalingą antrosios masės inercijai įveikti. Pakitus greičio nuostatai, gaunamas momento šuolis, o kai pasiekama nauja nusistovėjusi greičio vertė, variklio momentas atitinka nuostato vertę. 5 pav. momento vertės padidintos penkis kartus. Siekiant vienoje koordinatinių sistemoje pateikti greičio ir momento pereinamuosius vyksmus, taikyti skirtingi greičio ir momento masteliai.

6 pav. pavaizduoti variklio ir antrosios masės momentai. Aiškiai matyti, kad variklio momentas yra didesnis ir įjungus apkrovą išlieka nepakitęs.



6 pav. Dvimasės sistemos variklio ir antrosios masės momentų pereinamųjų vyksmų palyginimas, kai greičio nuostatas yra ω_s : 1 – variklio momento pereinamasis vyksmas; 2 – antrosios masės momento pereinamasis vyksmas

Fig. 6. Comparison of the torque of the induction motor and second mass in the two-mass system at reference speed ω_s : 1 – motor torque transient; 2 – the second mass torque transient

Išvados

1. Dvimasėje sistemoje su neraiškiosios logikos reguliatoriumi variklio greitis pasiekia numatytą vertę be švytvimų. Sumažinus ar padidinus greičio nuostatą, sistema sklandžiai įgauna naują nusistovėjusią greičio vertę.
2. Modelyje, kuriame apkrovą įjungta nuo modelio paleidimo pradžios, pereinamojo vyksmo laikas yra 15 % ilgesnis negu modelyje be apkrovos.
3. Dvimasėje sistemoje su neraiškiosios logikos reguliatoriumi, esant skirtingoms nusistovėjusio greičio vertėms, apkrovos įjungimas įtakos neturi ir greitis išlieka lygus nuostato greičiui.
4. Nusistovėjusi momento vertė atitinka nuostato apkrovos vertę.

Literatūra

- Chen, G. 2001. *Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Control Systems*. Houston: CRC press. 316 p.
- Juraitis, S.; Rinkevičienė, R.; Smilgevičius, A. 2009a. Dynamic properties of two-mass electromechanical system, in *6th International Symposium "Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering"*. Kuressaare: Tallinn University of Technology, 18–21.
- Juraitis, S.; Rinkevičienė, R.; Kriaučiūnas, J. 2009b. Modeling of two-mass system with elasticity, in *Electrical and Control Technologies ECT-2009*. Kaunas: Technologija, 227–230.
- Juraitis, S.; Rinkevičienė, R.; Kilikevičius, A. 2010. Modeling of Performance of two-mass variable speed drive in closed loop system, in *Electrical and Control Technologies ECT-2010*. Kaunas: Technologija, 130–133.
- Lisauskas, S.; Rinkevičienė, R. 2010. Model of ventilation system drive with Fuzzy controller, *Electronics and Electrical Engineering* 10(106): 13–16.
- Nour, M. I. H.; Ooi, J.; Chan, K. Y. 2007. Fuzzy logic control vs. conventional PID control of an inverted pendulum robot, in *International Conference on Intelligent and Advanced Systems*. Semenyih: IEEE, 209–214.
- Petrovas, A.; Rinkevičienė, R. 2009. Model of vector controlled induction drive, *Mechatronic Systems and Materials* 10(4028): 149–154.
- Smilgevičius, A.; Rinkevičienė, R. 2005. Simulation of transients in the mechanical part of electromechanical system, in *10th International Conference Mathematical Modelling and Analysis and 2nd International Conference Computational Methods in Applied Mathematics*. Vilnius: Matematikos ir informatikos institutas, 155–162.
- Smilgevičius, A.; Rinkevičienė, R.; Savickienė, Z. 2006. Operation of electric motor with elastic load, *Electronics and Electrical Engineering* 6(70): 15–18.

TWO-MASS ELECTROMECHANICAL SYSTEM WITH A FUZZY REGULATOR

J. Kriaučiūnas, S. Juraitis

Abstract

The paper presents a two-mass system with a finite stiffness and fuzzy logic controller with feedback signals proportional to speed error and its derivative. Solutions to improve the dynamics of the two-mass system were considered. The paper deals with some essential benefits of a fuzzy logic controller to control the drive speed of the induction motor of the two-mass system. A computer model of the two-mass system with Takagi-Sugeno fuzzy type controller is presented. The simulation model and results of the controlled two-mass system are discussed. The transients of the system with different reference speed are introduced.

Keywords: two-mass system, electromechanical system, fuzzy logic, controller.