

# PROPORCINIO – PROPORCINIO INTEGRUOJANČIO KINTAMOS STRUKTŪROS GREIČIO REGULIATORIAUS TYRIMAS

Nerijus Šulčius, Andrius Mikulskis

Šiaulių universitetas, Technologijos fakultetas

## Įvadas

Įprasti elektromechaninių vykdymo sistemų dinamikos optimizavimo metodai – kiekybinis ir simetrinis optimumai [1] – turi savų privalumų bei trūkumų ir yra pagrįsti pastovios struktūros greičio reguliatoriais: proporciniu (P) ir proporciniu integruojančiu (PI). Tenkinant kiekybinio optimumo principą, garantuojama palankiausia greičio valdymo kontūro reakcija į šuolinį valdymo poveikį (greičio dinaminis nuokrypis neviršija 5%), tačiau atsiranda apkrovos sąlygojamas statinis greičio nuokrypis, kuris visiškai nepageidaujamas pozicionavimo sistemoje. Simetrinis optimumas garantuoja nulinį greičio statinį nuokrypį, bet tuomet padidėja maksimali greičio dinaminio nuokrypio vertė iki 50% ir kartu pailgėja reguliavimo trukmė – sumažėja elektromechaninės sistemos greitaveika. Siekiant suderinti kiekybinio ir simetrinio optimumų teikiamus privalumus bei pašalinti jų trūkumus, naudojami kintamos struktūros greičio reguliatoriai [2–4]. Jau yra ištirtas PI-P-PI kintamos struktūros greičio reguliatorius [5], kuriame du kartus keičiamas reguliatoriaus valdymo dėsnis. Tačiau suderinti kiekybinio ir simetrinio optimumų teikiamus privalumus bei pašalinti jų trūkumus būtų galima atliekant tik vieną greičio reguliatoriaus valdymo dėsnio keitimą. Todėl šio darbo tikslas – ištirti P-PI kintamos struktūros greičio reguliatoriaus tinkamumą simetrinio ir kiekybinio optimumų privalumų suderinimui bei trūkumų pašalinimui.

### Uždaviniai:

1. Sudaryti apibendrintos elektromechaninės vykdymo sistemos su kintamos struktūros greičio reguliatoriumi modelį MATLAB / Simulink programa.
2. Pagal integralinį kokybės rodiklį nustatyti geriausią elektromechaninės vykdymo sistemos dinamikos kokybę užtikrinančią reguliatoriaus perjungimo parametro priklausomybę nuo statinės apkrovos.

**Tyrimo metodas** – kompiuterinis modeliavimas ir imitacija MATLAB / Simulink programa.

## Modelio sudarymas

Elektromechaninėse hierarchinio valdymo sistemoje kiekvieno kintamojo valdymo kontūras yra optimizuojamas (suderinamas) atskirai, prade-

dant nuo mažiausio ir sparčiausiai veikiančio vidinio (srovės) ir baigiant išoriniu (greičio) valdymo kontūru. Tvirtinama, kad sistemos valdymo kontūras yra suderintas pagal kiekybinį optimumą, jeigu atviro valdymo kontūro atstojamoji perdavimo funkcija įgyja tokį pavidalą [6].

$$H_{KOa}(s) = \frac{1}{2^k \cdot T_\mu \cdot s \cdot (2^{k-1} \cdot T_\mu \cdot s + 1)}; \quad (1)$$

čia:  $k$  – valdymo kontūro eilės numeris,  $T_\mu$  – valdymo kontūro laiko pastovioji,  $s$  – kompleksinis (Laplaso) kintamasis.

Norint, kad sistemos valdymo kontūras būtų suderintas pagal simetrinį optimumą, atviro valdymo kontūro atstojamoji perdavimo funkcija turi įgyti pavidalą

$$H_{SOa}(s) = \frac{1 + 2^{k+1} \cdot T_\mu \cdot s}{2^{k+1} \cdot T_\mu \cdot s} \cdot \frac{1}{2^k \cdot T_\mu \cdot s \cdot (2^{k-1} \cdot T_\mu \cdot s + 1)}. \quad (2)$$

Siekiant rezultatų universalumo ir pritaikimumo įvairiose sistemoje, buvo sudarytas apibendrintas (vienetinių verčių) hierarchinės struktūros elektromechaninės vykdymo sistemos modelis MATLAB / Simulink programa (1 pav.), tenkinanti (1) ir (2) išraiškas.

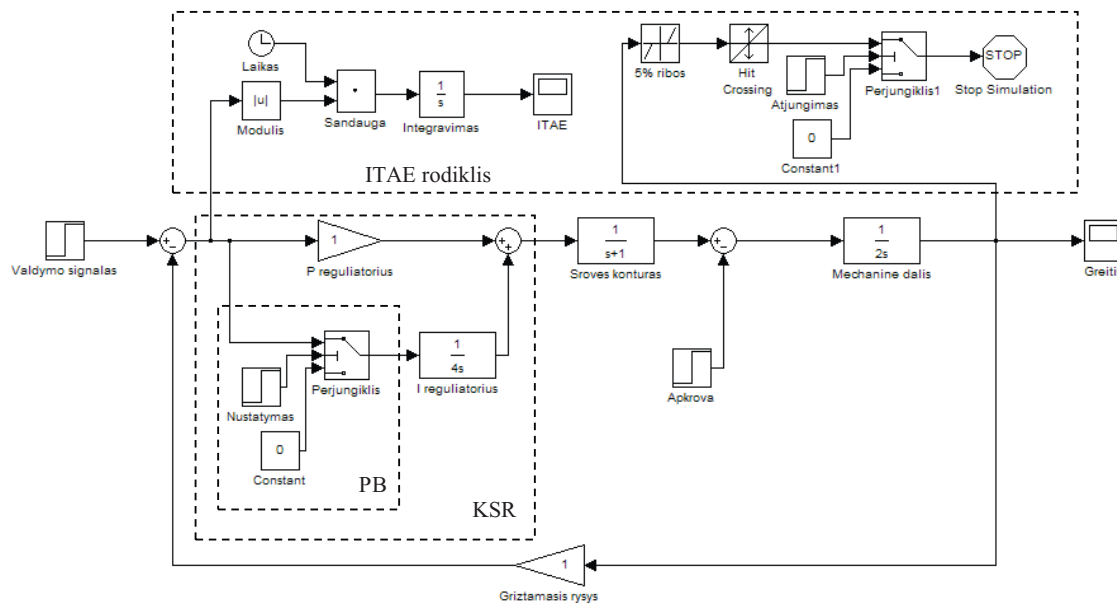
Apibendrintos elektromechaninės vykdymo sistemos modelį (1 pav.) sudaro kintamos struktūros greičio reguliatorius (KSR), formuojantis P valdymo dėsnį (kiekybinį optimumą).

$$H_{GR,KO}(s) = k_p \quad (3)$$

ir PI valdymo dėsnį (simetrinį optimumą)

$$H_{GR,SO}(s) = k_p + \frac{k_I}{s}; \quad (4)$$

čia:  $k_p$  – proporcinio valdymo dėsnio koeficientas,  $k_I$  – integruojančio valdymo dėsnio koeficientas. Pa-valdus srovės valdymo kontūras, aproksimuotas pirmos eilės atstojamąja perdavimo funkcija.



1 pav. Apibendrintos elektromechaninės vykdomo sistemos modelis MATLAB / Simulink programa

$$H_{SK}(s) = \frac{k_{SK}}{T_{SK} \cdot s + 1}; \quad (5)$$

čia:  $k_{SK}$  – srovės valdymo kontūro koeficientas,  $T_{SK}$  – srovės valdymo kontūro laiko pastovioji. Elektros variklio mechaninė dalis apibūdinama perdavimo funkcija

$$H_M(s) = \frac{k_M}{s}; \quad (6)$$

čia  $k_M$  – variklio mechaninės dalies koeficientas.

Paveikus vienetiniam šuliniam sistemos valdymo signalui, greičio reguliatorius jungiamas P valdymo dėsniai, suderintam pagal kiekybinį optimumą. Praėjus tam tikram laikui – P valdymo dėsnio trukmei, siekiant išvengti pernelyg didelio greičio dinaminio nuokrypio ir kartu greičio statinio nuokrypio pasibaigus pereinamajam procesui, sudarytoju greičio reguliatoriaus valdymo dėsnio perjungimo bloku (PB) įjungiamas integruojantis kanalas ir greičio reguliatorius tuomet įjungiamas PI valdymo dėsniai, suderintam pagal simetrinį optimumą.

Elektromechaninės vykdomo sistemos su kintamos struktūros greičio reguliatoriumi dinamikos kokybė įvertinama sudarytoju ITAE (Integral of Time multiplied by Absolute Error) integraliniu kokybės rodikliu (1 pav.), kurio išraiška [7]

$$J_{ITAE} = \int_0^{t_{reg}} t \cdot |x_{\Delta}(t)| \cdot dt; \quad (7)$$

čia:  $|x_{\Delta}(t)|$  – reguliuojamo parametro nuokrypio modulis,  $t_{reg}$  – reguliavimo trukmė, tai laikas, per kurį greičio dinaminis nuokrypis pasiekia 5% ribą ir vėliau nebeviršija jos.

### Geriausiu perjungimo momentų nustatymas

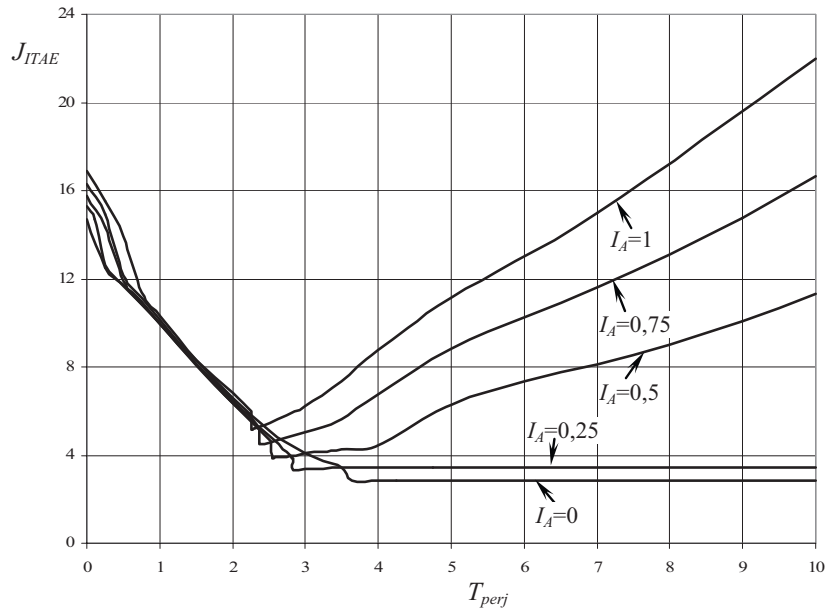
Tyrimas atliktas keičiant greičio reguliatoriaus perjungimo iš P valdymo dėsnio į PI momentą ir stebint ITAE integralinio kokybės rodiklio vertę. Kuo mažesnė rodiklio vertė, tuo sistemos pereinamasis procesas yra geresnės kokybės. Minimali ITAE rodiklio vertė rodo greičio reguliatoriaus perjungimo laiką, laiduojantį geriausią elektromechaninės vykdomo sistemos dinamikos kokybę. Tai matyti 2 pav. pateiktose elektromechaninės vykdomo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi ITAE kokybės rodiklio priklausomybėse nuo santykinio perjungimo laiko [5]

$$T_{perj} = \frac{t_{perj}}{T_{SK}} \quad (8)$$

ir santykinės statinės apkrovos srovės

$$I_A = \frac{I_a}{I_{a \max}}; \quad (9)$$

čia:  $I_{a \max}$  – maksimali statinės apkrovos srovės vertė, sukiant 20% greičio statinį nuokrypį, kai sistema suderinta pagal kiekybinį optimumą;  $t_{perj}$  – greičio reguliatoriaus struktūros perjungimo laikas (P valdymo dėsnio trukmė), garantuojantis geriausią konkrečios elektromechaninės vykdomo sistemos dinamikos kokybę.

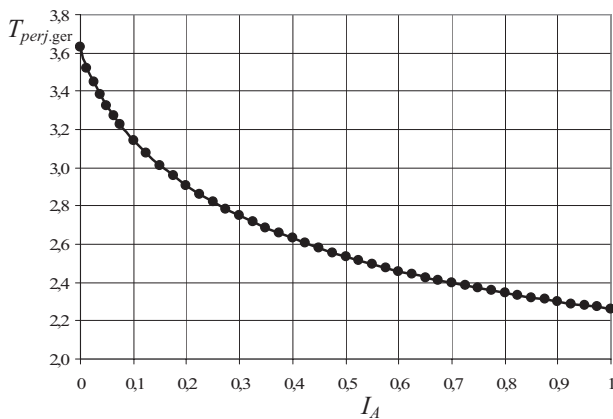


**2 pav.** Elektromechaninės vykdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi ITAE kokybės rodiklio priklausomybė nuo santykinio perjungimo laiko ir santykinės statinės apkrovos srovės

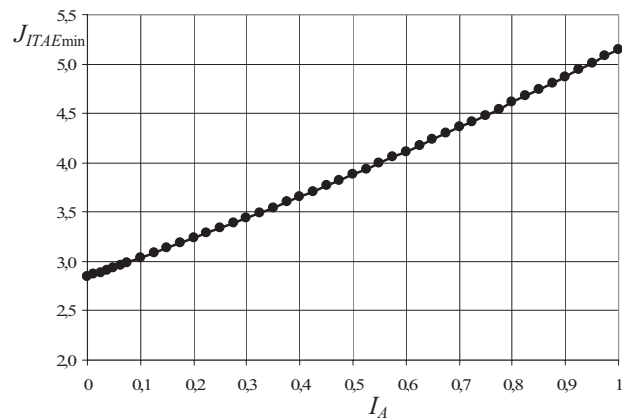
Atrinkus ITAE rodiklio minimumus atitinkančias reguliatoriaus santykinio perjungimo laiko vertes prie skirtingų santykinės statinės apkrovos srovės verčių, buvo sudaryta geriausio santykinio perjungimo laiko, užtikrinančio geriausią elektromechaninės vykdymo sistemos dinamikos kokybę, priklausomybė nuo santykinės statinės apkrovos srovės (3 pav. a). Atitinkamai gauta tiesinė ITAE kokybės rodiklio minimalių verčių priklausomybė nuo santy-

kinės statinės apkrovos srovės pateikta 3 pav. b.

Nustatytoji greičio reguliatoriaus geriausių perjungimo momentų priklausomybė nuo statinės apkrovos (3 pav. a) yra universali, pritaikoma įvairioms elektromechaninėms vykdymo sistemoms. Pakanka žinoti sistemos srovės valdymo kontūro laiko pastoviąją  $T_{SK}$  ir galima pagal (8) išraišką apskaičiuoti tinkamiausią greičio reguliatoriaus perjungimo iš P valdymo dėsnio į PI laiko momentą.



a



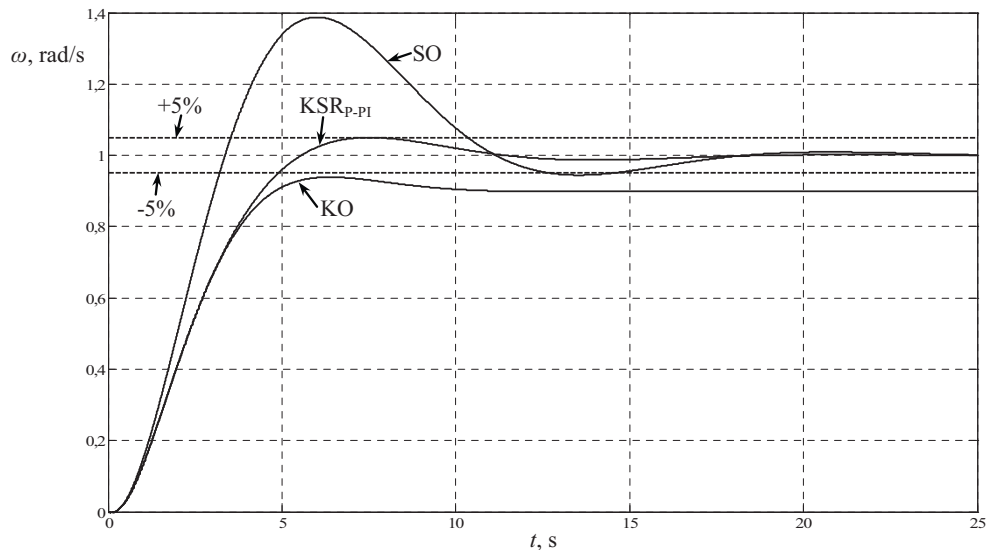
b

**3 pav.** Priklausomybės nuo santykinės statinės apkrovos srovės:

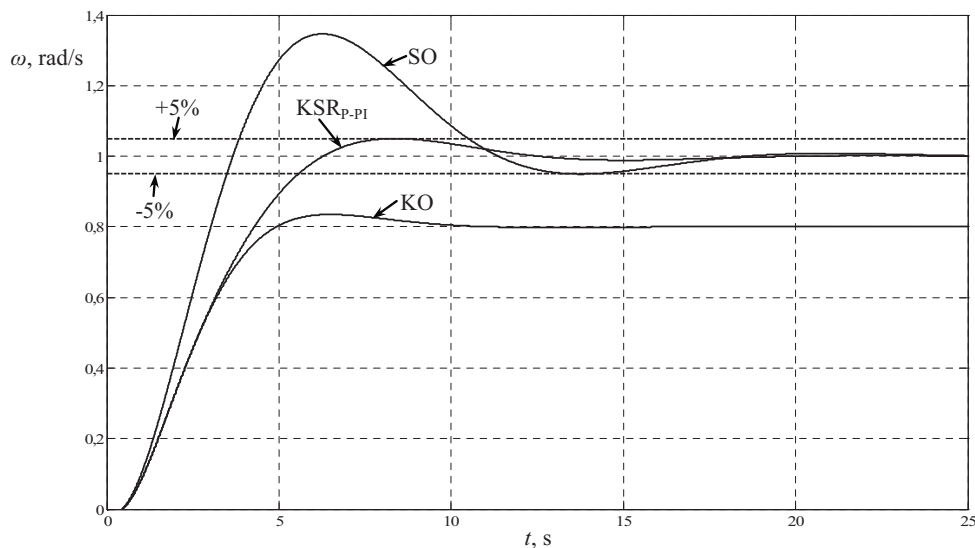
a – geriausio santykinio perjungimo laiko; b – minimalaus ITAE kokybės rodiklio

4 pav. ir 5 pav. pateiktos sistemos kampinio greičio  $\omega$  pereinamojo proceso kreivės laiko  $t$  atžvilgiu – reakcijos į šuolinį valdymo poveikio pokytį rodo, kad, naudojant P-PI kintamos struktūros reguliatorių, suderinami simetrinio (SO) ir kiekybinio (KO) optimumų teikiami privalumai ir pašalinami trūku-

mai. Visame santykinės statinės apkrovos intervale užtikrinamas nedidelis greičio dinaminis nuokrypis, neviršijantis 5%, o tai nebūdinga simetriniam optimumui, ir garantuojamas nulinis greičio statinis nuokrypis, nebūdingas kiekybinio optimumo atveju.



4 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos greičio pereinamojo proceso kreivės, kai  $I_A = 0,5$



5 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos greičio pereinamojo proceso kreivės, kai  $I_A = 1$

### Išvados

1. Remiantis ITAE integraliniu kokybės rodikliu, nustatyta geriausia elektromechaninės vykdyimo sistemos dinamikos kokybę užtikrinanti greičio reguliatoriaus valdymo dėsnio perjungimo laiko priklausomybė nuo statinės apkrovos.
2. Didėjant elektromechaninės vykdyimo sistemos statinei apkrovai, geriausias reguliatoriaus valdymo dėsnio perjungimo laikas trumpėja, tačiau ITAE kokybės rodiklio minimali vertė didėja, todėl sistemos dinamikos kokybė prastėja.
3. P-PI kintamos struktūros greičio reguliatorius suderina simetrinio ir kiekybinio optimumų privalumus bei pašalina jų trūkumus, užtikrindamas elektromechaninės vykdyimo sistemos greičio dinaminį nuokrypį, neviršijantį  $\pm 5\%$  ir nulini greičio statinį nuokrypį.

### Literatūra

1. Geleževičius V., Kriščiūnas K., Kubilius V., 1990, *Elektros pavarų valdymo sistemos*. Vilnius: Mokslas.
2. Šulčius N., Geleževičius V. A., 2004, Kintamos struktūros reguliatorių taikymas elektros pavarų grei-taveikai didinti. *Automatika ir valdymo technologijos 2004: Tarptautinės konferencijos medžiaga*. Kaunas: Technologija. P. 114–118.
3. Šulčius N., Geleževičius V. A., 2005, Elektromechaninių vykdyimo sistemų su kintamos struktūros reguliatoriais dinamikos kokybės tyrimas. *Elektronika ir elektrotechnika*. Nr. 7 (63). P. 40–43.
4. Šulčius N., Geleževičius V. A., 2006, Investigation of Dynamical Quality of Mechatronic Drive with Variable Structure Velocity Controller. *Acta Technica Napocensis, Series: Applied Mathematics and Mechanics*. Vol. 49. No. 3. P. 543–548.
5. Šulčius N., 2008, Mechatroninių vykdyimo sistemų

- valdymas kintamos struktūros reguliatoriais. *Doktoro disertacija*. Kauno technologijos universitetas.
6. Ключев В. И., 1998, *Теория электропривода*. 2-е издание. Москва: Энергоатомиздат.
7. Palm III W. J., 2000, *Modeling, analysis, and control of dynamic systems*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons.

## INVESTIGATION INTO PROPORTIONAL – PROPORTIONAL INTEGRAL VARIABLE STRUCTURE VELOCITY CONTROLLER

*Nerijus Šulčius, Andrius Mikulskis*

### Summary

In this article the proportional (P) – proportional integral (PI) variable structure velocity controller is investigated. This controller is used to coordinate the advantages and eliminate disadvantages of the conventional dynamics optimization methods of the electromechanical servo systems – the symmetrical and the quantitative optimums. The generalized model of the electromechanical servo system with P-PI variable structure velocity controller is formed by using MATLAB/Simulink software. According to the ITAE integral quality index, the velocity controller's control law change-over time dependence on the static load ensuring the best dynamic quality of the electromechanical servo system is determined. The simulation results demonstrate that P-PI variable structure velocity controller coordinates the advantages and eliminates disadvantages of the symmetrical and the quantitative optimums, and ensures that the velocity dynamic error of the electromechanical servo system does not exceed  $\pm 5\%$  and the steady-state velocity error is zero.

**Keywords:** electromechanical system, symmetrical optimum, quantitative optimum, velocity controller, variable structure.

## PROPORCINIO – PROPORCINIO INTEGRUOJANČIO KINTAMOS STRUKTŪROS GREIČIO REGULIATORIAUS TYRIMAS

*Nerijus Šulčius, Andrius Mikulskis*

### Santrauka

Straipsnyje nagrinėjamas proporcinis (P) – proporcinis integruojantis (PI) kintamos struktūros greičio reguliatorius, skirtas elektromechaninių vykdymo sistemų įprastų dinamikos optimizavimo metodų – simetrinio ir kiekybinio – optimumų privalumų suderinimui bei trūkumų pašalinimui. Sudarytas apibendrintos elektromechaninės vykdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros greičio reguliatoriumi modelis MATLAB / Simulink programa. Remiantis ITAE integraliniu kokybės rodikliu, nustatyta geriausia elektromechaninės vykdymo sistemos dinamikos kokybę užtikrinanti greičio reguliatoriaus valdymo dėsnio perjungimo laiko priklausomybė nuo statinės apkrovos. Modeliavimo rezultatai rodo, kad P-PI kintamos struktūros greičio reguliatorius suderina simetrinio ir kiekybinio optimumų privalumus bei pašalina jų trūkumus, laiduodamas elektromechaninės vykdymo sistemos greičio dinaminį nuokrypį, neviršijantį  $\pm 5\%$  ir nulinį greičio statinį nuokrypį.

**Prasminiai žodžiai:** elektromechaninė sistema, simetrinis optimumas, kiekybinis optimumas, greičio reguliatorius, kintama struktūra.

Įteikta 2009-09-01