

# KINTAMOS STRUKTŪROS GREIČIO REGULIATORIAUS REALIZAVIMO ELEKTROMECHANINĖJE VYKDYMO SISTEMOJE TYRIMAS

Nerijus Šulčius

Šiaulių universitetas, Technologijos fakultetas

## Įvadas

Elektromechaninių vykdymo sistemų dinamiškos kokybei gerinti vartojami kintamos struktūros greičio reguliatoriai. Vienas iš tokių yra P-PI kintamos struktūros greičio reguliatorius, derinantis kiekybinio ir simetrinio optimumų teikiamus privalumus bei šalinantis jų trūkumus, keičiant reguliatoriaus valdymo dėsnį iš proporcinio (P) į proporcinį – integruojantį (PI) pereinamojo proceso metu. Paveikus šuoliniam sistemos valdymo signalo pokyčiui, greičio reguliatorius jungiamas P valdymo dėsniui, suderintam pagal kiekybinį optimumą. Siekiant išvengti pernelyg didelių greičio dinaminio ir kartu greičio statinio nuokrypių, praėjus tam tikram laikui – P valdymo dėsnio trukmei, įjungiamas integruojantis kanalas ir greičio reguliatorius tuomet įjungiamas PI valdymo dėsniui, suderintam pagal simetrinį optimumą. Nustatyta P-PI greičio reguliatoriaus valdymo dėsnio perjungimo laiko priklausomybė nuo statinės apkrovos, užtikrinanti geriausią elektromechaninės vykdymo sistemos dinamikos kokybę [1]. Pastarajai priklausomybei realizuoti gali būti naudojamas miglotosios (fuzzy) logikos įtaisas arba programuojamosios lentelės (Lookup Table) pavidalo įtaisas, kurie sėkmingai buvo pritaikyti PI-P-PI kintamos struktūros greičio reguliatoriui [2–4]. Elektromechaninės vykdymo sistemos su pastovios ir kintamos struktūros greičio reguliatoriais dinamiškos kokybei įvertinti ir palyginti taikomas integralinis kokybės rodiklis.

**Darbo tikslas** – P-PI kintamos struktūros greičio reguliatoriaus geriausio perjungimo laiko priklausomybės nuo statinės apkrovos realizavimas ir elektromechaninės vykdymo sistemos dinamikos kokybės palyginimas.

### Darbo uždaviniai:

1. Taikant programuojamą lentelę (Lookup Table), realizuoti P-PI kintamos struktūros greičio reguliatoriaus geriausio perjungimo laiko priklausomybę nuo statinės apkrovos nuolatinės srovės elektros pavaros modelyje.
2. Palyginti elektromechaninės vykdymo sistemos dinamikos kokybę, gaunamą pastovios struktūros (PI), P-PI ir PI-P-PI kintamos struktūros greičio reguliatoriais.

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

## Sistemos modelio sudarymas

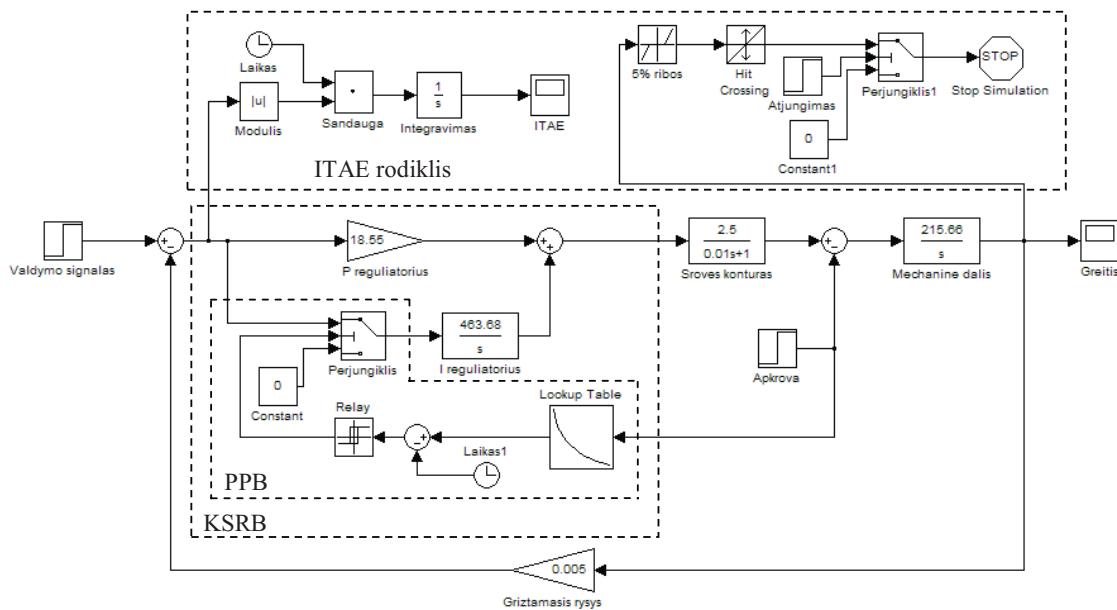
Greičio valdymo paprastumas nulemia tai, kad P-PI kintamos struktūros greičio reguliatoriaus realizavimas modeliuojamas greičio valdymo sistemoje su nuolatinės srovės nepriklausomo žadinimo varikliu – nuolatinės srovės elektros pavaroje. Tiek PI-P-PI, tiek ir P-PI kintamos struktūros greičio reguliatoriai gali būti taikomi elektromechaninėse vykdymo sistemose – nuolatinės srovės elektros pavarose, kai šuolinio įėjimo signalo pokytis yra tokios vertės, kad inkaro srovė pereinamojo proceso metu nėra ribojama.

Siekiant palyginti P-PI ir PI-P-PI kintamos struktūros greičio reguliatorių efektyvumą – gaunamą sistemos dinamikos kokybę nuolatinės srovės elektros pavaros modeliui sudaryti MATLAB / Simulink programa, pasirenkamas tas pats nuolatinės srovės nepriklausomo žadinimo elektros variklis, kurios parametrai:  $P_n = 0,28$  kW,  $U_n = 220$  V,  $I_n = 1,82$  A,  $M_n = 1,57$  N·m,  $n_n = 1500$  aps/min,  $J_v = 0,004$  kg·m<sup>2</sup> [5]. Tarkime, kad galios keitiklio laiko pastovioji  $T_k = 0,005$  s. Siekiant išvengti inkaro srovės ribojimo, elektros pavaros greičio nustatymo signalo vertė, sakykime, 4 kartus mažesnė už nominaliąją, tuomet nagrinėjamos elektros pavaros inkaro srovės pereinamojo proceso maksimali vertė bus 3 kartus didesnė už nominaliąją. Tokiu atveju nominali apkrova sukels 20% greičio statinį nuokrypį, kai sistema suderinta pagal kiekybinio optimumo kriterijų [5].

Nuolatinės srovės elektros pavaros modelį (1 pav.) sudaro greičio valdymo kontūrai pavaldus srovės valdymo kontūras, aproksimuotas pirmos eilės atstojamąja perdavimo funkcija

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

čia:  $k_{SK}$  – srovės valdymo kontūro koeficientas,  $T_{SK} = 2 \cdot T_k$  – srovės valdymo kontūro laiko pastovioji,  $s$  – kompleksinis (Laplaso) kintamasis.



1 pav. Nuolatinės srovės elektros pavaros modelis, sudarytas MATLAB / Simulink programa

Elektros variklio mechaninė dalis apibūdinama perdavimo funkcija

$$H_M(s) = \frac{k_M}{s}; \quad (2)$$

čia  $k_M$  – variklio mechaninės dalies koeficientas. Kintamos struktūros greičio reguliatoriaus bloką (KSRB) sudaro greičio reguliatorius, formuojantis P valdymo dėsnį (kiekybinis optimumas)

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

ir PI valdymo dėsnį (simetrinis optimumas)

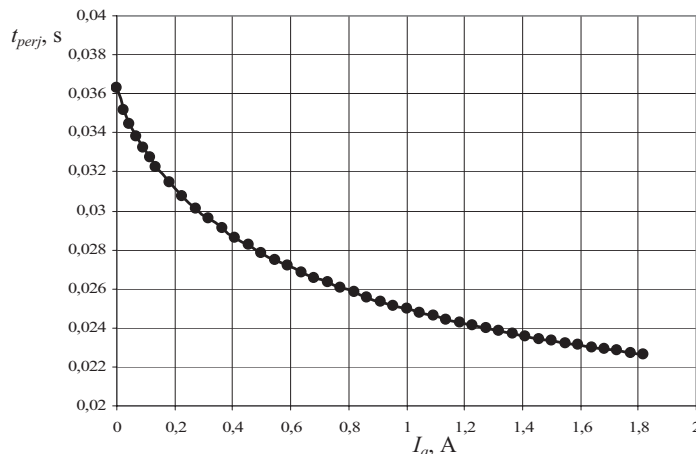
$$H_{GR,SO}(s) = k_p + \frac{k_I}{s}. \quad (4)$$

Čia:  $k_p$  – proporcinio valdymo dėsnio koeficientas,  $k_I$  – integruojančio valdymo dėsnio koeficientas.

Greičio reguliatoriaus valdymo dėsnio keitimą iš P į PI atlieka programuojamasis perjungimo blokas (PPB). Programuojamoji lentelė (Lookup Table) nustato tinkamiausią greičio reguliatoriaus valdymo dėsnio keitimo momentą, priklausantį nuo statinės apkrovos lygio, tuo užtikrinant geriausią nagrinėjamos elektromechaninės vykdyto sistemos – nuolatinės srovės elektros pavaros dinamikos kokybę. Programuojamojoje lentelėje (Lookup Table) surašomos ankstesniais tyrimais [1] nustatytos geriausios ir nagrinėjamai nuolatinės srovės elektros pavarai pritaikytos greičio reguliatoriaus valdymo dėsnio perjungimo laiko

$$t_{perj} = T_{perj} \cdot T_{SK}, \quad (5)$$

čia:  $T_{perj}$  – santykinis perjungimo laikas, ir jį lemiančios statinės apkrovos srovės  $I_a$  vertės. Gautoji priklausomybė pateikta 2 pav.

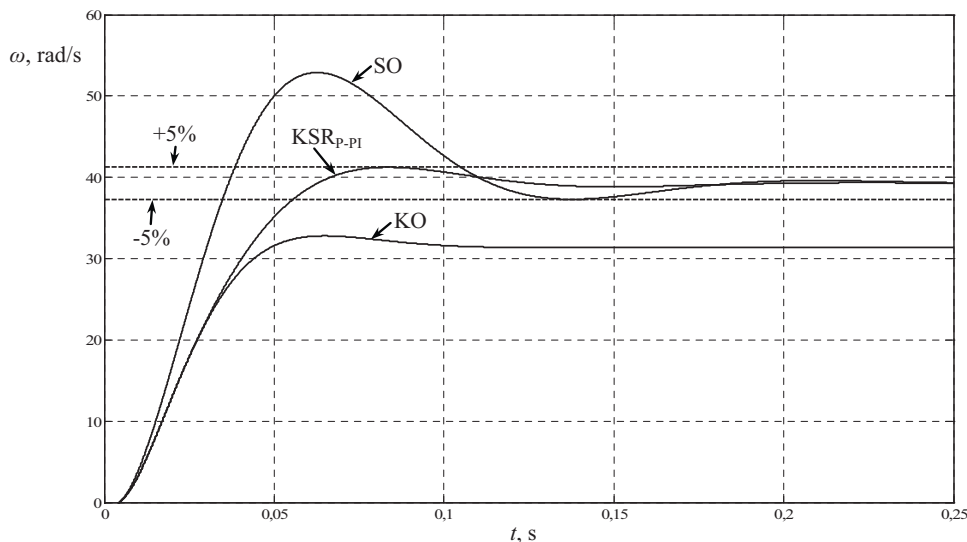


2 pav. Greičio reguliatoriaus valdymo dėsnio perjungimo laiko priklausomybė nuo statinės apkrovos srovės

Jei programuojamos lentelės įėjime veikia nenurodytoji statinės apkrovos srovės vertė, tuomet perjungimo laiko vertė gaunama atliekant tiesinę interpoliaciją tarp dviejų artimiausių verčių.

Nuolatinės srovės elektros pavaros greičio  $\omega$  pereinamojo proceso kreivės (3 pav.) – reakcijos į šuolinį valdymo signalo pokytį rodo, kad P-PI kintamos struktūros greičio reguliatorius su programuojama lentele (Lookup Table) užtikrina nedidelį greičio dinaminį nuokrypį, neviršijantį 5%. Tai nebūdin-

ga sistemai, suderintai pagal simetrinį optimumą (SO) ir garantuoja nulinį greičio statinį nuokrypį (tai nebūdinga sistemai, suderintai pagal kiekybinį optimumą (KO)). Taigi, P-PI kintamos struktūros greičio reguliatorius, kurio valdymo dėsnio geriausio keitimo momento nustatymas realizuotas programuojama lentele, suderina simetrinio ir kiekybinio optimumų teikiamus privalumus ir pašalina jiems būdingus trūkumus visame statinės apkrovos srovės kitimo intervale.



3 pav. Nuolatinės srovės elektros pavaros greičio pereinamojo proceso kreivės, kai  $I_a = 1,82$  A

### Dinamikos kokybės lyginimas

Nuolatinės srovės elektros pavaros dinamikos kokybė įvertinama ITAE (Integral of Time multiplied by Absolute Error) integraliniu kokybės rodikliu, sudarytu (1 pav.) pagal išraišką greičio dinaminis nuokrypis pasiekia 5% ribą ir vėliau nebeviršija jos. Kuo mažesnė ITAE integralinio kokybės rodiklio vertė, tuo sistemos dinamikos (pereinamojo proceso) kokybė geresnė.

$$J_{ITAE} = \int_0^{t_{reg}} t \cdot |x_{\Delta}(t)| \cdot dt; \quad (6)$$

čia:  $|x_{\Delta}(t)|$  – reguliuojamo parametro nuokrypio modulis,  $t_{reg}$  – reguliavimo trukmė, t. y. laikas, per kurį greičio dinaminis nuokrypis pasiekia 5% ribą ir vėliau nebeviršija jos. Kuo mažesnė ITAE integralinio kokybės rodiklio vertė, tuo sistemos dinamikos (pereinamojo proceso) kokybė geresnė.

Nuolatinės srovės elektros pavaros su pastovios ir kintamos struktūros greičio reguliatoriais ITAE integralinio kokybės rodiklio priklausomybės nuo statinės apkrovos srovės pateiktos 4 pav. Matyti, kad, didėjant statinei apkrovai, nuolatinės srovės elektros pavaros tiek su P-PI, tiek ir su PI-P-PI kintamos struktūros greičio reguliatoriais, ITAE kokybės rodiklio vertė didėja – sistemos dinamikos kokybė

prastėja. Tuomet, kai nuolatinės srovės elektros pavaros suderintos pagal simetrinį optimumą su pastovios struktūros PI greičio reguliatoriumi, ITAE kokybės rodiklio vertė mažėja – sistemos dinamikos kokybė gerėja.

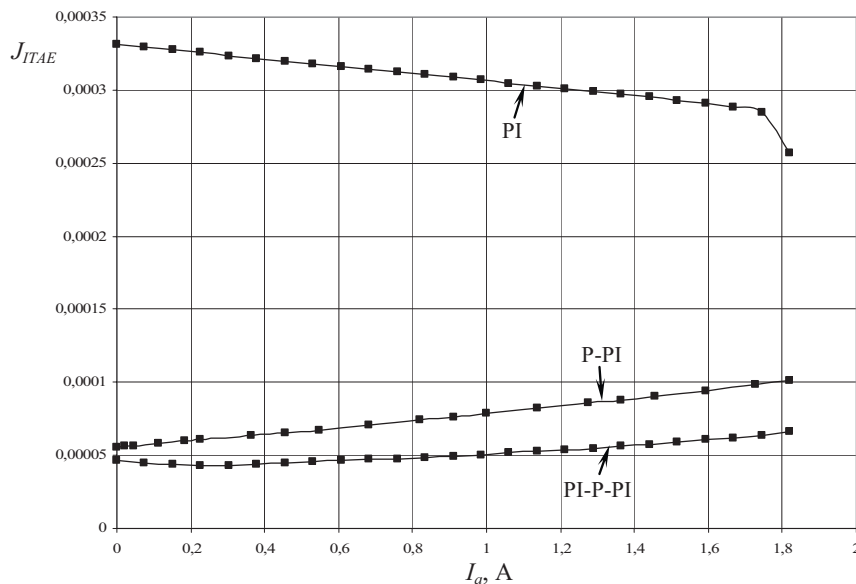
Nuolatinės srovės elektros pavaros su pastovios ir kintamos struktūros greičio reguliatoriais dinamikos kokybės palyginimui sudaryti santykiniai kokybės pokyčio rodikliai

$$\Delta J_{ITAE \text{ KSR.SO}} = \frac{J_{ITAE \text{ P-PI}} - J_{ITAE \text{ PI}}}{J_{ITAE \text{ PI}}} \cdot 100\% \quad (7)$$

ir

$$\Delta J_{ITAE \text{ KSR.KSR}} = \frac{J_{ITAE \text{ P-PI}} - J_{ITAE \text{ PI-P-PI}}}{J_{ITAE \text{ PI}}} \cdot 100\% \quad (8)$$

Čia:  $J_{ITAE \text{ P-PI}}$  – nuolatinės srovės elektros pavaros su P-PI kintamos struktūros greičio reguliatoriumi ITAE kokybės rodiklio vertė,  $J_{ITAE \text{ PI}}$  – nuolatinės srovės elektros pavaros su pastovios struktūros PI greičio reguliatoriumi ITAE kokybės rodiklio vertė,  $J_{ITAE \text{ PI-P-PI}}$  – nuolatinės srovės elektros pavaros su PI-P-PI kintamos struktūros greičio reguliatoriumi ITAE kokybės rodiklio vertė.



4 pav. Nuolatinės srovės elektros pavaros su pastovios ir kintamos struktūros greičio reguliatoriais dinamikos kokybės kitimas

Atliktų skaičiavimų pagal (7) ir (8) išraiškas rezultatai pateikti 1 lentelėje, iš kurios matyti, kad nuolatinės srovės elektros pavaros su P-PI kintamos struktūros greičio reguliatoriumi dinamikos kokybė gaunama nuo 60,69% iki 83,15% geresnė nei sistemos su pastovios struktūros PI greičio reguliatoriumi, tačiau nuo 2,77% iki 13,68% gaunama blogesnė nei sistemos su PI-P-PI kintamos struktūros greičio reguliatoriumi. Didėjant statinei apkrovos srovei, sistemos su P-PI kintamos struktūros greičio reguliatoriumi dinamikos kokybės gerėjimas sistemos su pastovios struktūros PI greičio reguliatoriumi atžvilgiu – mažėja, tuomet, kai dinamikos kokybės blogėjimas sistemos su PI-P-PI kintamos struktūros greičio reguliatoriumi atžvilgiu – didėja.

1 lentelė. *Dinamikos kokybės pokytis*

$I_a, A$	$\Delta J_{ITAE \text{ KSR.SO}}, \%$	$\Delta J_{ITAE \text{ KSR.KSR}}, \%$
0	-83,15	2,77
0,23	-81,4	5,34
0,46	-79,52	6,53
0,68	-77,5	7,52
0,91	-75,31	8,67
1,14	-72,96	9,67
1,37	-70,38	10,68
1,59	-67,54	11,64
1,82	-60,69	13,68

#### Išvados

1. Programuojamoji lentelė (Lookup Table) tinka P-PI kintamos struktūros greičio reguliatoriaus geriausio perjungimo laiko priklausomybei nuo statinės apkrovos realizuoti ir užtikrina sistemos greičio dinaminį nuokrypį, neviršijantį  $\pm 5\%$  bei

nulinį greičio statinį nuokrypį visame statinės apkrovos srovės kitimo diapazone.

2. Statinės apkrovos srovės didėjimas blogina nuolatinės srovės elektros pavaros su kintamos struktūros (P-PI, PI-P-PI) greičio reguliatoriumi dinamikos kokybę, tačiau gerina sistemos su pastovios struktūros PI greičio reguliatoriumi dinamikos kokybę.
3. Nuolatinės srovės elektros pavaros su P-PI kintamos struktūros greičio reguliatoriumi dinamikos kokybė gaunama iki 83% geresnė nei vartojant pastovios struktūros PI greičio reguliatorių, tačiau iki 14% gaunama blogesnė nei naudojant PI-P-PI kintamos struktūros greičio reguliatorių.

#### Literatūra

1. Mikulskis A., 2009, Kintamosios struktūros reguliatorių taikymo elektromechaninėse vykdymo sistemose tyrimas. *Magistro darbas*. Šiaulių universitetas.
2. Šulčius N., Geleževičius V. A., 2006, Implementation of the Control Algorithm of the Variable Structure Controller in the Electromechanical Servo System. *Electronics and Electrical Engineering*. No. 7 (71). P. 51–54.
3. Šulčius N., Geleževičius V. A., 2007, Investigation of Velocity Control System with Programmable Variable Structure Controller. *Electronics and Electrical Engineering*. No. 5 (77). P. 53–56.
4. Geleževičius V. A., Šulčius N., 2009, Dynamical Quality Improvement of Mechatronic Servo System Using Variable Structure Velocity Controller. *Information Technology and Control*. Vol. 38. No. 1. P. 38–42.
5. Šulčius N., 2008, Mechatroninių vykdymo sistemų valdymas kintamos struktūros reguliatoriais. *Daktaro disertacija*. Kauno technologijos universitetas.

## INVESTIGATION INTO IMPLEMENTATION OF VARIABLE STRUCTURE VELOCITY CONTROLLER IN ELECTROMECHANICAL SERVO SYSTEM

*Nerijus Šulčius*

### Summary

In this article the implementation of the P-PI variable structure velocity controller's best changeover time dependence on the static load applying Lookup Table is investigated. The model of the direct current electric drive with P-PI variable structure velocity controller is formed by using MATLAB/Simulink software. The simulation results demonstrate that P-PI variable structure velocity controller implemented with Lookup Table ensures the dynamic velocity error of the direct current electric drive not exceeding  $\pm 5\%$  and the zero steady-state velocity error. The results of comparison of dynamic quality of the direct current electric drive demonstrate that when using P-PI variable structure velocity controller the obtainable dynamic quality is better by up to 83% in comparison to the fixed structure PI velocity controller, but it is worse by up to 14% in comparison to the PI-P-PI variable structure velocity controller.

**Keywords:** electric drive, variable structure, velocity controller, Lookup Table.

## KINTAMOS STRUKTŪROS GREIČIO REGULIATORIAUS REALIZAVIMO ELEKTROMECHANINĖJE VYKDYMO SISTEMOJE TYRIMAS

*Nerijus Šulčius*

### Santrauka

Straipsnyje nagrinėjamas P-PI kintamos struktūros greičio reguliatoriaus geriausio perjungimo laiko priklausomybės nuo statinės apkrovos realizavimas, taikant programuojamą lentelę (Lookup Table). Sudarytas nuolatinės srovės elektros pavaros su P-PI kintamos struktūros greičio reguliatoriumi modelis MATLAB / Simulink programa. Modeliavimo rezultatai rodo, kad programuojama lentelė (Lookup Table) realizuotas P-PI kintamos struktūros greičio reguliatorius užtikrina nuolatinės srovės elektros pavaros greičio dinaminį nuokrypį, neviršijantį  $\pm 5\%$  ir nulinį greičio statinį nuokrypį. Nuolatinės srovės elektros pavaros dinamikos kokybės palyginimo rezultatai rodo, kad, naudojant P-PI kintamos struktūros greičio reguliatorių, dinamikos kokybė gaunama iki 83% geresnė nei naudojant pastovios struktūros PI greičio reguliatorių, tačiau iki 14% gaunama blogesnė nei naudojant PI-P-PI kintamos struktūros greičio reguliatorių.

**Prasminiai žodžiai:** elektros pavara, kintama struktūra, greičio reguliatorius, programuojamoji lentelė.

Įteikta 2009-09-01