

# ELEKTROMECHANINĖS GREIČIO VALDYMO SISTEMOS SU KEIČIAMOS STRUKTŪROS REGULIATORIUMI TYRIMAS

Nerijus Šulčius, Giedrius Malinauskas  
 Šiaulių universitetas, Technologijos fakultetas

## Įvadas

Elektromechaninių valdymo sistemų dinamikos kokybę pagerinti galima naudojant P-PI keičiamo valdymo dėsnio greičio reguliatorių. Tokio regulatoriaus valdymo dėsnis pereinamojo proceso metu yra keičiamas iš proporcinio (P) į proporcinį integruojantį (PI). Tuo siekiama išvengti pernelyg didelio greičio dinaminio nuokrypio, galinčio siekti iki 43 %, ir kartu greičio statinio nuokrypio – tokiu būdu pagerinama sistemos valdymo kokybė. Anksčiau tyrimais [1, 2] buvo nustatyta P-PI greičio regulatoriaus valdymo dėsnio perjungimo laiko priklausomybė tik nuo vieno parametro – statinės apkrovos, užtikrinanti geriausią elektromechaninės valdymo sistemos dinamikos kokybę. Tačiau elektromechaninės valdymo sistemos ne tik visuomet yra veikiamos tam tikros vertės apkrova, bet dažnai dar ir turi keisti sukimosi greitį, todėl reikalinga nustatyti greičio regulatoriaus valdymo dėsnio perjungimo laiko priklausomybę kartu nuo greičio nustatymo signalo ir statinės apkrovos. Žinoma, kad elektromechaninės valdymo sistemos statinė apkrova yra sunkiai išmatuojamas dydis. Šią problemą išspręsti galima panaudojus Luenbergerio stebiklį [3]. **Tikslas** – ištyrėti elektromechaninės greičio valdymo sistemos dinamikos kokybės pagerinimo metodą, pagrįstą P-PI keičiamos struktūros greičio reguliatoriumi.

### Uždaviniai:

1. Pagal tiesioginį kokybės rodiklį – reguliavimo trukmę nustatyti geriausią elektromechaninės greičio valdymo sistemos dinamikos kokybę, užtikrinančią regulatoriaus perjungimo paramet-

ro priklausomybę nuo nuostato signalo vertės ir statinės apkrovos.

2. Elektromechaninės sistemos statinei apkrovai nustatyti pereinamojo proceso metu pritaikyti Luenbergerio stebiklį, imituojant keičiamos struktūros greičio regulatoriaus realizavimą kompiuterine programa.

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

## Modelio sudarymas

Siekiant rezultatų universalumo ir pritaikomumo įvairiose elektromechaninėse valdymo sistemose, pagal struktūrinę schemą (1 pav.) buvo sudarytas apibendrintas (vienetinių verčių) elektromechaninės valdymo sistemos modelis MATLAB / Simulink programa.

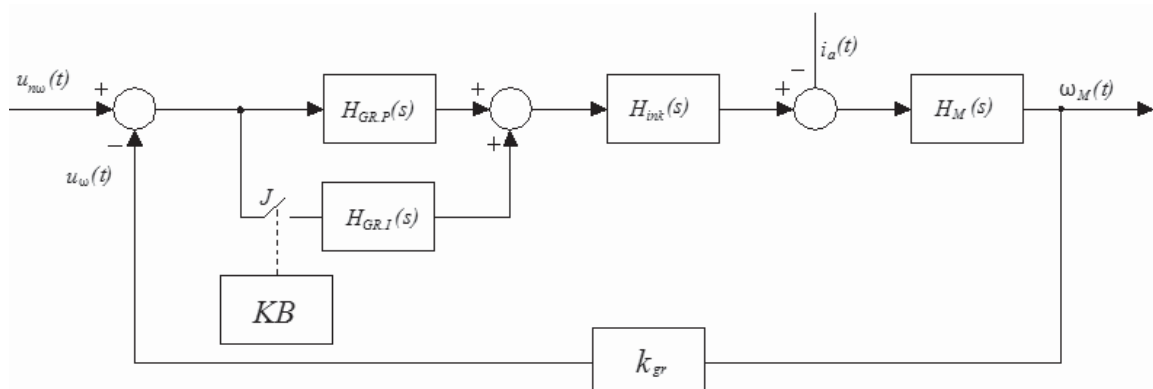
Elektromechaninės valdymo sistemos struktūrinę schemą (1 pav.) sudaro keičiamos struktūros greičio reguliatorius, formuojantis P valdymo dėsnį

$$H_{GR,P}(s) = k_p, \quad (1)$$

ir I valdymo dėsnį

$$H_{GR,I}(s) = \frac{k}{s}; \quad (2)$$

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



1 pav. Elektromechaninės valdymo sistemos struktūrinė schema

$$H_{ink}(s) = \frac{k_{ink}}{T_{ink} \cdot s + 1}; \quad (3)$$

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

$$H_M(s) = \frac{k_M}{s}; \quad (4)$$

čia  $k_M$  – variklio mechaninės dalies koeficientas.

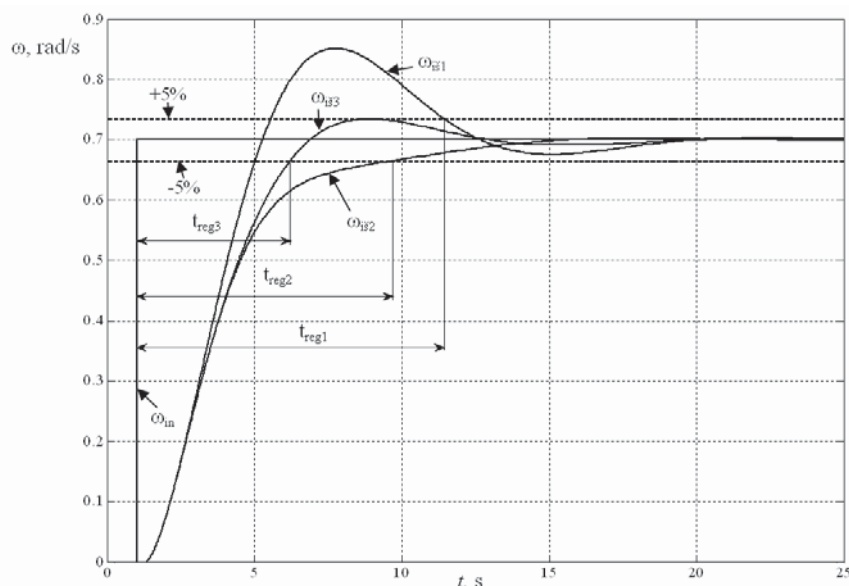
Paveikus šuoliniam sistemos valdymo signalui  $u_{no}$  greičio reguliatorius jungiamas P valdymo dėsniumi. Praėjus tam tikram laikui – P valdymo dėsnio trukmei, siekiant išvengti pernelyg didelio greičio  $\omega_M$  dinaminio nuokrypio ir kartu siekiant išvengti greičio statinio nuokrypio, pasibaigus pereinamajam procesui, sudarytuju greičio reguliatoriaus valdy-

mo dėsnio komutavimo bloku (KB) įjungiamas integruojantis kanalas, greičio reguliatorius tuomet įjungiamas PI valdymo dėsniumi.

### Geriausių reguliatoriaus perjungimo momentų nustatymas

Elektromechaninės valdymo sistemos su keičiamos struktūros greičio reguliatoriumi dinamikos kokybę įvertinama tiesioginiu kokybės rodikliu – reguliavimo trukme [4, 5]. Reguliavimo trukmė  $t_{reg}$  – tai laikas, per kurį greičio dinaminis nuokrypis pasiekia 5 % ribą ir vėliau nebeviršija jos (2 pav.).

Tyrimas atliktas keičiant greičio reguliatoriaus perjungimo iš P valdymo dėsnio į PI momentą ir stebint reguliavimo trukmės vertę. Kuo mažesnė rodiklio vertė, tuo sistemos pereinamasis procesas yra geresnės kokybės. Minimali reguliavimo trukmės vertė nurodo greičio reguliatoriaus perjungimo laiką, užtikrinantį geriausią elektromechaninės valdymo sistemos dinamikos kokybę (2 pav.).



**2 pav.** Elektromechaninės valdymo sistemos greičio pereinamojo proceso įvertinimas tiesioginiu kokybės rodikliu – reguliavimo trukmė

Atrinkus reguliavimo trukmės minimumus atitinkančias reguliatoriaus santykinio perjungimo laiko

$$T_{perj} = \frac{t_{perj}}{T_{ink}}, \quad (5)$$

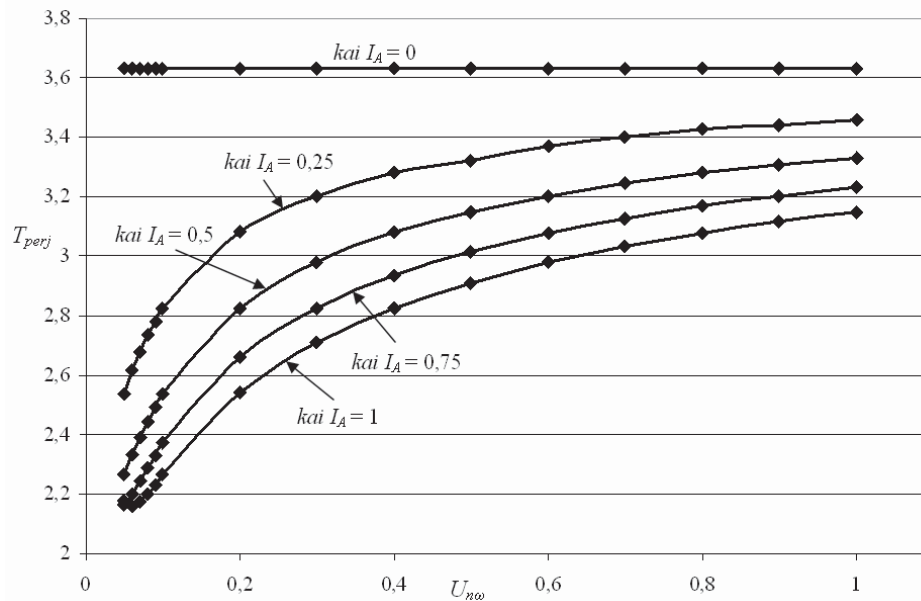
vertes prie skirtingų santykinės statinės apkrovos srovės

$$I_A = \frac{I_a}{I_{amax}}; \quad (6)$$

ir santykinio greičio nuostato signalo

$$U_{no} = \frac{u_{no}}{u_{no\ max}}; \quad (7)$$

verčių, buvo sudarytos santykinio perjungimo laiko, užtikrinančio geriausią elektromechaninės valdymo sistemos dinamikos kokybę, priklausomybės nuo santykinio greičio nuostato signalo ir santykinės statinės apkrovos srovės (3 pav.). (5)–(7) išraiškose  $I_{amax}$  – maksimali statinės apkrovos srovės vertė;  $t_{perj}$  – greičio reguliatoriaus struktūros perjungimo laikas, užtikrinantis geriausią konkretios elektromechaninės valdymo sistemos dinamikos kokybę;  $u_{no\ max}$  – maksimali greičio nuostato signalo vertė.



**3 pav.** Santykinio perjungimo laiko, užtikrinančio geriausią elektromechaninės valdymo sistemos dinamikos kokybę, priklausomybės nuo santykinio greičio nuostato signalo ir santykinės statinės apkrovos srovės

Nustatytosios greičio regulatoriaus geriausių perjungimo momentų priklausomybės nuo nuostato signalo ir statinės apkrovos [6] (3 pav.) yra universalios, pritaikomos įvairioms elektromechaninėms valdymo sistemoms. Pakanka žinoti sistemos inkaro srovės valdymo kontūro laiko pastoviąją  $T_{ink}$  ir galima pagal (5) išraišką apskaičiuoti tinkamiausią greičio regulatoriaus perjungimo iš P valdymo dėsnio į PI laiko momentą.

### Keičiamos struktūros greičio regulatoriaus realizavimas

Keičiamos struktūros greičio regulatoriaus realizavimas – automatinis geriausio regulatoriaus perjungimo momento parinkimas. Atliktų tyrimų rezultatai (3 pav.) yra universalūs ir buvo pritaikyti nuolatinės srovės elektros varikliui, kurio parametrai:  $n_N = 1530$  aps/min,  $U_N = 280$  V,  $P_N = 3,2$  kW,  $M_N = 20$  Nm,  $I_N = 14,5$  A,  $J = 0,02$  kg·m<sup>2</sup>.

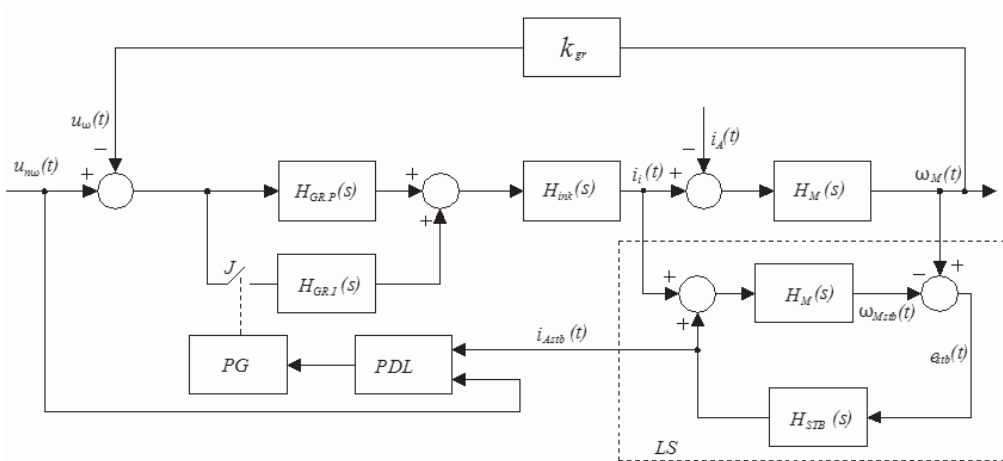
Remiantis pateiktais duomenimis ir struktūrine schema (4 pav.), buvo sudarytas nuolatinės srovės elektros pavaros modelis MATLAB / Simulink programa [6]. 4 pav. pateiktą struktūrinę schemą, be anksčiau aptartų elementų, sudaro programuojama duomenų lentelė PDL, kurioje įrašomos pritaikytos nagrinėjamai elektros pavarai geriausios greičio regulatoriaus perjungimo momentų priklausomybės nuo

nuostato signalo ir statinės apkrovos (3 pav.), pagal kurias perjungimo grandis PG įjungia integralinį regulatoriaus kanalą. Programuojama duomenų lentelė buvo sukonfigūruota pasinaudojus MATLAB / Simulink programos elementu Lookup Table 2-D.

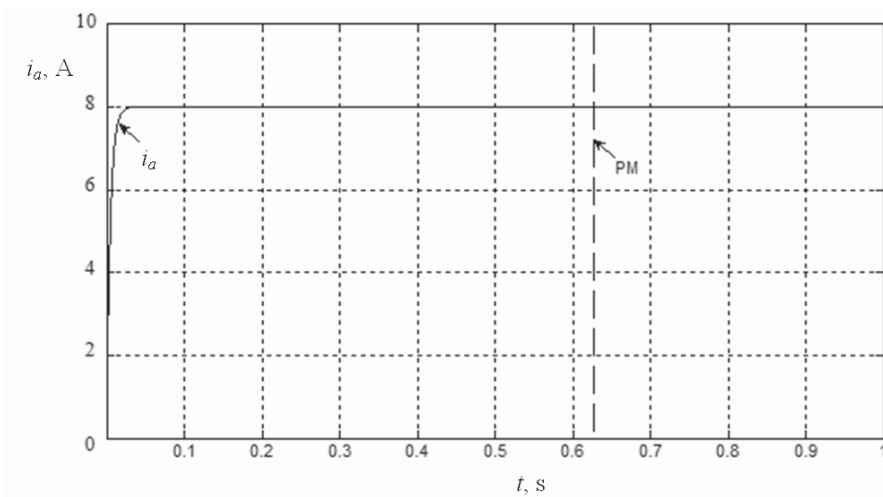
Apkrovos srovė yra sunkiai tiesiogiai išmatuojamas dydis, todėl jos įvertinimui pritaikytas Luenbergerio stebiklis LS [3]. Į vieną iš Luenbergerio stebiklio įėjimų paduodama inkaro srovė  $i_i$ . Stebiklio grandis  $H_M(s)$  yra identiška greičio valdymo sistemos mechaninei daliai –  $H_M(s)$ . Stebiklio nuokrypis  $e_{stb}(t)$  suformuojamas tarp išmatuoto variklio greičio  $\omega_M$  ir gaunamo variklio greičio stebiklyje  $\omega_{Mstb}$  skirtumo. Stebiklio kompensatoriaus (naudojamo stebiklyje gaunamo nuokrypio sumažinimui) perdavimo funkcija

$$H_{STB}(s) = k_{STB}; \quad (8)$$

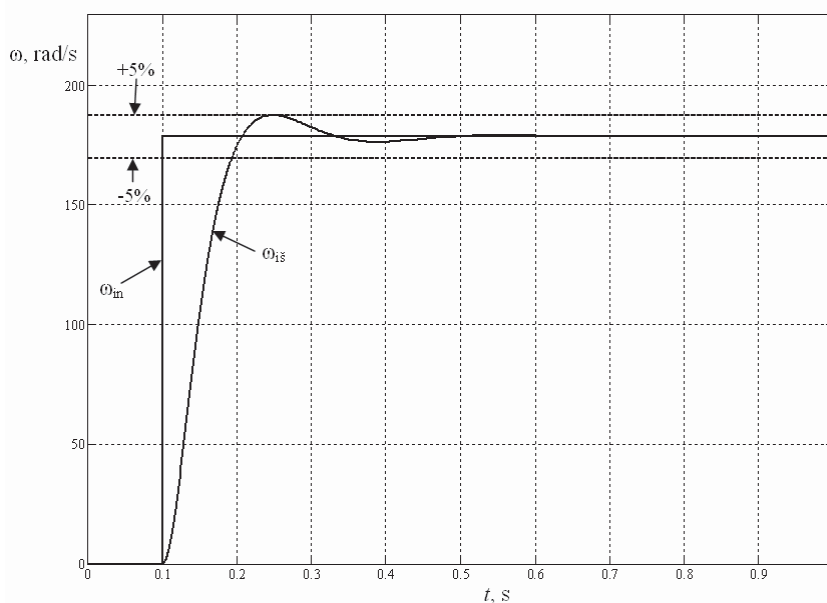
čia  $k_{STB}$  – stebiklio stiprinimo koeficientas, kuris nagrinėjamu atveju buvo parinktas lygus 3. Siekiant, kad programuojamoji duomenų lentelė parinktų tinkamą regulatoriaus perjungimo laiką, būtina gauti nusistovėjusią statinės apkrovos srovės vertę anksčiau nei įvyksta regulatoriaus valdymo dėsnio perjungimas (PM kreivė 5 pav.). Akivaizdu iš 5 pav., kad taip ir yra, todėl šis statinės apkrovos srovės signalas tinkamas perduoti iš Luenbergerio stebiklio į programuojamąją duomenų lentelę.



4 pav. Nuolatinės srovės elektros pavaros su keičiamos struktūros reguliatoriumi ir Luenbergerio stebikliu struktūrinė schema



5 pav. Statinės apkrovos srovės pereinamojo proceso kreivė, gaunama Luenbergerio stebikliu



6 pav. Nuolatinės srovės elektros pavaros su keičiamos struktūros reguliatoriumi ir Luenbergerio stebikliu greičio pereinamojo proceso kreivės

Nuolatinės srovės elektros pavaros su keičiamos struktūros reguliatoriumi ir Luenbergerio stebikliu greičio  $\omega_{is}$  pereinamojo proceso kreivė – reakcija į šuolinį greičio nustatymo signalą  $\omega_{in}$  (kuris yra  $u_{no}$  signalo atitikmuo) pateikta 6 pav. Kaip matyti iš 6 pav., greičio  $\omega_{is}$  dinaminis nuokrypis neviršija 5 % – tai yra visiškai priimtina ir daugelyje technologinių mechanizmų pageidaujama perreguliacijos vertė. Pasibaigus pereinamajam procesui nėra gaunama greičio statinio nuokrypio –  $\omega_{is}$  nusistovėjusi vertė lygi  $\omega_{in}$  nusistovėjusiai vertei. Ir tai galioja visame statinės apkrovos srovės ir greičio nuostato kitimo intervale.

### Išvados

1. Pagal tiesioginį dinamikos kokybės rodiklį – reguliavimo trukmę nustatyta geriausią elektromechaninės greičio valdymo sistemos dinamikos kokybę užtikrinanti reguliatoriaus perjungimo parametro priklausomybė nuo nuostato signalo vertės ir statinės apkrovos.
2. Atliktų tyrimų rezultatai rodo, kad, didėjant sistemos statinei apkrovai, greičio reguliatoriaus valdymo dėsnio perjungimo iš P į PI laikas mažėja; didėjant greičio nustatymo signalui (įėjimo signalui), greičio reguliatoriaus valdymo dėsnio perjungimo iš P į PI laikas ilgėja.
3. Elektromechaninės sistemos statinei apkrovai nustatyti pereinamojo proceso metu pritaikytas Luenbergerio stebiklis, kuriuo nusistovėjusi statinės apkrovos srovės vertė gaunama anksčiau nei įvyksta reguliatoriaus valdymo dėsnio perjungimas.
4. Reguliatoriaus perjungimo parametro priklausomybės nuo nuostato signalo vertės ir statinės apkrovos yra universalios ir buvo sėkmingai pritaikytos nuolatinės srovės elektros pavarai, pasinaudojus programuojama lentele imituojant automatinį greičio reguliatoriaus valdymo dėsnio perjungimą iš P į PI MATLAB / Simulink programa.

### Literatūra

1. Šulčius N., 2009, Kintamos struktūros greičio reguliatoriaus realizavimo elektromechaninėje vykdomo sistemoje tyrimas. *Jaunųjų mokslininkų darbai*. Nr. 3 (24). P. 132–136.
2. Šulčius N., Mikulskis A., 2009, Proporcinio - proporcinio integruojančio kintamos struktūros greičio reguliatoriaus tyrimas. *Jaunųjų mokslininkų darbai*. Nr. 3 (24). P. 137–141.
3. Ellis G., 2002, *Observers in control systems: a practical guide*. San Diego: Academic press.
4. Januševičius V. S., 2003, *Automatinis valdymas: teorija, uždaviniai, sprendimai*. Kaunas: Technologija.
5. Ivanauskas A., 2005, *Automatinio valdymo teoriniai pagrindai*. Kaunas: Technologija.
6. Malinauskas G., 2011, Elektromechaninės greičio stabilizavimo sistemos su keičiamos struktūros reguliatoriumi tyrimas. *Magistro darbas*. Šiaulių universitetas.

## RESEARCH ON ELECTROMECHANICAL SPEED CONTROL SYSTEM WITH VARIABLE STRUCTURE CONTROLLER

*Nerijus Šulčius, Giedrius Malinauskas*

### Summary

The article deals with a proportional (P) - proportional integral (PI) variable structure speed controller intended for improvement of the quality of dynamics of electromechanical control systems. Using a direct indicator of quality of dynamics (the duration of controlling), the dependence of controller switching parameter on the static load and the command input signal was determined, which ensures the best quality of dynamics of the electromechanical speed control system. The Luenberger observer has been applied for the estimation of static load during the transient process of the electromechanical control system. The simulation results obtained using MATLAB/Simulink software demonstrate that P-PI variable structure speed controller implemented with Lookup Table 2-D ensures the dynamical deviation of speed of the direct current electric drive which does not exceed  $\pm 5\%$  and the zero steady-state deviation of speed.

**Keywords:** electromechanical control system, speed controller, variable structure, Luenberger observer, lookup table.

## ELEKTROMECHANINĖS GREIČIO VALDYMO SISTEMOS SU KEIČIAMOS STRUKTŪROS REGULIATORIUMI TYRIMAS

*Nerijus Šulčius, Giedrius Malinauskas*

### Santrauka

Straipsnyje nagrinėjamas proporcinis (P) – proporcinis integruojantis (PI) keičiamos struktūros greičio reguliatorius, skirtas elektromechaninių valdymo sistemų dinamikos kokybei pagerinti. Pagal tiesioginį dinamikos kokybės rodiklį – reguliavimo trukmę nustatyta geriausia elektromechaninės greičio valdymo sistemos dinamikos kokybę užtikrinanti reguliatoriaus perjungimo parametro priklausomybė nuo nuostato signalo vertės ir statinės apkrovos. Elektromechaninės valdymo sistemos statinei apkrovai nustatyti pereinamojo proceso metu pritaikytas Luenbergerio stebiklis. Modeliavimo rezultatai MATLAB / Simulink programa rodo, kad P-PI keičiamos struktūros greičio reguliatorius, realizuotas programuojama lentele (Lookup Table 2-D), užtikrina nuolatinės srovės elektros pavaros greičio dinaminį nuokrypį, neviršijantį  $\pm 5\%$  ir nulinį greičio statinį nuokrypį.

**Prasminiai žodžiai:** elektromechaninė valdymo sistema, greičio reguliatorius, keičiama struktūra, Luenbergerio stebiklis, programuojamoji lentelė.

[teikta 2011-06-17