

Elektromechaninių vykdyimo sistemų su kintamos struktūros reguliatoriais dinamikos kokybės tyrimas

N. Šulčius, V. A. Geleževičius

Valdymo technologijų katedra, Kauno technologijos universitetas,

Studentų g. 48, LT-51367 Kaunas, Lietuva; tel. +370 37 300291, el. p.: n.sulcius@tf.su.lt; Vilius.Gelezevicius@ktu.lt

Ivadas

Nusistovėjęs elektromechaninių vykdyimo sistemų (elektros pavarų) greičio reguliavimo kontūrų derinimo būdas yra pagrįstas kiekybinio arba simetrinio optimumo kriterijų taikymu [1,2,3]. Reguliavimo kontūras, suderintas pagal kiekybinio optimumo principą, turi proporcinį (P) valdymo dėsnį formuojantį greičio reguliatorių. Tuomet gaunama optimali greičio reguliavimo kontūro reakcija į šuolinį valdymo poveikį, tačiau, veikiant trikdžiui (apkrovai), atsiranda statinis greičio nuokrypis.

Norint panaikinti trikdžio sukeltą statinį greičio nuokrypį, reguliatoriaus valdymo dėsnis modifikuojamas į proporcinį-integruojantįjį (PI), reguliavimo kanalą papildant integratoriumi. Paprastai toks reguliatorius derinamas simetriniam optimumui [1, 2, 3], tačiau dėl to pablogėja pavaros dinaminė kokybė (padidėja dinaminis nuokrypis, pailgėja reguliavimo trukmė).

Norint suderinti šių dviejų greičio reguliavimo sistemų pranašumus (gerą dinamiką pirmosios ir didelį statinį tikslumą antrosios) ir išvengti joms būdingų trūkumų (statinio nuokrypio pirmosios ir didelio dinaminio nuokrypio antrosios), pasiūlyta naudoti kintamos struktūros reguliatorių, kurio valdymo dėsnį esant pereinamiesiems režimams būtų galima keisti iš PI dėsnio į P dėsnį ir atvirkščiai.

Šio darbo tikslas – ištirti greičio reguliavimo sistemas su kintamos struktūros reguliatoriumi dinamikos formavimo galimybes ir nustatyti optimalius reguliatoriaus struktūros keitimo parametrus.

Greičio reguliatoriaus struktūros keitimo algoritmų aptarimas

Nuolatinės srovės elektros pavaros greičio reguliavimo kontūrą sudaro (1 pav.): automatiškai keičiamos struktūros greičio reguliatorius, formuojantis proporcinį (P)

$$H_{R1}(p) = k_{R\Omega} \quad (1)$$

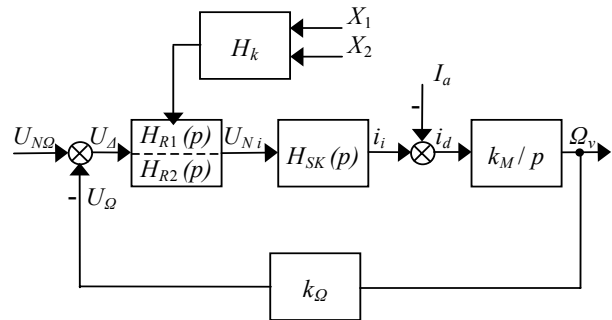
arba proporcinį-integruojantįjį (PI) valdymo dėsnį:

$$H_{R2}(p) = k_{R\Omega} \left(1 + \frac{1}{8T_k p}\right); \quad (2)$$

aperiodinis srovės reguliavimo kontūras

$$H_{SK}(p) = \frac{k_I}{2T_k p + 1}; \quad (3)$$

variklis, kurio mechaninės dalies perdavimo funkcija k_M/p ; greičio grįžtamasis ryšys k_Ω ir reguliatoriaus struktūros keitimo valdymo kanalas H_k . Čia $k_{R\Omega}$ – proporcinio (P) greičio reguliatoriaus perdavimo koeficientas, k_I – srovės kontūro perdavimo koeficientas, T_k – galios keitiklio laiko pastovioji.



1 pav. Greičio reguliavimo kontūro su automatiškai keičiamos struktūros reguliatoriumi struktūrinė schema

Siekiant maksimalios greitaiveikos, pradiniu pereinamojo proceso momentu (paveikus valdymo signalui $U_{N\Omega}$), greičio reguliatorius jungiamas PI valdymo dėsniumi. Tai lemia forsuoatą variklio greitėjimą. Tam tikru momentu, norint išvengti pernelyg didelio dinaminio greičio nuokrypio, reguliatoriaus integruojantysis valdymo kanalas išjungiamas, integratorius iškraunamas ir reguliatorius perjungiamas P valdymo dėsniumi. Pereinamajam procesui artėjant prie pabaigos vėl įjungiamas integruojantysis valdymo kanalas, reguliatorius vėl tampa PI reguliatoriumi, panaikinančiu statinį nuokrypį.

Nagrinėjami du nesunkiai techniškai sudaromi struktūros keitimo algoritmai:

- kai reguliatoriaus struktūros perjungimo iš PI į P valdymo dėsnį ir atgal, parametrai X_1 ir X_2 formuojami nepriklausomai vienas nuo kito;
- kai reguliatoriaus struktūra iš PI į P valdymo dėsnį ir atvirkščiai perjungiamas, kontroliuojant vieno parametro nustatytąją vertę.

Pirmuoju atveju perjungimo parametrai X_1 ir X_2 gali būti formuojami matuojant dinaminį nuokrypį U_d ar variklio inkaro srovę i_i pereinamojo proceso metu arba programuojami laikui bėgant. Regulatoriaus struktūrai automatiškai keisti sudarytas valdymo kanalas H_k formuoja komutavimo funkciją pagal sąlygą

$$F_k = \begin{cases} 1, & \text{kai } x_1 \geq X_1 \text{ ir } x_2 < X_2, \\ 0, & \text{kai } x_1 < X_1 \text{ arba } x_2 \geq X_2; \end{cases} \quad (4)$$

čia X_1, X_2 – perjungimo parametrų nuostatos; x_1, x_2 – momentinės perjungimo parametrų vertės.

Antruoju atveju perjungimo (valdymo dėsnio keitimo) parametras yra variklio inkaro srovė i_i [4, 5]. Tuomet komutavimo funkcija formuojama pagal sąlygą

$$F_k = \begin{cases} 1 \forall \Delta = i_i(t) - I_{perj} \geq 0, \\ 0 \forall \Delta = i_i(t) - I_{perj} < 0; \end{cases} \quad (5)$$

čia I_{perj} – perjungimo srovės nuostata.

Reikia nustatyti regulatoriaus struktūros perjungimo parametrų vertes, kurios, esant pereinamajam režimui, garantuoja geriausią dinaminio proceso kokybę.

Optimalių regulatoriaus struktūros keitimo parametrų nustatymo metodika

Pereinamojo proceso kokybei kiekybiškai įvertinti parinktas ITAE (Integral of Time multiplied by Absolute Error) [6, 7] integralinis kokybės kriterijus:

$$J = \int_0^{t_{reg}} t \cdot |\Delta x(t)| dt; \quad (6)$$

čia $|\Delta x(t)| = |x(t) - x(\infty)|$ – reguliuojamo parametro nuokrypio modulis; t_{reg} – reguliavimo trukmė: laikas per kurį reguliuojamo parametro nuokrypis pasiekia 5% ribą ir vėliau jos nebeviršija. Šis kriterijus įvertina ne tik valdomos koordinatės integralinį nuostatą neatitikimą pereinamojo režimo metu, bet ir pereinamojo režimo trukmę. Kuo mažesnė kriterijaus vertė, tuo pereinamasis procesas yra geresnės kokybės.

Dinamikos kokybės kitimo charakteristikoms sudaryti ir palyginti su tradicinės struktūros vykdymo sistemos kokybe formuojamas santykinis kokybės kriterijus:

$$Q = \frac{J_{KS}}{J_{SO}}; \quad (7)$$

čia J_{KS} – elektros pavaros su kintamos struktūros greičio regulatoriumi integralinis kriterijus (6); J_{SO} – elektros pavaros su PI greičio regulatoriumi, suderintu simetriniam optimumui, integralinis kriterijus (6).

Perjungimo parametras – variklio inkaro srovė, kokybės kitimo charakteristikose vaizduojama santykiniu dydžiu:

$$\alpha = \frac{i_i}{I_{SO \max}}; \quad (8)$$

čia i_i – momentinė variklio inkaro srovės vertė; $I_{SO \max}$ – elektros pavaros, suderintos pagal simetrinio optimumo kriterijų, inkaro grandinės maksimali srovės vertė.

Kai perjungimo parametrai formuojami nepriklausomai vienas nuo kito, pirmuoju struktūros perjungimo parametru (X_1) laikoma variklio pereinamojo režimo inkaro srovė i_i , o antruoju (X_2) – dinaminis nuokrypis U_d . Siekiant nustatyti geriausius regulatoriaus struktūros perjungimo momentus, atliktas toks tyrimų ciklas: užfiksavus pirmojo parametro vertę, modeliuojamas procesas su vis kita antrojo parametro verte, kiekvieną kartą nustatant santykinio kokybės kriterijaus vertę. Išrenkama tokia antrojo parametro vertė, kuriai esant pasiekama mažiausia santykinio kriterijaus vertė. Po to tyrimas kartojamas su kita pirmojo parametro verte ir vėl išrenkama geriausia antrojo parametro vertė. Tyrimas tęsiamas tol, kol pereinama visa pirmojo parametro verčių skalė, o gautoji mažiausia santykinio kriterijaus vertė parodo geriausią perjungimo parametrų derinį.

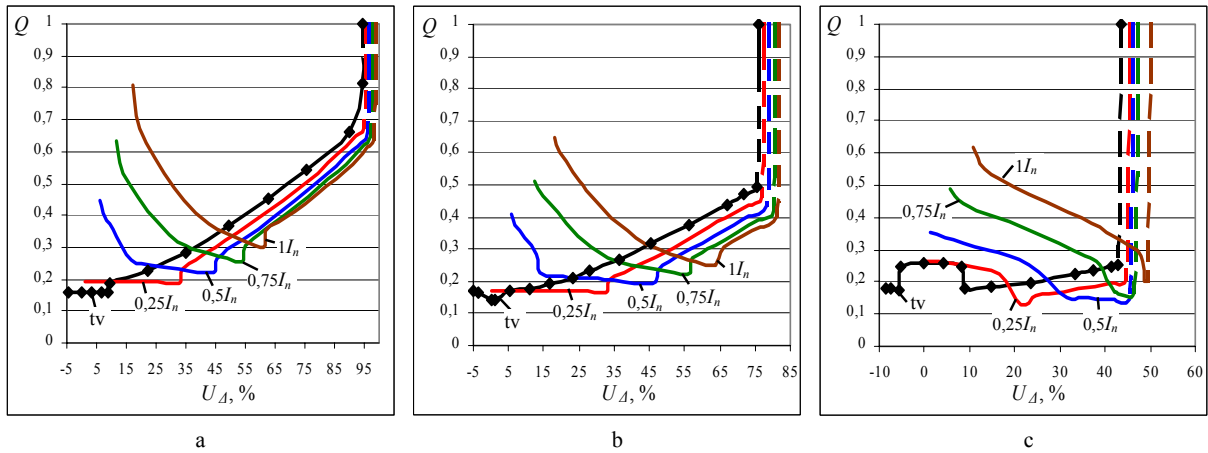
Kai struktūra perungiama pagal vieno parametro (nagrinėjamo atveju – variklio inkaro srovės i_i) vertę, tyrimas atliktas keičiant šį parametru nuo nulio iki galimos maksimalios jo vertės: $i_{i \max} = I_{SO \max}$ (parametro keitimas charakteristikose vaizduojamas santykiniu dydžiu α). Kiekvienu atveju nustačius santykinio kokybės kriterijaus vertę, sudaroma charakteristika, leidžianti nustatyti geriausią struktūros perjungimo parametro vertę.

Tyrimas atliktas modeliuojant sistemą su kintamos struktūros regulatoriumi, naudojant programų paketą CENTAURUS [8]. Sistema suderinta 2PI serijos nuolatinės srovės elektros variklio parametrus [2]: $n_n = 1500$ aps/min; $P_n = 0,28$ kW; $I_n = 1,82$ A; $U_n = 220$ V; $M_n = 1,76$ Nm.

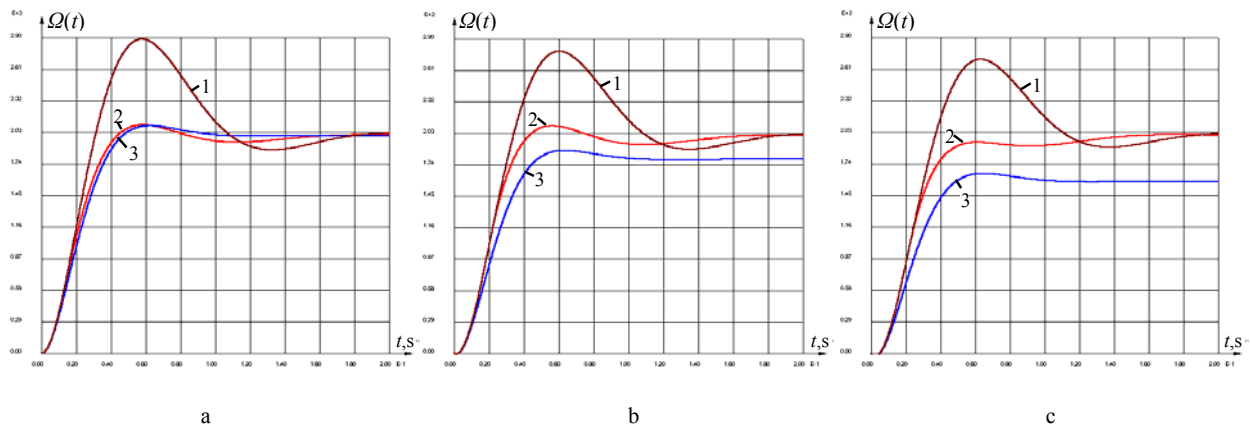
Modeliavimo rezultatai

Tyrimas atliktas dviem atvejais: tuščiosios veikos ir veikiant statinei apkrovai.

Kai perjungimo parametrai formuojami nepriklausomai vienas nuo kito, $Q = f(U_d)$ charakteristikos (2 pav.) rodo santykinės kokybės kitimą kintant antrajam perjungimo parametru – dinaminiam nuokrypiui, kai pirmasis parametras (inkaro srovė) nekito. Kiekvienos charakteristikos (2 pav.) mažiausią Q vertę atitinkantis antrasis perjungimo parametras ir atitinkamas pirmasis sudaro geriausius perjungimo parametrų derinius, garantuojančius geriausios kokybės pereinamąjį procesą atitinkamo darbo režimo metu. Lyginant kriterijų, esant vienodoms apkrovų vertėms, ekstremalias vertes, matyti, kad visais atvejais geriausia kokybė pasiekama, kai pirmasis perjungimo parametras $\alpha = 1$, t.y. kai iš PI dėsnio į P perungiama esant $i_i = i_{i \max} = I_{SO \max}$ (2 pav. – c kreivės). Didėjant statinei apkrovai, trumpėja P dėsnio veikimo trukmė (2 pav.). Kai abiejų perjungimo parametrų laikai sutampa, gaunamas kriterijaus šuolis, sąlygotas dviejų ribinių situacijų: a) regulatorius į P dėsnį yra įjungiamas akimirksniškai, tačiau to užtenka integruojančiajam valdymo kanalui iškrauti; b) regulatorius neperungiama ir visame valdymo intervale išlieka PI dėsnis, atitinkantis simetrinį optimumą (kriterijaus šuolis iki $Q = 1$ pavaizduotas punktyrine linija).



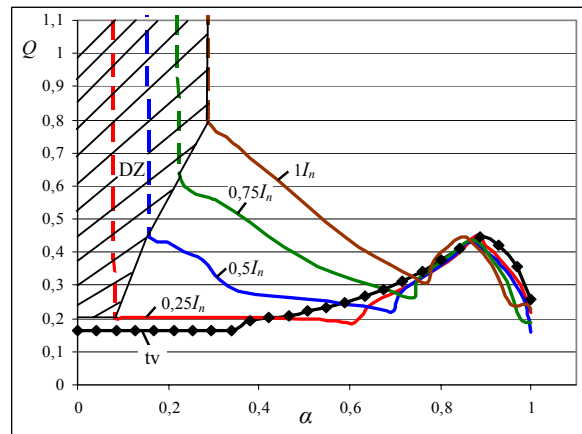
2 pav. Kokybės kitimas tuščiosios veikos (tv) ir statinės apkrovos ($I_a=0,25\div 1I_n$) metu, kai perjungimo parametrai formuojami nepriklausomai vienas nuo kito: a – kai $\alpha=0,5=\text{const}$, b – kai $\alpha=0,86=\text{const}$, c – kai $\alpha=1=\text{const}$



3 pav. Greičio pereinamojo proceso kreivės: a – tuščiosios veikos metu, b – kai statinė apkrova $I_a=0,5I_n$, c – kai statinė apkrova $I_a=1I_n$

Geriausios greičio pereinamojo proceso kreivės, gautos naudojant kintamos ir tradicinių struktūrų reguliatorius, yra pateiktos 3 pav. Tuščiosios veikos metu pavaros su kintamos struktūros reguliatoriumi pereinamojo proceso (3 pav., a, – 2 kreivė) dinaminis nuokrypis neviršija 5% (daug mažesnis nei pavaros, suderintos pagal simetrinio optimumo kriterijų – 1 kreivė), reguliavimo trukmė trumpesnė nei pavaros, suderintos pagal kiekybinio (3 kreivė) bei simetrinio optimumų kriterijus. Veikiant statinei apkrovai, pavaros su kintamos struktūros reguliatoriumi pereinamojo proceso (3 pav., b, c – 2 kreivė) tiek greičio dinaminis nuokrypis (neviršija 5%), tiek reguliavimo trukmė gaunami daug mažesni nei pavaros suderintos pagal simetrinio optimumo kriterijų (1 kreivė). Be to, nėra statinio greičio nuokrypio, kas būdinga pavarai, suderintai pagal kiekybinio optimumo kriterijų (3 kreivė).

Kai perjungiamą pagal vieną parametru, $Q=f(\alpha)$ charakteristikos (4 pav.) rodo, kaip kinta santykinė kokybė, kintant perjungimo parametru – inkaro srovei (kuri pavaizduota santykiniu dydžiu α). Kai $\alpha=0$, tuomet Q vertė tuščiosios veikos charakteristikoje (4 pav.) atitinka pavaros, suderintos pagal kiekybinio optimumo kriterijų, santykinę kokybę. Nustatyta Q kriterijaus divergavimo



4 pav. Kokybės kitimas tuščiosios veikos (tv) ir statinės apkrovos ($I_a=0,25\div 1I_n$) metu, kai perjungiamą pagal vieną parametru

zona DZ (4 pav. užbrūkšniuota), atsirandanti veikiant statinei apkrovai, kai perjungimo parametras $0\leq i_i < 1,5I_a$, nes tuomet reguliatorius iš P į PI dėsnį neperjungiamas. Tai atitinka pavarą, suderintą pagal kiekybinio optimumo kriterijų. Veikiant statinei apkrovai, geriausias

pereinamasis procesas gaunamas, kai $i_r = i_{i_{\max}} = I_{SO_{\max}}$ (t. y. $\alpha=1$; 4 pav.).

Lyginant abu reguliatoriaus struktūros keitimo algoritmus, matyti, kad veikiant statinei apkrovai, geriausia pereinamojo proceso kokybė būna vienoda (2 pav. – c, 4 pav.). Sutampa ir perjungimo parametrų vertės: $\alpha=1$ ir greičio kreivės gaunamos identiškos. Tuščiosios veikos metu, kai perjungimo parametrai formuojami nepriklausomai vienas nuo kito, gaunamas šiek tiek geresnės kokybės pereinamasis procesas nei kai perjungiamas pagal vieną parametą (2 pav. – b, 4 pav.).

Išvados

1. Išnagrinėtas būdas elektromechaninių vykdymo sistemų dinamikos kokybei pagerinti, naudojant kintamos struktūros reguliatorių, kurio valdymo dėsnis pereinamojo proceso metu automatiškai keičiamas iš proporcinio-integrojančiojo (PI) į proporcinį (P) ir atvirkščiai.

2. Nustatyta, kad, naudojant kintamos struktūros reguliatorių galima padidinti greitaveiką ir išvengti statinio greičio nuokrypio, t. y. pagerinti dinamikos kokybę.

3. Ištirti du reguliatoriaus struktūros keitimo algoritmai ir nustatytos optimalios reguliatoriaus struktūros keitimo parametrų vertės.

4. Nustatyta, kad, veikiant statinei apkrovai, abiem reguliatoriaus struktūros keitimo atvejais geriausia pereinamojo proceso kokybė pasiekama, kai PI – P struktūra perjungiamas esant maksimaliairovei $i_{i_{\max}}$. Kai perjungimo parametrai formuojami nepriklausomai vienas

nuo kito, reguliatoriaus P dėsnio palaikymo trukmė, didėjant statinei apkrovai, trumpėja.

Literatūra

1. **Geleževičius V., Kriščiūnas K., Kubilius V.** Elektros pavarų valdymo sistemos. – Vilnius: Mokslas, 1990. – 360 p.
2. **Справочник по автоматизированному электроприводу** / Под ред. Елисеева В.А. – Москва: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.
3. **Сен П.** Тиристорные электроприводы постоянного тока. – Пер. с англ. – Москва: Энергоатомиздат, 1985. – 232 с.
4. **Geleževičius V.A.** Dvikoordinatės vykdymo sistemos. – Kaunas: Technologija, 1997. – 86 p.
5. **Šulčius N., Geleževičius V.A.** Kintamos struktūros reguliatorių taikymas elektros pavarų greitaveikai didinti // Tarpt. konf. „Automatika ir valdymo technologijos 2004“ pranešimų medžiaga. – Kaunas: Technologija, 2004. – P. 114-118.
6. **Palm W.J.** Modeling, analysis, and control of dynamic systems. 2nd ed. – New York: John Wiley & Sons, 2000. – 854 p.
7. **Ерофеев А.А.** Теория автоматического управления. – Санкт-Петербург: Политехника, 1998. – 296 с.
8. **Bartkevičius S., Šarkauskas K.** Programinis paketas CENTAURUS. Modeliavimas, identifikavimas, optimizavimas. – Kaunas: Technologija, 2003. – 95 p.

Pateikta spaudai 2005 04 07

N. Šulčius, V.A. Geleževičius. Elektromechaninių vykdymo sistemų su kintamos struktūros reguliatoriais dinamikos kokybės tyrimas // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2005. – Nr.7(63). – P. 40–43.

Nagrinėjama elektromechaninė vykdymo sistema, kurioje, siekiant suderinti kiekybinio ir simetrinio optimumų teikiamus privalumus ir pašalinti jų trūkumus, pasiūlyta naudoti kintamos struktūros greičio reguliatorių, kurio valdymo dėsnis pereinamojo proceso metu automatiškai keičiamas iš proporcinio-integrojančiojo (PI) į proporcinį (P) ir atvirkščiai. Ištirti du reguliatoriaus struktūros keitimo algoritmai. Nustatytos optimalios reguliatoriaus struktūros keitimo parametrų vertės tuščiosios veikos metu ir veikiant statinei apkrovai. Pateikti modeliavimo rezultatai rodo, kad, naudojant kintamos struktūros greičio reguliatorių, galima padidinti elektros pavaros greitaveiką ir išvengti statinio greičio nuokrypio, t. y. pagerinti dinamikos kokybę. Il.4, bibl. 8 (lietuvių kalba; santraukos lietuvių, anglų ir rusų k.).

N. Šulčius, V.A. Geleževičius. Investigation of the Dynamical Quality of the Electromechanical Servo Systems using Variable Structure Controllers // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2005. – No. 7(63). – P. 40–43.

The electromechanical servo system is analysed in this article. In order to coordinate the advantages and eliminate disadvantages of the quantitative and symmetrical optimum conditions, a variable structure velocity controller is suggested to use. The control law of such velocity controller is changed automatically from the proportional-integrating (PI) regulation mode to the proportional (P) mode and vice versa in the transitional regime. Two algorithms of velocity controller control law changing were analysed. Optimum values of the control's law switching parameters are determined in the idle and static load cases. The simulation results demonstrate that using a variable structure velocity controller it is possible to increase the rapidity of the electric drive avoiding the steady-state velocity error, i.e. it is possible to improve the dynamical quality. Ill. 4, bibl. 8 (in Lithuanian; summaries in Lithuanian, English and Russian).

Н. Шульчюс, В.А. Гяляжявичюс. Исследование качества динамики электромеханических исполнительных систем с регуляторами переменной структуры // Электроника и электротехника. – Каунас: Технология, 2005. – № 7(63). – С. 40–43.

Проанализирована электромеханическая исполнительная система, в которой предлагается применить регулятор скорости переменной структуры, чтобы наладить преимущества и устранить недостатки количественного и симметричного оптимума. Закон управления такого регулятора в переходном процессе автоматически изменяется из пропорционально-интегрального (ПИ) в пропорциональный (П) и обратно. Проанализированы два алгоритма изменения структуры регулятора. Установлены оптимальные значения параметров изменения структуры регулятора в режиме холостого хода и при действии статической нагрузки. Результаты моделирования показывают, что при применении регулятора скорости переменной структуры можно повысить быстродействие электропривода, избегая статической ошибки скорости, т.е. можно существенно улучшить качество динамики системы. Ил. 4, библи. 8 (на литовском языке; резюме на литовском, английском и русском яз.).