

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS  
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS  
ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA

Andrius Mikulskis

KINTAMOSIOS STRUKTŪROS REGULIATORIŲ  
TAIKYMO ELEKTROMECHANINĖSE VYKDYMO  
SISTEMOSE TYRIMAS

Magistro darbas

**Vadovas**

lekt. dr. N. Šulčius

ŠIAULIAI, 2009

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS  
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS  
ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA

**TVIRTINU**

Katedros vedėjas

doc. dr. Teodoras Šimkevičius

2009 06

KINTAMOSIOS STRUKTŪROS REGULIATORIŲ  
TAIKYMO ELEKTROMECHANINĖSE VYKDYMO  
SISTEMOSE TYRIMAS

Magistro darbas

**Vadovas**

lekt. dr. N. Šulčius

2009 06

**Atliko**

EM-7 gr. stud.

A. Mikulskis

Recenzentas

ŠU Technologijos fakulteto

Elektros inžinerijos katedros

asist. G. Valiulis

2009 06 01

2009 06

ŠIAULIAI, 2009

## SUMMARY

Mikulskis A., Investigation of variable structure controllers application in the electromechanical servo systems: Master thesis of energetic engineer. Research advisor Lect. Dr. N. Šulčius; Šiauliai University, Technological Faculty, Electrical Engineering Department. – Šiauliai, 2009 54 p.

Classical dynamics optimization methods of the electromechanical servo drives are the quantitative and symmetrical optimums. These methods have advantages and disadvantages and are based on the fixed structure velocity controllers – proportional (P) and proportional-integrating (PI). In order to coordinate the advantages and eliminate disadvantages of the quantitative and symmetrical optimum methods have been investigated the P-PI variable structure velocity controller in the electromechanical servo drive. The P-PI variable structure velocity controller ensures that the dynamic error does not exceed 5 % and enables avoiding the static velocity error. According to the ITAE (Integral of Time multiplied by Absolute Error) quality indicator it was determined the control law switching parameter dependence on the static load ensuring the best dynamical quality of the electromechanical servo system. The investigations have been accomplished simulating the electromechanical servo system with P-PI variable structure velocity controller using MATLAB/Simulink program. It has been determined that P-PI variable structure velocity controller ensures from 60,7 % to 83,15 % better dynamical quality of the electromechanical servo system compared to the fixed structure controller (PI) of the symmetrical optimum. But using P-PI variable structure velocity controller the dynamical quality declines from 2,76 % to 13,67 % compared to the PI-P-PI variable structure velocity controller

## TURINYS

LENTELĖS .....	3
PAVEIKSLAI.....	4
ĮVADAS .....	7
1. AUTOMATINIO VALDYMO SISTEMŲ DINAMIKOS OPTIMIZAVIMAS TAIKANT KIEKYBINIO IR SIMETRINIO OPTIMUMŲ METODUS .....	8
1.1 Klasikiniai elektromechaninių vykdyimo sistemų dinamikos optimizavimo metodai.....	8
1.2 Elektromechaninės vykdyimo sistemos hierarchinio valdymo struktūra .....	12
1.3 Srovės reguliavimo kontūro optimizavimas taikant kiekybinio optimumo kriterijų.....	14
1.4 Greičio reguliavimo kontūro optimizavimas taikant simetrinio optimumo kriterijų .....	18
1.5 Elektromechaninė vykdyimo sistema su PI-P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi.....	22
2. ELEKTROMECHANINĖS VYKDYMO SISTEMOS SU P-PI KINTAMOS STRUKTŪROS REGULIATORIUMI TYRIMAS .....	25
2.1 Modelio sudarymas MATLAB/Simulink programa .....	25
2.2 Geriausią dinamikos kokybę užtikrinančio regulatoriaus perjungimo parametro priklausomybė nuo statinės apkrovos nustatymas .....	29
2.3 Elektromechaninės vykdyimo sistemos greičio pereinamųjų procesų kreivės.....	33
3. GAUTŲ DUOMENŲ PRITAIKYMAS NUOLATINĖS SROVĖS ELEKTROS PAVARAI.....	40
3.1 Modeliuojamos nuolatinės srovės elektros pavaros parametrai .....	40
3.2 Nuolatinės srovės elektros pavaros modelis su realizuotu kintamos struktūros reguliatoriumi MATLAB/Simulink programa .....	40
3.3 Geriausią dinamikos kokybę užtikrinančio greičio regulatoriaus perjungimo parametro priklausomybė nuo statinės apkrovos.....	42
3.4 Nuolatinės srovės elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės .....	44
4. ELEKTROMECHANINĖS VYKDYMO SISTEMOS SU PASTOVIOS IR KINTAMOS STRUKTŪROS REGULIATORIAIS DINAMIKOS KOKYBĖS PALYGINIMAS .....	48
4.1 Apibendrintos elektromechaninės vykdyimo sistemos su pastovios ir kintamos struktūros regulatoriais dinamikos kokybės palyginimas.....	48
4.2 Nuolatinės srovės elektros pavaros su pastovios ir kintamos struktūros regulatoriais dinamikos kokybės palyginimas .....	50

IŠVADOS.....	52
LITERATŪRA.....	53

**LENTELĖS**

2.1 lentelė. Elektromechaninės vykdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi perjungimo parametro vertės užtikrinančios geriausią dinamikos kokybę esant įvairioms statinėms apkrovoms.

4.1 lentelė. Elektromechaninės vykdymo sistemos dinamikos kokybės palyginimas.

4.2 lentelė. Nuolatinės srovės elektros pavaros dinamikos kokybės palyginimas.

## PAVEIKSLAI

- 1.1 pav. Automatinio valdymo sistemos reguliavimo kontūro struktūrinė schema.
- 1.2 pav. Reguliavimo kontūro vienetinės šuolinės reakcijos.
- 1.3 pav. Atviro reguliavimo kontūro 1.1 pav., suderinto pagal kiekybinį (KO) bei simetrinį (SO) optimumą LADCH Bode diagramos.
- 1.4 pav. Atviro reguliavimo kontūro 1.1 pav., suderinto pagal kiekybinį (KO) bei simetrinį (SO) optimumą LFDCH Bode diagramos.
- 1.5 pav. Nuolatinės srovės elektros pavaros hierarchinio valdymo sistemos struktūrinė schema.
- 1.6 pav. Srovės reguliavimo kontūro struktūrinė schema.
- 1.7 pav. Nuolatinės srovės elektros pavaros greičio reguliavimo kontūro struktūrinė schema.
- 1.8 pav. Greičio reguliavimo kontūro, optimizuoto pagal kiekybinio optimumo kriterijų, kintamųjų reakcija į šuolinius  $u_{no}(t)$  ir  $i_a(t)$  signalų pokyčius.
- 1.9 pav. Greičio reguliavimo kontūro, optimizuoto pagal simetrinio optimumo kriterijų, kintamųjų reakcija į šuolinius  $u_{no}(t)$  ir  $i_a(t)$  signalų pokyčius.
- 1.10 pav. Nuolatinės srovės elektros pavaros greičio reguliavimo kontūro su įjungtu filtru  $H_F$  struktūrinė schema.
- 1.11 pav. Greičio pereinamojo proceso kreivės: a – tuščiosios veikos metu, b – kai statinė apkrova  $I_a=0,5I_n$ , c – kai statinė apkrova  $I_a=1I_n$  [8, 9].
- 1.12 pav.. Kokybės kitimas tuščiosios veikos ( $t_v$ ) ir statinės apkrovos ( $I_a=0,25\div 1I_n$ ) metu, kai perjungiamą pagal vieną parametą [8].
- 2.1 pav. Apibendrintas elektromechaninės vykdymo sistemos modelis MATLAB/Simulink programos aplinkoje.
- 2.2 pav. Elektromechaninės vykdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi reguliavimo laiko priklausomybė nuo reguliatoriaus struktūros perjungimo laiko.
- 2.3 pav. Elektromechaninės vykdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi ITAE rodiklio priklausomybė nuo reguliatoriaus struktūros perjungimo laiko.
- 2.4 pav. Elektromechaninės vykdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi reguliavimo laiko  $t_{reg}$  priklausomybė nuo statinės apkrovos.
- 2.5 pav. Elektromechaninės vykdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi ITAE integralinio rodiklio priklausomybė nuo statinės apkrovos.

2.6 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi P valdymo dėsnio veikimo trukmės  $t_{perj.l}$  priklausomybė nuo statinės apkrovos.

2.7 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi universali P valdymo dėsnio veikimo trukmės  $t^*_{perj.l}$  priklausomybė nuo statinės apkrovos.

2.8 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi pereinamojo proceso kreives esant pastoviai statinei 20 % apkrovai, P valdymo dėsnio veikimo trukmė yra 0,5 s.

2.9 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi pereinamojo proceso kreives esant pastoviai statinei 20 % apkrovai, P valdymo dėsnio veikimo trukmė yra 1 s.

2.10 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi pereinamojo proceso kreives esant pastoviai statinei 20 % apkrovai, P valdymo dėsnio veikimo trukmė yra 1,8 s.

2.11 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi pereinamojo proceso kreives esant pastoviai statinei 20 % apkrovai, P valdymo dėsnio veikimo trukmė yra 2,2629 s.

2.12 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi pereinamojo proceso kreives esant pastoviai statinei 20 % apkrovai, P valdymo dėsnio veikimo trukmė yra 3 s.

2.13 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi pereinamojo proceso kreives esant pastoviai statinei 20 % apkrovai, P valdymo dėsnio veikimo trukmė yra 3,5 s.

2.14 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai apkrova 0 %.

2.15 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai apkrova 5 %.

2.16 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai apkrova 10 %.

2.17 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai apkrova 15 %.

2.18 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai apkrova 20 %.

3.1 pav. Nuolatinės srovės elektros pavaros modelis su realizuotu kintamos struktūros reguliatoriumi.

3.2 pav. Elektros pavaros greičio valdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi P valdymo dėsnio veikimo trukmės priklausomybė nuo statinės apkrovos.

3.3 pav. Elektros pavaros greičio valdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi reguliavimo laiko priklausomybė nuo statinės apkrovos.

3.4 pav. Elektros pavaros greičio valdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi ITAE integralinio rodiklio priklausomybė nuo statinės apkrovos.

3.5 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai statinė apkrova 0 %.



3.6 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai statinė apkrova 5 %.

3.7 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai statinė apkrova 10 %.

3.8 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai statinė apkrova 15 %.

3.9 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai statinė apkrova 20 %.

4.1 pav. Elektromechaninės vykdymo sistemos su pastovios ir kintamos struktūros reguliatoriais dinamikos kokybės kitimas.

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

## IVADAS

Klasikinės elektros pavarų greičio reguliavimo sistemos yra derinamos kiekybiniam arba simetriniam optimumui [1, 2]. Tenkinant kiekybinio optimumo principą garantuojama optimali greičio reguliavimo kontūro reakcija į šuolinį valdymo poveikį (greičio dinaminis nuokrypis neviršija 5 %) , tačiau atsiranda apkrovos sąlygojama statinė greičio paklaida. Simetrinis optimumas garantuoja nulinę statinę paklaidą, bet išauga maksimali dinaminės paklaidos reikšmė ir pailgėja reguliavimo laikas. Siekiant suderinti kiekybinio ir simetrinio optimumų teikiamus privalumus bei pašalinti jų trūkumus, naudojami kintamos struktūros reguliatoriai. Jau yra ištirtas PI-P-PI kintamos struktūros reguliatorius [3], kuriame du kartus keičiamas valdymo dėsnis. Tačiau suderinti kiekybinio ir simetrinio optimumų teikiamus privalumus bei pašalinti jų trūkumus būtų galima atliekant tik vieną reguliatoriaus valdymo dėsnio keitimą. Todėl šiame darbe ir ištirtas P-PI kintamos struktūros reguliatorius.

**Darbo tikslas** – ištirti P-PI kintamos struktūros reguliatoriaus tinkamumą simetrinio ir kiekybinio optimumų privalumų suderinimui bei trūkumų pašalinimui.

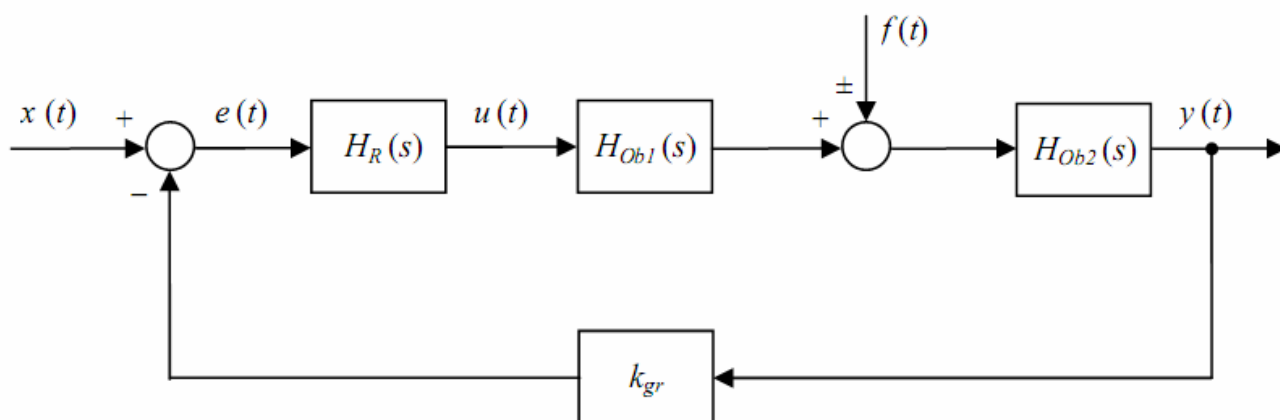
Darbo tikslui pasiekti išskelti šie **uždaviniai**:

1. Sudaryti apibendrintos elektromechaninės vykdymo sistemos su kintamos struktūros reguliatoriumi modelį MATLAB/Simulink programa.
2. Pagal pasirinktus kokybės rodiklius nustatyti geriausią elektromechaninės vykdymo sistemos dinamikos kokybę užtikrinančią reguliatoriaus perjungimo parametro priklausomybę nuo statinės apkrovos.
3. MATLAB/Simulink aplinkoje imituoti realizuoto P-PI kintamos struktūros reguliatoriaus funkcionavimą pasirinktoje konkrečioje elektromechaninėje vykdymo sistemoje.
4. Palyginti elektromechaninės vykdymo sistemos dinamikos kokybę gaunamą naudojant pastovios struktūros (PI), P-PI ir PI-P-PI kintamos struktūros reguliatorius.

# 1. AUTOMATINIO VALDYMO SISTEMŲ DINAMIKOS OPTIMIZAVIMAS TAIKANT KIEKYBINIO IR SIMETRINIO OPTIMUMŲ METODUS

## 1.1 Klasikiniai elektromechaninių vykdyto sistemų dinamikos optimizavimo metodai

Automatinio valdymo sistemų dinamikos optimizavimo metodai – kiekybinis ir simetrinis optimumai suformuoti vokiečių mokslininko Keslerio praėjusio amžiaus viduryje [4, 5]. Pasiūlytų dinamikos formavimo principų, pagrįstų sistemos dažninėmis charakteristikomis, taikymas ypač paplito elektromechaninėse judesio valdymo sistemose ir yra sėkmingai taikoma iki šių dienų. Tai yra universalūs sistemos optimizavimo metodai, kurie yra taikomi ir kitose automatinio valdymo sistemose, kaip vieni iš daugelio reguliatorių parinkimo ir derinimo būdų.



1.1 pav. Automatinio valdymo sistemos reguliavimo kontūro struktūrinė schema

Priimame, kad automatinio valdymo sistemos reguliavimo kontūro struktūrinė schema yra tokia kaip pateikta 1.1 pav., kurioje  $H_{Ob1}$ ,  $H_{Ob2}$  – valdymo objektą aprašančios perdavimo funkcijos,  $k_{gr}$  – sistemos grįžtamojo ryšio koeficientas. Nesant sistemoje papildomų įtaisų, sistemos valdymo kokybinės charakteristikos netenkina keliamų reikalavimų. Todėl norint pagerinti sistemos valdymo kokybinės charakteristikas reikalinga, nuosekliai valdymo objektui, įvesti reguliatorių (kompensatorių) su perdavimo funkcija  $H_R$ . Tačiau tuomet iškyla reguliatoriaus valdymo dėsnio parinkimo problema. Siekiant kiekybinio optimumo, automatinio valdymo sistemos reguliatoriaus perdavimo funkcija renkama taip, kad automatinio valdymo sistemos pertraukto (atviro) reguliavimo kontūro 1.1 pav., atstojamoji perdavimo funkcija įgytų tokį pavidalą [1, 2]:

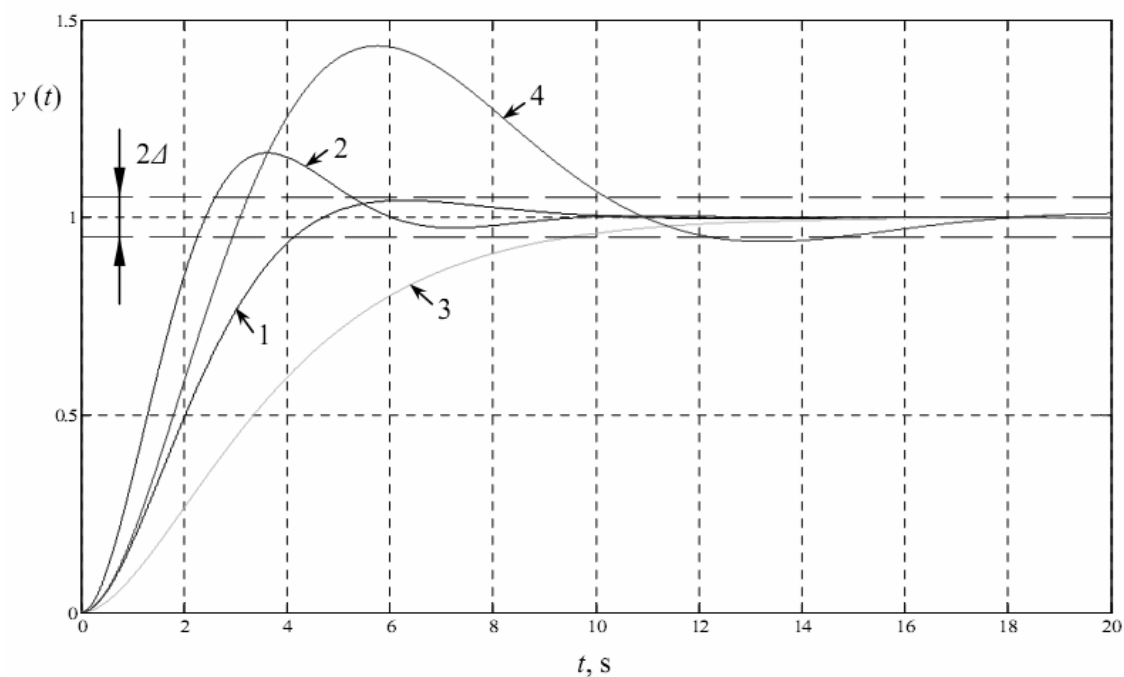
$$H_a(s) = \frac{1}{m \cdot T_\mu \cdot s \cdot (T_\mu \cdot s + 1)}; \quad (1.1)$$

čia  $m$  – pasirenkamas koeficientas;  
 $T_\mu$  – sistemos laiko pastovioji, s;  
 $s$  – kompleksinis (Laplaso) kintamasis.

Tada sujungto (uždaro) reguliavimo kontūro 1.1 pav. atstojamoji perdavimo funkcija:

$$H(s) = \frac{H_{RK}(s) \cdot k_{g.r.}^{-1}}{H_{RK}(s) + 1} = \frac{k_{g.r.}^{-1}}{m \cdot T_\mu \cdot s \cdot (T_\mu \cdot s + 1) + 1}; \quad (1.2)$$

čia  $H_{RK}(s)$  – nekoreguoto pertraukto reguliavimo kontūro perdavimo funkcija;  
 $k_{g.r.}$  – grįžtamojo ryšio stiprinimo koeficientas.



1.2 pav. Reguliavimo kontūro vienatinės šuolinės reakcijos

Darome prielaidą, kad sistemos pereinamasis procesas baigiasi, kai reguliuojamas kintamasis įeina į leistino nuokrypio sritį ir joje pasilieka (5% kriterijus):

$$|y(t) - y_{\infty}(t)| \leq \Delta = 0,05; \quad (1.3)$$

čia  $y(t)$  – momentinė reguliuojamojo kintamojo vertė;  
 $y_{\infty}(t) = x(t)$  – nusistovėjusi reguliuojamojo kintamojo vertė;  
 $\Delta$  – leistino nuokrypio sritis, 5 % .

Tuomet reguliavimo trukmė yra mažiausia:  $t_{regKO} = 4,14 \cdot T_{\mu}$ , kai (1.1) ir (1.2) išraiškose esantis koeficientas  $m = 2$ . Tokį atvejį atitinkanti reguliavimo kontūro 1.1 pav. vienetinė šuolinė reakcija yra parodyta 1.2 pav. 1 kreivė. Maksimalus dinaminis nuokrypis (maksimalus persvyris) tuomet siekia tik 4,32% ir reguliuojamas kintamasis  $y(t)$  pirmą kartą pasiekia nusistovėjusiąją vertę  $x(t) = 1(t)$  per  $4,7 \cdot T_{\mu}$  laiko tarpą. Kai  $m < 2$ , tuomet didėja maksimalus dinaminis nuokrypis ir dėl to ilgėja reguliavimo trukmė (1.2 pav. 2 kreivė, kai  $m = 1$ ). Kai  $m > 2$ , tuomet maksimalus dinaminis nuokrypis mažėja, tačiau ilgėja reguliavimo trukmė (1.2 pav. 3 kreivė, kai  $m = 4$ ). Todėl koeficiento reikšmė  $m = 2$  laikoma geriausia, kiekybiškai optimalia, o atviras reguliavimo kontūras, turintis atstojamąją perdavimo funkciją [1, 2]:

$$H_{KOa}(s) = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu} \cdot s \cdot (T_{\mu} \cdot s + 1)}; \quad (1.4)$$

vadinamas kiekybiškai optimaliu. Todėl norint, kad reguliavimo kontūras būtų kiekybiškai optimalus, įjungiamo regulatoriaus perdavimo funkcija turi būti [1]:

$$H_R(s) = \frac{H_{KOa}(s)}{H_{aNek}(s)}; \quad (1.5)$$

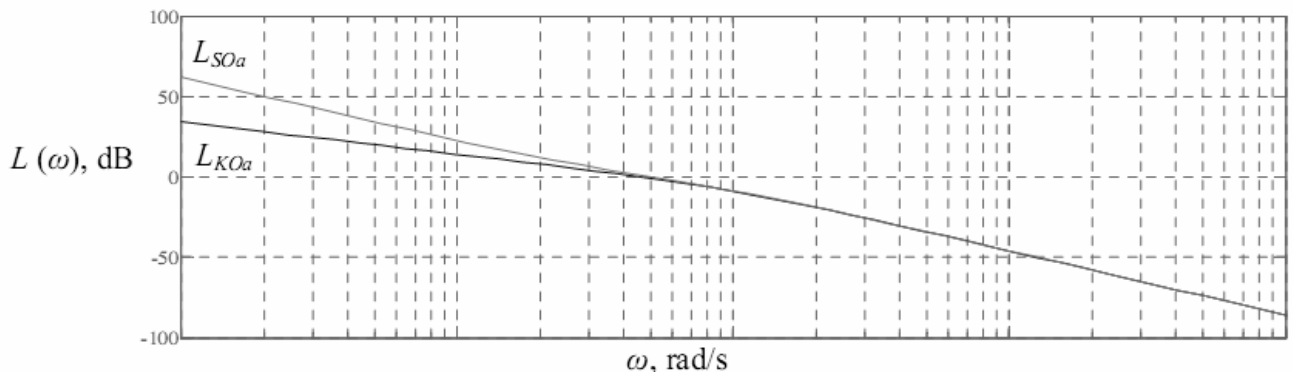
čia  $H_{aNek}(s)$  – atviro nekoreguoto (neturinčio regulatoriaus) reguliavimo kontūro atstojamoji perdavimo funkcija.

Kaip matyti iš (1.4) išraiškos, kiekybiškai optimalus reguliavimo kontūras turi vieną integruojančiąją grandį, todėl šuolinio įėjimo poveikio  $x(t)$  atžvilgiu, sistema yra pirmojo astatiškumo

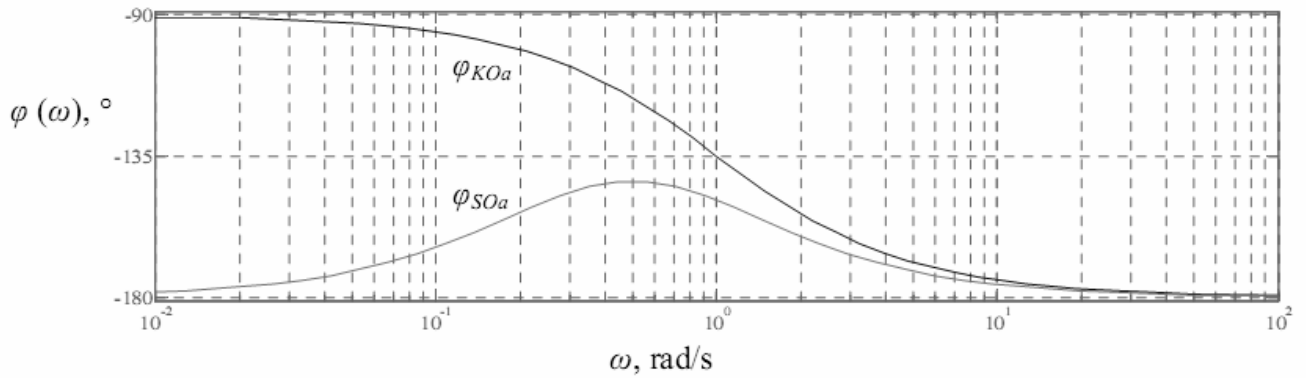
laipsnio – reakcijos  $y(t)$  dydis esant nusistovėjusiam režimui visiškai sutampa su šuolinio įėjimo poveikio verte. Trikdžio  $f(t)$  atžvilgiu 1.1 pav. toks reguliavimo kontūras yra astatinis tik tuomet, kai trikdys veikia už integruojančiosios grandies. Tais atvejais, kai integruojanti grandis yra paskutinė ( $H_{Ob2}(s)$  – 1.1 pav.) ir reguliatorius pagal kiekybinio optimumo sąlygą gaunamas proporcingasis ( $P$ ), tuomet trikdys, veikdamas tarp integruojančiosios grandies ir reguliatoriaus (1.1 pav.), sukelia statinį reguliuojamojo kintamojo  $y(t)$  nuokrypį nuo įėjimo poveikio  $x(t)$  vertės. Nuokrypis yra tuo mažesnis, kuo didesnis stiprinimo koeficientas grandžių, esančių tarp trikdžio veikimo vietos ir sumavimo įtaiso, tačiau nelygus nuliui. Visiškai panaikinti trikdžio sukeltą statinį nuokrypį, galima tikrai įvedus į reguliatorių papildomą integruojančiąją grandį. Tuomet atviro reguliavimo kontūro atstojamoji perdavimo funkcija įgyja pavidalą [1, 2]:

$$H_{SOa}(s) = \frac{1 + 4 \cdot T_{\mu} \cdot s}{4 \cdot T_{\mu} \cdot s} \cdot \frac{1}{2 \cdot T_{\mu} \cdot s \cdot (T_{\mu} \cdot s + 1)}; \quad (1.6)$$

ir kontūras tuomet yra vadinamas simetriškai optimaliu, nes jo Bode amplitudinė diagrama  $L_{SOa}$  1.3 , 1.4 pav. yra simetriška kirtimo (lūžio) dažnio atžvilgiu. Tačiau tai pablogina reguliavimo kontūro dinamines savybes: maksimalus dinaminis nuokrypis padidėja 10 kartų ir siekia 43,4% 1.2 pav. 4 kreivė, reguliavimo trukmė pailgėja 3,5 karto ( $t_{regSO} = 14,7 \cdot T_{\mu}$ ), lyginant su kontūru suderintu pagal kiekybinio optimumo sąlygą 1.2 pav. 1 kreivė.



1.3 pav. Atviro reguliavimo kontūro 1.1 pav., suderinto pagal kiekybinį (KO) bei simetrinį (SO) optimumą LADCH Bode diagramos



1.4 pav. Atviro reguliavimo kontūro 1.1 pav., suderinto pagal kiekybinį (KO) bei simetrinį (SO) optimumą LFDCH Bode diagramos

## 1.2 Elektromechaninės vykdymo sistemos hierarchinio valdymo struktūra

Hierarchinio (kaskadinio, angliškai – *cascade*) valdymo principas yra plačiai taikomas elektromechaninėse vykdymo sistemose. Daugiakontūrėje hierarchinio valdymo sistemoje kiekvienas valdomas kintamasis (koordinatė) turi savo reguliatorių. Kiekvieno pirmesnio (vidinio) kintamojo reguliavimo kontūras yra pavaldus paskesnio (išorinio) kintamojo reguliavimo kontūrai. Todėl tokioje sistemoje kiekvieno kintamojo reguliavimo kontūras yra optimizuojamas (suderinamas) atskirai, pradedant nuo mažiausio ir sparčiausiai veikiančio – vidinio ir baigiant išoriniu valdymo kontūru. Nuolatinės srovės elektros pavaros hierarchinio valdymo sistemos struktūrinė schema yra pavaizduota 1.5 pav. Priimame, kad galios keitiklio laiko pastovioji  $T_K$  yra daug mažesnė už variklio inkaro grandinės elektromagnetinę laiko pastoviąją  $T_{i\Sigma}$ , tuomet nuolatinės srovės elektros pavaros hierarchinio valdymo sistemoje 5 pav. mažiausias valdymo kontūras yra nuolatinės srovės nepriklausomo žadinimo elektros variklio inkaro srovės reguliavimo kontūras su srovės reguliatoriumi  $H_{SR}$ , galios keitikliu, apibūdinamu perdavimo funkcija [1, 2]:

$$H_K(s) = \frac{k_K K}{T_K \cdot s + 1}; \quad (1.9)$$

čia  $k_K$  – galios keitiklio stiprinimo koeficientas;  
 $T_K = L_k/R_k$  – galios keitiklio laiko pastovioji;  
 $L_k$  – galios keitiklio induktyvioji varža;

$R_k$  – galios keitiklio aktyvioji varža;

nuolatinės srovės nepriklausomo žadinimo elektros variklio inkaro grandinė [1]:

$$H_{ink}(s) = \frac{R_{i\Sigma}^{-1}}{T_{i\Sigma} \cdot s + 1}; \quad (1.10)$$

čia  $R_{i\Sigma} = R_i + R_k$  – bendra inkaro grandinės aktyvioji varža;  
 $T_{i\Sigma} = L_{i\Sigma} / R_{i\Sigma}$  – inkaro grandinės elektromagnetinė laiko pastovioji;  
 $L_{i\Sigma} = L_i + L_k$  – bendra inkaro grandinės induktyvioji varža;  
 $R_i$  – inkaro grandinės aktyvioji varža;  
 $L_i$  – inkaro grandinės induktyvioji varža;  
 $k_I$  – srovės grystamojo ryšio stiprinimo koeficientas.

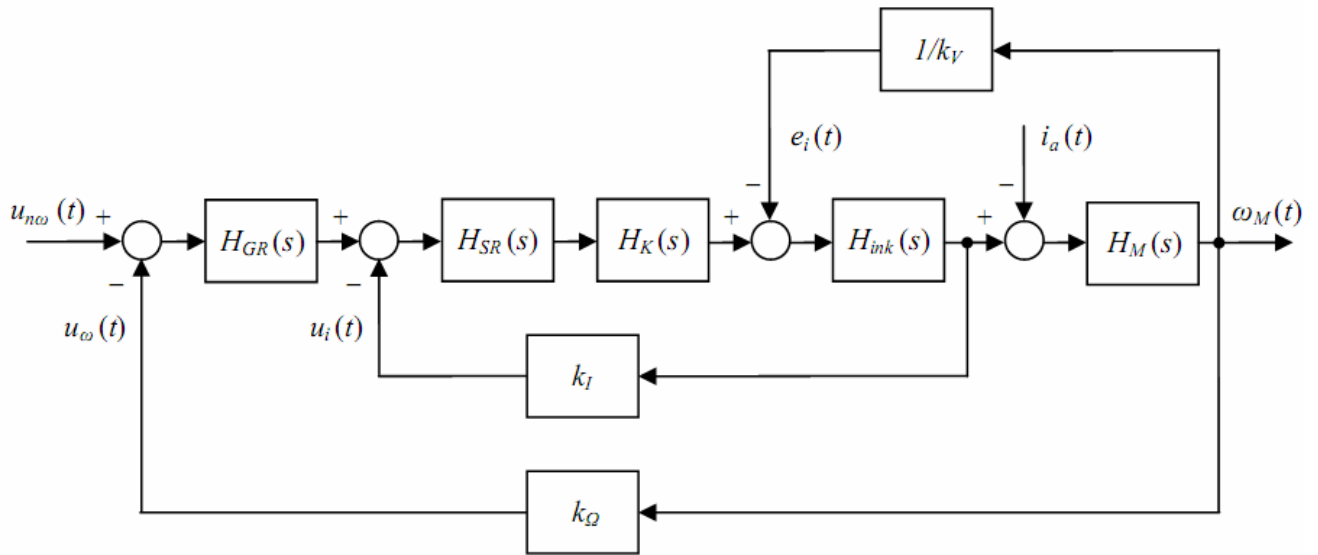
Srovės reguliavimo kontūras yra pavaldus greičio reguliavimo kontūrai, kurį sudaro greičio regulatorius  $H_{GR}$ , srovės reguliavimo kontūras, variklio mechaninė dalis, apibūdinama perdavimo funkcija [1]:

$$H_M(s) = \frac{R_{i\Sigma} \cdot k_V}{T_{M\Sigma} \cdot s}; \quad (1.11)$$

čia  $k_V = (C \cdot \Phi)^{-1}$  – variklio stiprinimo koeficientas,  $C$  – variklio konstrukcijos koeficientas,  $\Phi$  – magnetinis srautas variklio oro tarpe;  
 $T_{m\Sigma} = J_\Sigma \cdot R_{i\Sigma} / (C \cdot \Phi)^2$  – variklio elektromechaninė laiko pastovioji,  $J_\Sigma$  – variklio inercijos momentas;  
 $k_\Omega$  – greičio grįžtamojo ryšio koeficientas .

Variklio priešinė elektrovaros jėga  $e_i$  yra srovės reguliavimo kontūro trikdys, variklio apkrovos srovė  $i_a$  – greičio reguliavimo kontūro trikdys 1.5 pav.. Sistemos įėjimo kintamojo – įtampos  $u_{no}$  dydis lemia sistemos išėjimo kintamojo – greičio  $\omega_M$  reikšmę [1].





1.5 pav. Nuolatinės srovės elektros pavaros hierarchinio valdymo sistemos struktūrinė schema

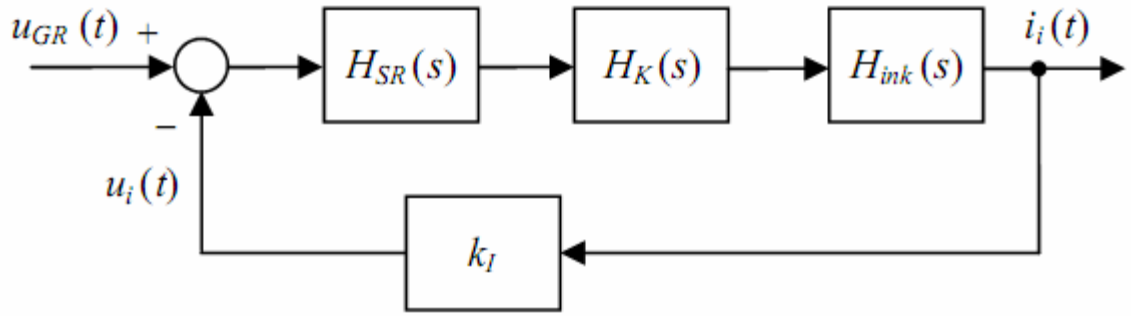
Valdymo kontūrų dinamikos optimizavimas (derinimas) hierarchinio valdymo sistemose pradedamas nuo sparčiau veikiančių vidinių reguliavimo kontūrų, todėl nuolatinės srovės elektros pavaros hierarchinio valdymo sistemoje pirmiausiai yra optimizuojamas srovės reguliavimo kontūras [1, 2].

### 1.3 Srovės reguliavimo kontūro optimizavimas taikant kiekybinio optimumo kriterijų

Siekdami sparčiausio pereinamojo proceso, srovės reguliavimo kontūro optimizavimui taikysime kiekybinio optimumo kriterijų. Hierarchinio valdymo sistemose optimizuojant reguliavimo kontūrus pagal kiekybinio optimumo kriterijų, (1.4) išraiška įgauna pavidalą [1, 2]:

$$H_{KOa}(s) = \frac{1}{2^k \cdot T_\mu \cdot s \cdot (2^k - 1 \cdot T_\mu \cdot s + 1)}; \quad (1.12)$$

čia  $k$  – reguliavimo kontūro eilės numeris, Srovės reguliavimo kontūro eilės numeris nagrinėjamoje sistemoje  $k = 1$ .



1.6 pav. Srovės reguliavimo kontūro struktūrinė schema

Darome prielaidą, kad srovės reguliavimo kontūre priešinė elektrovaros jėga  $e_i$  1.5 pav. pereinamojo proceso metu nekinta. Tuomet galima supaprastinti srovės reguliavimo kontūro struktūrinę schemą, kaip yra parodyta 1.6 pav. Siekiant srovės reguliavimo kontūrą optimizuoti pagal kiekybinio optimumo kriterijų, srovės regulatoriaus perdavimo funkcija apskaičiuojama pagal (1.5) ir (1.12) išraiškas [1]:

$$\begin{aligned}
 H_{SR}(s) &= \frac{H_{KOa}(s)}{H_{aNek}(s)} = \frac{H_{KOaI}(s)}{H_K(s) \cdot H_{ink}(s) \cdot k_I} = \frac{1}{\frac{2 \cdot T_K \cdot s \cdot (T_K \cdot s + 1)}{k_K \cdot \frac{R_{i\Sigma}^{-1}}{T_K \cdot s + 1} \cdot k_I}} = \\
 &= \frac{T_{i\Sigma} \cdot s + 1}{2 \cdot k_K \cdot k_I \cdot R_{i\Sigma}^{-1} \cdot T_K \cdot s} = \frac{T_{i\Sigma} \cdot s}{2 \cdot k_K \cdot k_I \cdot R_{i\Sigma}^{-1} \cdot T_K \cdot s} + \frac{1}{2 \cdot k_K \cdot k_I \cdot R_{i\Sigma}^{-1} \cdot T_K \cdot s} = k_{Psr} + \frac{k_{Isr}}{s}. \quad (1.13)
 \end{aligned}$$

Kaip matyti iš (1.13) išraiškos, proporcinio-integralinio (PI) valdymo dėsnio srovės regulatorius užtikrina srovės reguliavimo kontūro suderinimą pagal kiekybinio optimumo kriterijų ir garantuoja srovės reguliavimo kontūro astatiškumą įėjimo poveikio  $u_{GR}$  bei galimo trikdžio, jeigu jis yra įvertinamas,  $e_i$  atžvilgiu [1].

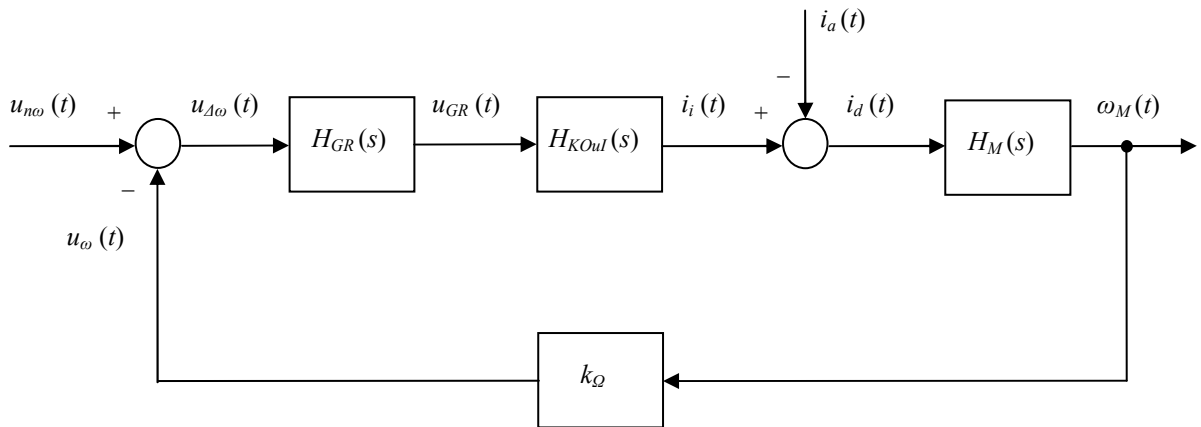
Tuomet atstojamoji uždaro srovės reguliavimo kontūro perdavimo funkcija apskaičiuojama pagal (1.2) ir (1.12) išraiškas [1]:

$$H_{KOul}(s) = \frac{H_{KOal}(s) \cdot k_I^{-1}}{H_{KOal}(s) + 1} = \frac{\frac{1}{2 \cdot T_K \cdot s \cdot (T_K \cdot s + 1)} \cdot k_I^{-1}}{\frac{1}{2 \cdot T_K \cdot s \cdot (T_K \cdot s + 1)} + 1} = \frac{k_I^{-1}}{2 \cdot T_K \cdot s \cdot (T_K \cdot s + 1) + 1} \quad (1.14)$$

Priimama, kad srovės reguliavimo kontūro įėjimo signalas – greičio regulatoriaus išėjimo kintamasis –  $u_{GR}$  įtampos signalas neįgyja tokios reikšmės, kuri sukeltų neigiamų padarinių fiziniams elektromechaninės pavaros įtaisams, todėl inkaro srovės ribojimo priemonės yra nereikalingos. Optimizavus elektromechaninės pavaros vidinį (pirmąjį) – srovės reguliavimo kontūrą pagal kiekybinio optimumo kriterijų, toliau yra atliekamas elektromechaninės pavaros išorinio (antrojo) – greičio reguliavimo kontūro optimizavimas taikant taip pat kiekybinio optimumo kriterijų [1, 2].

Nuolatinės srovės elektros pavaros greičio reguliavimo kontūrą 1.7 pav. sudaro variklio mechaninė dalis  $H_M$ , greičio grįžtamojo ryšio koeficientas  $k_\Omega$ , greičio regulatorius  $H_{GR}$ , ir pavaldus inkaro srovės reguliavimo kontūras, apibūdinamas priimtina supaprastinta (1.14) išraiškos forma, kurioje vardiklio narys  $2 \cdot T_K^2 \cdot s^2$  yra neįvertinamas [1]:

$$H_{KOul}(s) = \frac{k_I^{-1}}{2 \cdot T_K \cdot s \cdot (T_K \cdot s + 1) + 1} = \frac{k_I^{-1}}{2 \cdot T_K^2 \cdot s^2 + 2 \cdot T_K \cdot s + 1} \approx \frac{k_I^{-1}}{2 \cdot T_K \cdot s + 1} \quad (1.15)$$



1.7 pav. Nuolatinės srovės elektros pavaros greičio reguliavimo kontūro struktūrinė schema

Taikant kiekybinio optimumo kriterijų, greičio regulatoriaus perdavimo funkcija apskaičiuojama pagal (1.5), (1.12) ir (1.15) išraiškas [1]:

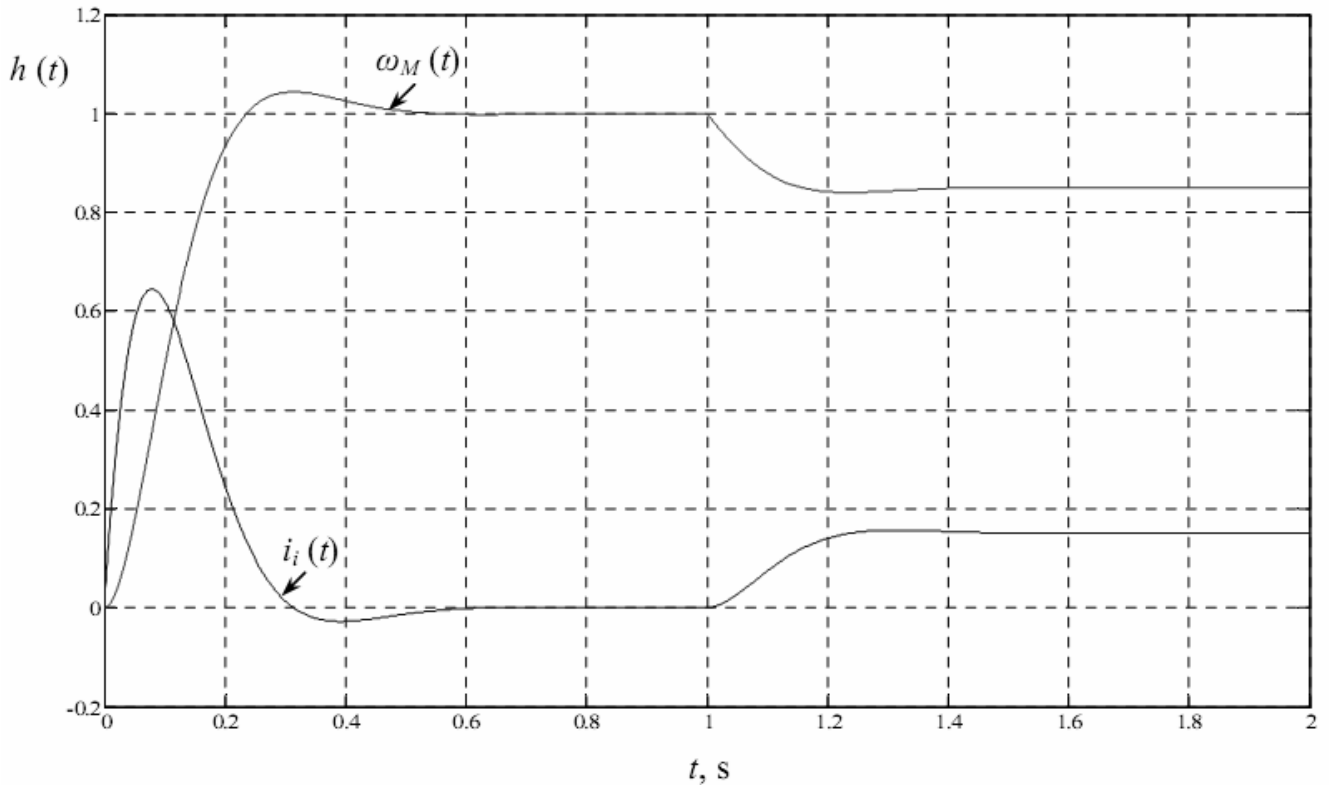
$$\begin{aligned}
H_{GR.KO}(s) &= \frac{H_{KOa}(s)}{H_{aNek}(s)} = \frac{H_{KOa\Omega}(s)}{H_{KOuI}(s) \cdot H_M(s) \cdot k_\Omega} = \frac{1}{\frac{4 \cdot T_K \cdot s \cdot (2 \cdot T_K \cdot s + 1)}{k_I^{-1} \cdot \frac{R_{i\Sigma} \cdot k_V}{T_{m\Sigma} \cdot s} \cdot k_\Omega}} = \\
&= \frac{k_I}{k_V \cdot k_\Omega \cdot R_{i\Sigma}} \cdot \frac{T_{m\Sigma}}{4 \cdot T_K} = k_{P\Omega}.
\end{aligned} \tag{1.16}$$

Kaip matyti iš (1.16) išraiškos, kad optimizuoti greičio reguliavimo kontūrą pagal kiekybinio optimumo kriterijų, reikalingas proporcinio ( $P$ ) valdymo dėsnio greičio reguliatorius. Tuomet atstojamoji uždaro greičio reguliavimo kontūro perdavimo funkcija apskaičiuojama pagal (1.2) ir (1.12) išraiškas [1]:

$$H_{KOu\Omega}(s) = \frac{H_{KOa\Omega}(s) \cdot k_\Omega^{-1}}{H_{KOa\Omega}(s) + 1} = \frac{1}{\frac{4 \cdot T_K \cdot s \cdot (2 \cdot T_K \cdot s + 1)}{1} + 1} \cdot k_\Omega^{-1} = \frac{k_\Omega^{-1}}{4 \cdot T_K \cdot s \cdot (2 \cdot T_K \cdot s + 1) + 1} \tag{1.17}$$

Palyginus (1.17) ir (1.14) išraiškas, matyti, kad laisvasis judesys greičio reguliavimo kontūre yra du kartus lėtesnis nei srovės reguliavimo kontūre. Kampinio greičio  $\omega_M$  ir inkaro srovės  $i_i$  pereinamojo proceso kreivės – reakcijos į šuolinius sistemos valdymo signalo  $u_{n\omega}$  ir trikdžio – apkrovos srovės  $i_a$ , pradedančios veikti kai  $t = 1s$ , pokyčius yra pateiktos 1.8 pav. Kaip matyti iš 1.8 pav., nagrinėjamos elektromechaninės sistemos išėjimo kintamojo – kampinio greičio  $\omega_M$  pereinamojo proceso dinamika, maksimalaus dinaminio nuokrypio ir reguliavimo trukmės atžvilgiu, yra optimali. Tačiau šioje elektromechaninėje sistemoje susidaro situacija, kuri buvo aptarta 1.1 skyriuje, tai yra, kad veikiant sistemą trikdžiui, nagrinėjamu atveju – apkrovos srovei  $i_a$ , yra gaunamas statinis reguliuojamojo kintamojo nuokrypis, nagrinėjamu atveju – kampinio greičio  $\omega_M$  statinis nuokrypis 1.8 pav., kuris yra apskaičiuojamas pagal išraišką [1]:

$$\Delta\omega(t) = i_a(t) \cdot R_{i\Sigma} \cdot k_V \cdot \frac{4 \cdot T_K}{T_{m\Sigma}}. \tag{1.18}$$



1.8 pav. Greičio reguliavimo kontūro, optimizuoto pagal kiekybinio optimumo kriterijų, kintamųjų reakcija į šuolinius  $u_{no}(t)$  ir  $i_a(t)$  signalų pokyčius

Taigi nuolatinės srovės elektros pavaros greičio reguliavimo kontūras, optimizuotas pagal kiekybinio optimumo kriterijų, yra astatinis įėjimo kintamojo – greičio nuostato  $u_{no}(t)$  šuolinio pokyčio atžvilgiu, tačiau statinis trikdžio – apkrovos srovės  $i_a(t)$  šuolinio pokyčio atžvilgiu. 1.4 poskyryje yra pateiktas sistemos dinamikos optimizavimo metodas taikant simetrinio optimumo kriterijų, kuris įgalina išvengti nepageidaujamo statinio reguliuojamojo kintamojo nuokrypio, nagrinėjamu atveju – greičio statinio nuokrypio [1].

#### 1.4 Greičio reguliavimo kontūro optimizavimas taikant simetrinio optimumo kriterijų

Hierarchinio valdymo sistemose simetrinio optimumo kriterijaus (1.6) išraiška įgauna pavidalą [2]:

$$H_{SOa}(s) = \frac{1 + 2^{k+1} \cdot T_\mu \cdot s}{2^{k+1} \cdot T_\mu \cdot s} \cdot \frac{1}{2^k \cdot T_\mu \cdot s \cdot (2^{k-1} \cdot T_\mu \cdot s + 1)}; \quad (1.19)$$

Greičio reguliavimo kontūro eilės numeris nagrinėjamojoje elektromechaninėje sistemoje  $k = 2$ . Optimizuojant nuolatinės srovės elektros pavaros greičio reguliavimo kontūrą pagal simetrinio optimumo kriterijų, sistemos struktūrinė schema išlieka nepakitusi 1.7 pav., išskyrus greičio regulatoriaus perdavimo funkciją, kuri tuomet apskaičiuojama pagal (1.5), (1.19) ir (1.15) išraiškas [1]:

$$\begin{aligned}
 H_{GR.SO}(s) &= \frac{H_{SOa}(s)}{H_{aNek}(s)} = \frac{H_{SOa\Omega}(s)}{H_{KOul}(s) \cdot H_M(s) \cdot k_\Omega} = \frac{1 + 8 \cdot T_K \cdot s}{8 \cdot T_K \cdot s} \cdot \frac{1}{4 \cdot T_K \cdot s \cdot (2 \cdot T_K \cdot s + 1)} = \\
 &= \frac{1 + 8 \cdot T_K \cdot s}{8 \cdot T_K \cdot s} \cdot \frac{k_I}{k_V \cdot k_\Omega \cdot R_{i\Sigma}} \cdot \frac{T_{m\Sigma}}{4 \cdot T_K} = k_{P\Omega} \cdot \frac{1 + 8 \cdot T_K \cdot s}{8 \cdot T_K \cdot s} = k_{P\Omega} + \frac{k_{P\Omega}}{8 \cdot T_K \cdot s} = k_{P\Omega} + \frac{k_{I\Omega}}{s}. \quad (1.20)
 \end{aligned}$$

Kaip matyti iš (1.20) išraiškos, kad optimizuoti greičio reguliavimo kontūrą pagal simetrinio optimumo kriterijų, reikalingas proporcinio-integralinio (*PI*) valdymo dėsnio greičio regulatorius. Be to proporcinio valdymo dėsnio stiprinimo koeficientas  $k_{P\Omega}$  sutampa su proporcinio valdymo dėsnio greičio regulatoriaus, apskaičiuoto pagal kiekybinį optimumą, stiprinimo koeficientu ((1.16) išraiška). Tuomet atstojamoji uždaro greičio reguliavimo kontūro perdavimo funkcija įgyja pavidalą [1]:

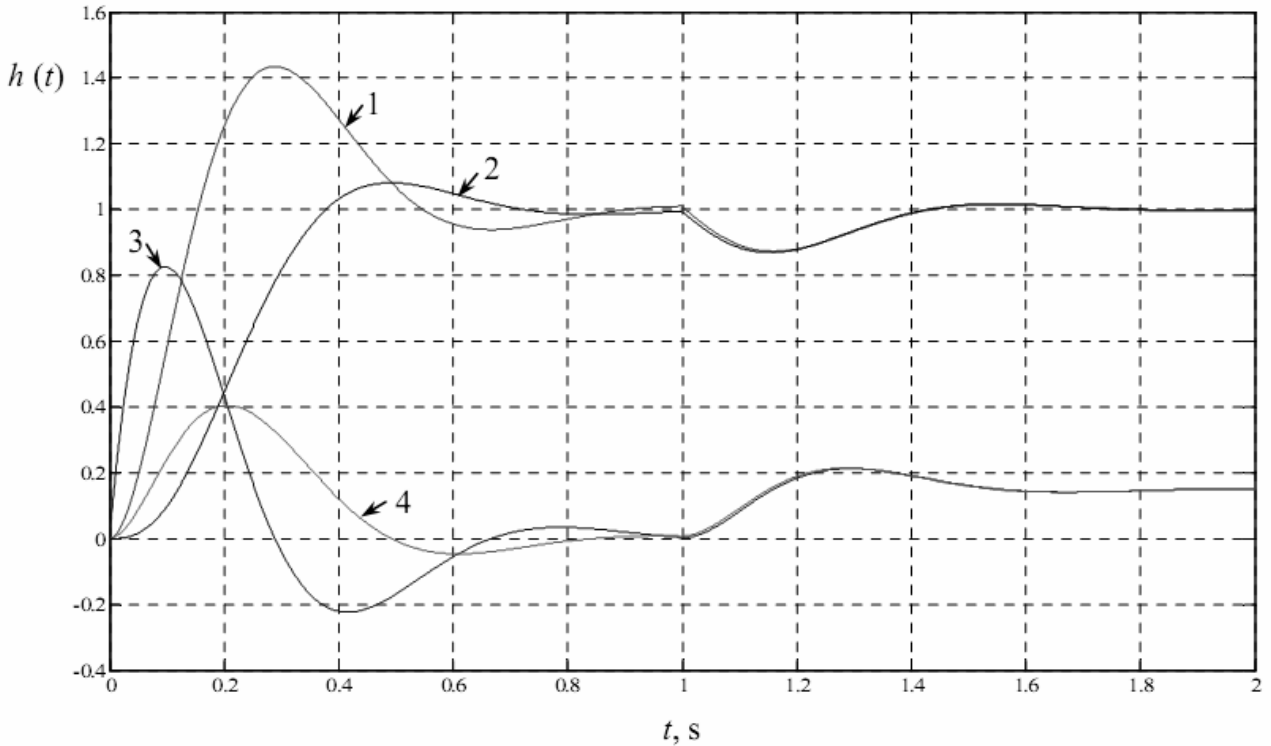
$$\begin{aligned}
 H_{SOu\Omega}(s) &= \frac{H_{SOa\Omega}(s) \cdot k_\Omega^{-1}}{H_{SOa\Omega}(s) + 1} = \frac{1 + 8 \cdot T_K \cdot s}{8 \cdot T_K \cdot s} \cdot \frac{1}{4 \cdot T_K \cdot s \cdot (2 \cdot T_K \cdot s + 1)} \cdot k_\Omega^{-1} = \\
 &= \frac{(1 + 8 \cdot T_K \cdot s) \cdot k_\Omega^{-1}}{8 \cdot T_K \cdot s \cdot (4 \cdot T_K \cdot s \cdot (2 \cdot T_K \cdot s + 1)) + 1}. \quad (1.21)
 \end{aligned}$$

Nuolatinės srovės elektros pavaros, optimizuotos pagal simetrinio optimumo kriterijų, išėjimo kintamojo – kampinio greičio  $\omega_M$  (1 kreivė) ir inkaro srovės  $i_i$  (3 kreivė) pereinamojo proceso kreivės – reakcijos į šuolinius sistemos valdymo signalo  $u_{n\omega}$  ir trikdžio – apkrovos srovės  $i_a$ , pradedančios veikti kai  $t = 1s$ , pokyčius yra pateiktos 1.9 pav. Kaip matyti iš 1.9 pav., optimizavus elektromechaninę sistemą pagal simetrinio optimumo kriterijų, sistemos išėjimo kintamojo – kampinio greičio  $\omega_M$  statinis nuokrypis yra pašalinamas, tačiau suprastėja pereinamojo proceso kokybė – padidėja maksimalus dinaminis nuokrypis ir pailgėja reguliavimo trukmė, lyginant su sistema optimizuotą pagal kiekybinio

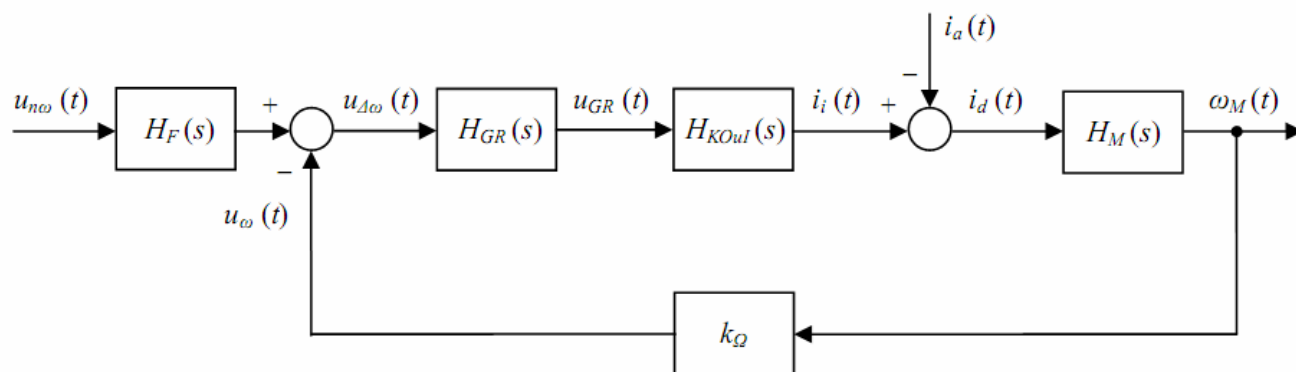
optimumo kriterijų 1.8 pav., kad sumažinti maksimalų dinaminį nuokrypį, kurį sąlygoja (1.21) išraiškos skaitiklio  $(1+8 \cdot T_K \cdot s)$  narys, į sistemą yra įjungiamas filtras, kaip parodyta 10 pav., turintis perdavimo funkciją [1]:

$$H_F(s) = \frac{1}{2^{k+1} \cdot T_\mu \cdot s} = \frac{1}{8 \cdot T_K \cdot s + 1}; \quad (1.22)$$

Tuomet tokios sistemos išėjimo kintamojo – kampinio greičio  $\omega_M$  (2 kreivė) ir inkaro srovės  $i_i$  (4 kreivė) pereinamojo proceso charakteristikos – reakcijos į šuolinius sistemos valdymo signalo  $u_{no}$  ir trikdžio – apkrovos srovės  $i_a$  pokyčius, įgauna pavidalą pateiktą 1.9 pav. Kaip matyti iš 1.9 pav., tokioje elektromechaninėje sistemoje yra išlaikomas statinis tikslumas – statinis kampinio greičio nuokrypis lygus nuliui 1.9 pav. 2 kreivė, maksimalus dinaminis nuokrypis sumažėja nuo 43,4% (simetrinio optimumo atveju be filtro) iki 8,15%, reguliavimo trukmė sutrumpėja nuo  $14,7 \cdot T_\mu$  iki  $11,93 \cdot T_\mu$ . Tačiau sistemos dinamiką charakterizuojančių rodiklių įgyjamos reikšmės yra didesnės, lyginant su kiekybiškai optimalaus kontūro atitinkamų rodiklių reikšmėmis (1.1 skyrius). Taigi ir sistemos, optimizuotos pagal simetrinio optimumo kriterijų su nuostato signalo filtru, dinamikos kokybė yra prastesnė, nei sistemos optimizuotos pagal kiekybinio optimumo kriterijų.



1.9 pav. Greičio reguliavimo kontūro, optimizuoto pagal simetrinio optimumo kriterijų, kintamųjų reakcija į šuolinius  $u_{no}(t)$  ir  $i_a(t)$  signalų pokyčius



1.10 pav. Nuolatinės srovės elektros pavaros greičio reguliavimo kontūro su įjungtu filtru  $H_F$  struktūrinė schema

Hierarchinio valdymo elektromechaninės sistemos reguliavimo kontūrų optimizavimo metodai turi savų privalumų bei trūkumų. Kiekybinio optimumo taikymo nuolatinės srovės elektros pavaroje privalumas – optimali sistemos pereinamojo proceso dinamika, trūkumas – veikiant trikdžiui (apkrovos srovei) yra gaunamas greičio statinis nuokrypis. Simetrinio optimumo kriterijaus taikymo nuolatinės srovės elektros pavaroje privalumas – statinio greičio nuokrypio nulinė vertė, trūkumas – prastos kokybės sistemos pereinamojo proceso dinamika (didelis maksimalus dinaminis nuokrypis bei ilga reguliavimo trukmė). Plačiai naudojamas maksimalaus dinaminio nuokrypio elektromechaninėje sistemoje, kurios greičio valdymo kontūras yra optimizuotas pagal simetrinio optimumo kriterijų, sumažinimo būdas yra nuostato signalo filtro įjungimas. Tuomet yra išlaikomas sistemos statinis tikslumas – statinis greičio nuokrypis lygus nuliui, tačiau reguliavimo trukmė sutrumpėja nežymiai ir todėl pereinamojo proceso dinamikos kokybė gaunama prastesnė nei sistemos optimizuotos pagal kiekybinio optimumo kriterijų. Todėl toks metodas nors ir įgalina išlaikyti simetrinio optimumo sąlygojamą sistemos statinį tikslumą, tačiau neleidžia pasiekti kiekybinio optimumo sąlygojamos sistemos pereinamojo proceso dinamikos kokybės.

Taigi iškyla dilema – kurį reguliavimo kontūrų optimizavimo metodą taikyti hierarchinio valdymo elektromechaninėje sistemoje. Pasirinkimą nulemia automatinio valdymo sistemai keliami reikalavimai, kuriais dažnai (ypač pozicionavimo pavarose) yra siekiama ne tik optimalaus sistemos greitaveikiškumo, bet ir statinio tikslumo. Atskirai taikomi kiekybinis ir simetrinis optimumai negali užtikrinti tuo pat metu sistemos optimalios greitaveikos ir statinio tikslumo. Taigi iškyla elektromechaninės sistemos dinamikos kokybės problema, kurios sprendimo idėją pasiūlė KTU prof. V.A. Geleževičius [6], o įgyvendino ŠU lekt. N. Šulčius [3]: siekiant suderinti kiekybinio ir simetrinio optimumų teikiamus privalumus bei pašalinti jų trūkumus, naudojamas kintamos struktūros greičio



regulatorius, kurio valdymo dėsnis pereinamojo proceso metu yra automatiškai keičiamas iš proporcinio - integruojančio (PI), suderinto pagal simetrinio optimumo kriterijų, į proporcinį (P), suderintą pagal kiekybinio optimumo kriterijų, ir atvirkščiai.

### **1.5 Elektromechaninė vykdymo sistema su PI-P-PI kintamos struktūros regulatoriumi**

Išnagrinėtas būdas elektromechaninių vykdymo sistemų dinamikos kokybei pagerinti, naudojant kintamos struktūros reguliatorių, kurio valdymo dėsnis pereinamojo proceso metu automatiškai keičiamas iš proporcinio - integruojančio (PI) į proporcinį (P) ir atvirkščiai [7, 8, 9, 10, 11, 12].

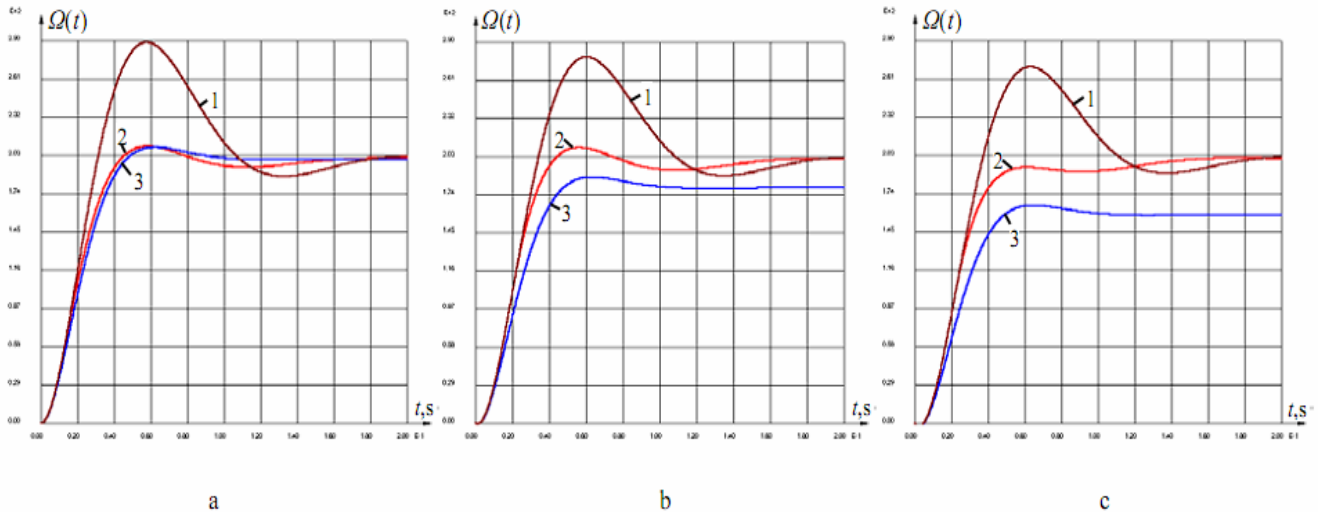
Ištirti du reguliatoriaus struktūros keitimo algoritmai ir nustatytos optimalios reguliatoriaus struktūros keitimo parametrų vertės. Nustatyta, kad, veikiant statinei apkrovai, abiem reguliatoriaus struktūros keitimo atvejais geriausia pereinamojo proceso kokybė pasiekama, kai PI – P struktūra perjungama esant maksimaliai srovei  $i_{imax}$ . Kai perjungimo parametrai formuojami nepriklausomai vienas nuo kito, reguliatoriaus P dėsnio palaikymo trukmė, didėjant statinei apkrovai, trumpėja. [8, 9]

Nagrinėjama elektromechaninė vykdymo sistema su kintamos struktūros greičio regulatoriumi, kuris valdomas Fuzzy logika pagrįstu valdymo dėsnio (PI-P-PI) perjungimo bloku. Fuzzy logikos įtaisas naudojamas proporcinio (P) valdymo dėsnio palaikymo trukmei nustatyti priklausomai nuo elektros pavaros statinės apkrovos dydžio. Taikomas Fuzzy logika pagrįstas valdymo metodas užtikrina optimalią sistemos dinamikos kokybę (remiantis ITAE kokybės kriterijumi) nepriklausomai nuo pavaros statinės apkrovos dydžio. Sukonstruoti bei ištirti dviejų tipų – Mamdani tipo ir Sugeno tipo Fuzzy logikos įtaisai. Pateikti elektromechaninės vykdymo sistemos modeliavimo rezultatai patvirtina pasiūlyto valdymo metodo tinkamumą [10, 12].

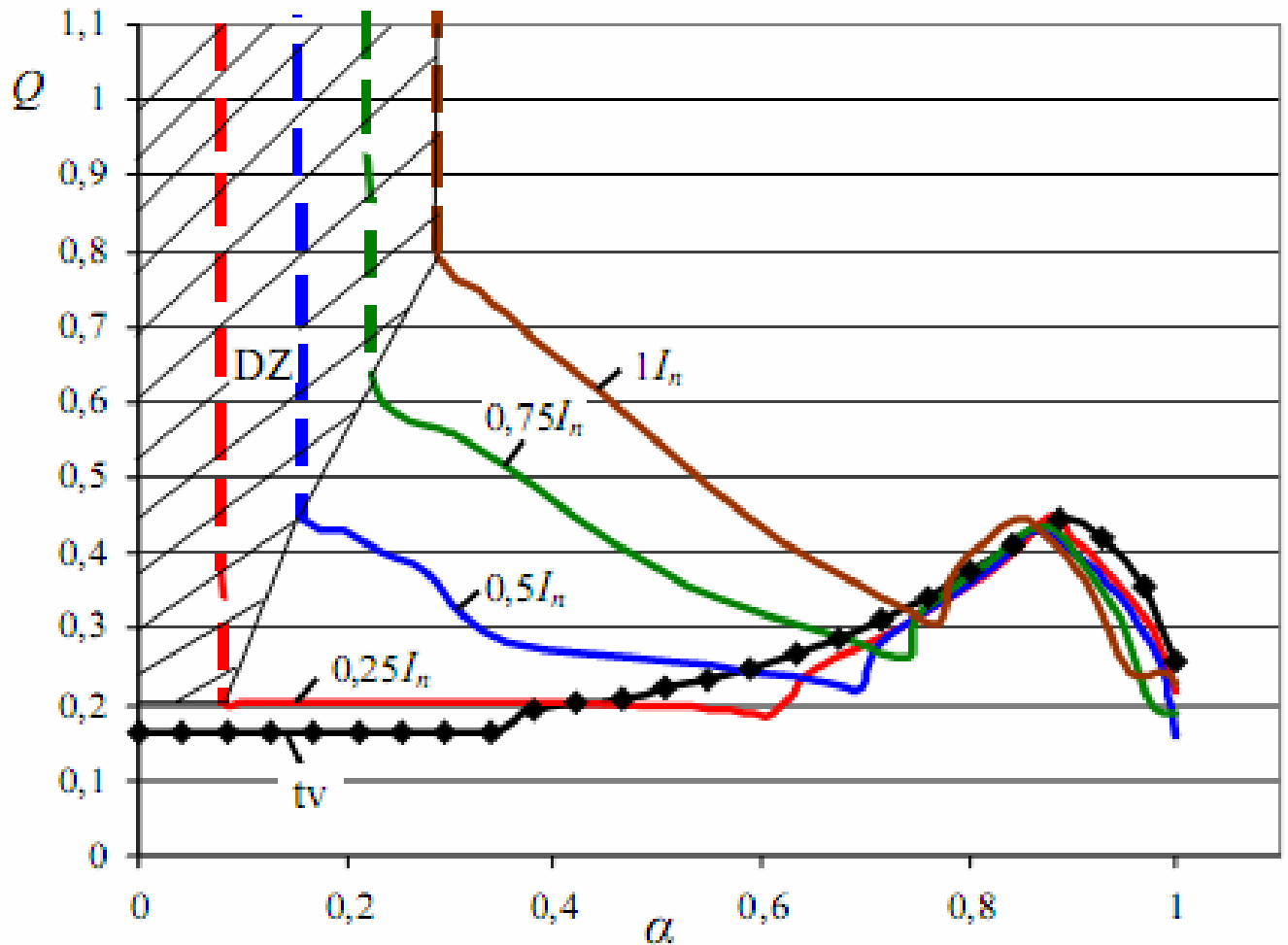
Nagrinėjama greičio valdymo sistema su programuojamuoju kintamos struktūros greičio regulatoriumi. Programuojamasis įtaisas naudojamas proporcinio (P) valdymo dėsnio palaikymo trukmei nustatyti priklausomai nuo sistemos statinės apkrovos dydžio. Statinės apkrovos srovei nustatyti sudarytas Luenbergerio observatorius. Gaunamas statinės apkrovos srovės signalas yra tinkamas naudoti P valdymo dėsnio palaikymo trukmės nustatymo įtaise. Sudaryta programuojamojo įtaiso įėjimo ir išėjimo priklausomybė užtikrina optimalią sistemos dinamikos kokybę nepriklausomai nuo statinės apkrovos dydžio. Pateikti greičio valdymo sistemos su programuojamuoju kintamos struktūros regulatoriumi modeliavimo rezultatai sutampa su rezultatais, gautais taikant Fuzzy logika pagrįstą kintamos struktūros reguliatorių [11, 12].

Geriausios greičio pereinamojo proceso kreivės, gautos naudojant kintamos ir tradicinių struktūrų reguliatorius, yra pateiktos 1.11 pav. [8, 9]. Tuščiosios veikos metu pavaros su kintamos struktūros reguliatoriumi pereinamojo proceso (1.11 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 (1.11 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). [8, 9]

Pateikiama keletas greičio pereinamojo proceso kreivių 1.11 pav. [8, 9] a – tuščiosios veikos metu, b – kai statinė apkrova  $I_a=0,5I_n$ , c – kai statinė apkrova  $I_a=1I_n$  ir kokybės kitimo tuščiosios veikos ir statinės apkrovos ( $I_a=0,25\div 1I_n$ ) metu 1.12 pav. [8], kai perjungiamo pagal vieną parametą.



1.11 pav. Greičio pereinamojo proceso kreivės: a – tuščiosios veikos metu, b – kai statinė apkrova  $I_a=0,5I_n$ , c – kai statinė apkrova  $I_a=1I_n$  [8, 9]



1.12 pav.. Kokybės kitimas tuščiosios veikos ( $tv$ ) ir statinės apkrovos ( $I_a=0,25\div 1I_n$ ) metu, kai perjungžiama pagal vieną parametą [8]

Taigi siekiant suderinti kiekybinio ir simetrinio optimumų teikiamus privalumus bei pašalinti jų trūkumus, naudojami kintamos struktūros reguliatoriai. Jau yra ištirtas PI-P-PI kintamos struktūros reguliatorius [3], kuriame du kartus keičiamas valdymo dėsnis. Tačiau suderinti kiekybinio ir simetrinio optimumų teikiamus privalumus bei pašalinti jų trūkumus būtų galima atliekant tik vieną reguliatoriaus valdymo dėsnio keitimą. Todėl šiame darbe ištirtas P-PI kintamos struktūros reguliatorius.

## 2. ELEKTROMECHANINĖS VYKDYMO SISTEMOS SU P-PI KINTAMOS STRUKTŪROS REGULIATORIUMI TYRIMAS

### 2.1 Modelio sudarymas MATLAB/Simulink programa

Siekiant gaunamų rezultatų universalumo ir pritaikomumo įvairiose sistemose, buvo sudarytas apibendrintas elektromechaninės vykdyimo sistemos modelis MATLAB/Simulink programa 2.1 pav.

Sistemą sudaro: valdymo signalo grandis (1); kintamos struktūros reguliatorius (2) su atskirtomis proporcinė (3) ir integruojančia (4) dalimis, reguliatoriaus valdymo dėsnio perjungiklis (5); pavaldus srovės valdymo kontūras (6); variklio mechaninė grandis (7); Apkrovos grandis(8); grįžtamojo ryšio grandis (9); leistino nuokrypio 5 % grandys (10, 11); oscilografas, pereinamiesiems procesams stebėti (12); matematinis modelis netiesioginio (13) ITAE integralinio kokybės rodiklio (14) ir tiesioginio kokybės rodiklio  $t_{reg}$ . (15) vertėms stebėti.

Elektromechaninės vykdyimo sistemos dinamikos kokybės tiesioginis rodiklis yra reguliavimo trukmė  $t_{reg}$ . [13, 14] (laikas, per kurį reguliuojamo parametro nuokrypis pasiekia 5 % ribą ir vėliau jos neviršija). Netiesioginis kokybės rodiklis yra ITAE (Integral of Time multiplied by Absolute Error) integralinis rodiklis [15], kartu įvertinantis tiesioginius kokybės rodiklius – reguliavimo trukmę  $t_{reg}$  ir perreguliavimą.

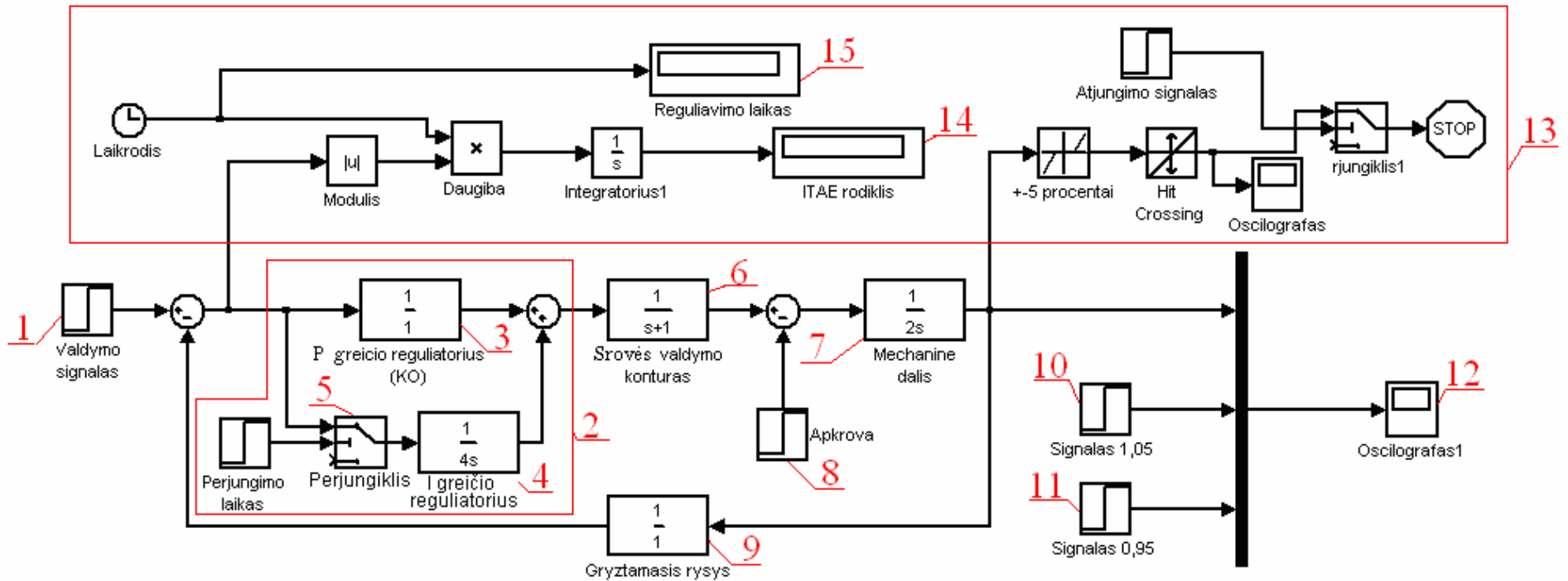
Tyrimas atliktas keičiant reguliatoriaus perjungimo laiką ir stebint ITAE integralinio kokybės rodiklio vertę:

$$J_{ITAE} = \int_0^{t_{reg}} t \cdot |\Delta x(t)| dt \quad (2.1)$$

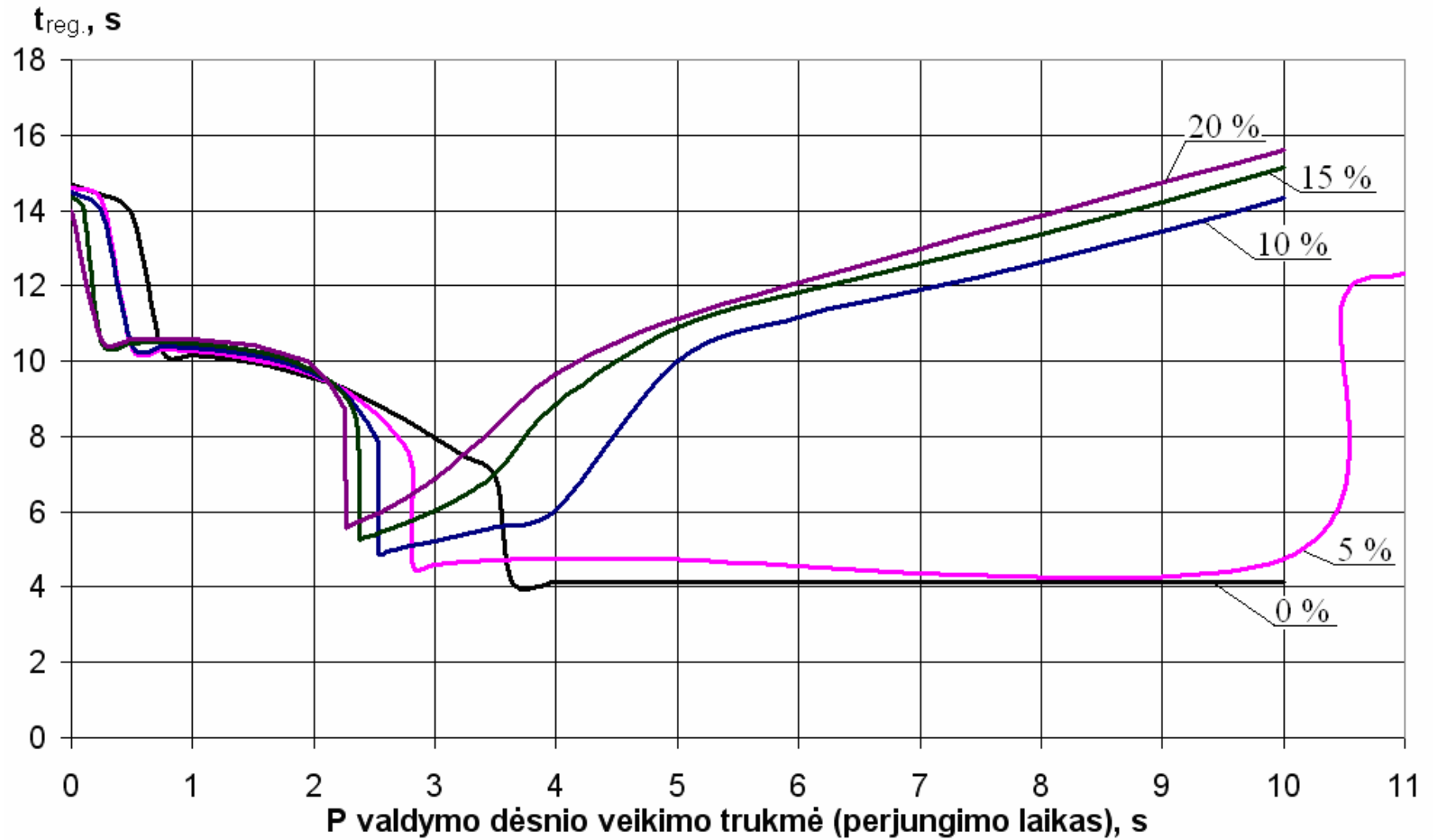
čia  $|\Delta x(t)|$  – reguliuojamo parametro nuokrypio modulis;

$t_{reg}$  – reguliavimo trukmė (laikas, per kurį reguliuojamo parametro nuokrypis pasiekia 5 % ribą ir vėliau jos neviršija), s;

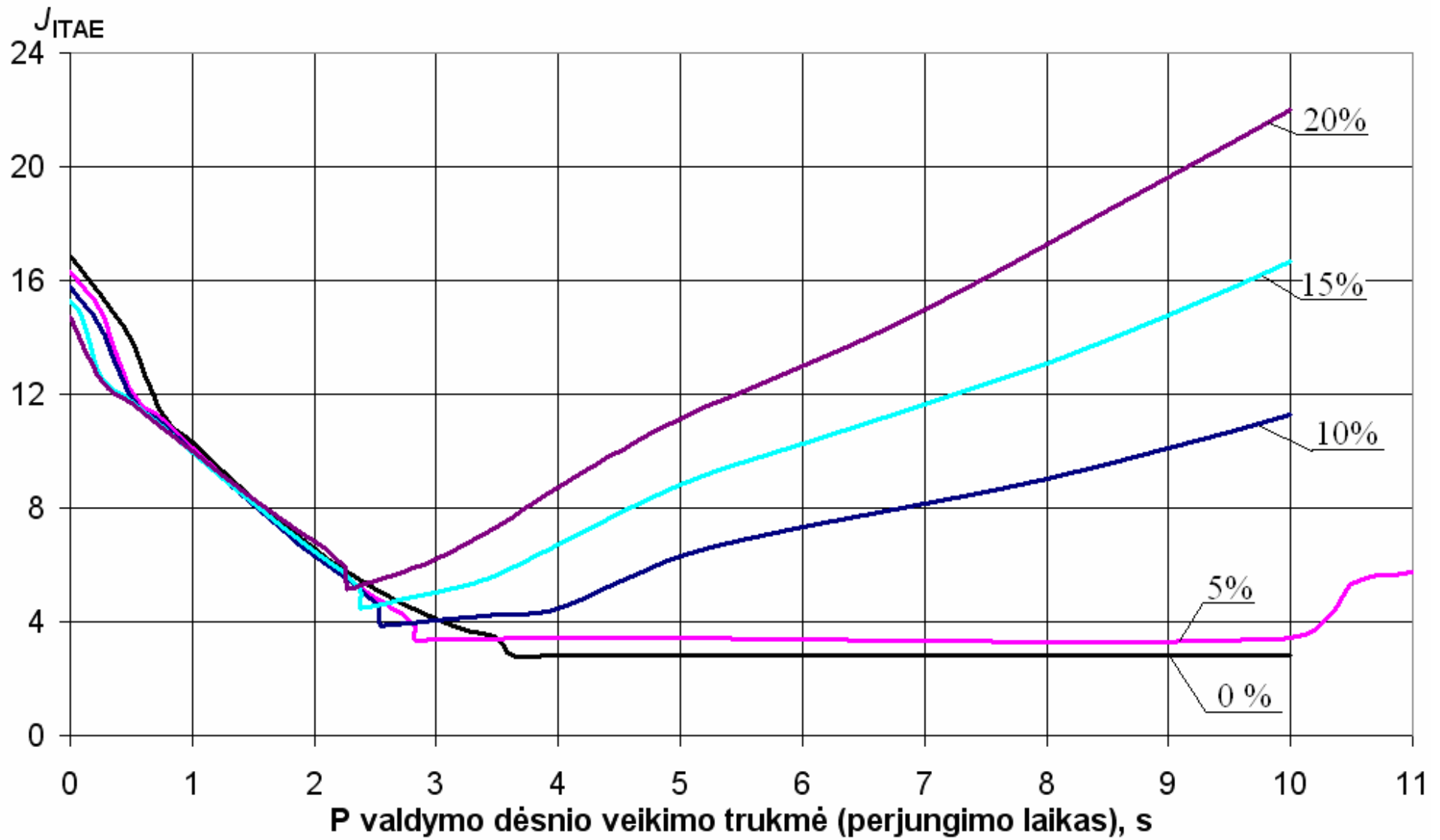
Kuo mažesnė rodiklio vertė, tuo pereinamasis procesas yra geresnės kokybės. Minimali reguliavimo trukmė arba minimali ITAE rodiklio vertė nurodo reguliatoriaus perjungimo laiką nustatantį geriausią elektromechaninės vykdyimo sistemos dinamikos kokybę.



2.1 pav. Apibendrintas elektromechaninės vykdyimo sistemos modelis MATLAB/Simulink programos aplinkoje (Sistemą sudaro: valdymo signalo grandis (1); kintamos struktūros reguliatorius (2) su atskirtomis proporcinė (3) ir integruojančia (4) dalimis, reguliatoriaus valdymo dėsnio perjungiklis (5); pavaldus srovės valdymo kontūras (6); variklio mechaninė grandis (7); Apkrovos grandis(8); grįžtamojo ryšio grandis (9); leistino nuokrypio 5 % grandys (10, 11); oscilografas, pereinamiesiems procesams stebėti (12); matematinis modelis netiesioginio (13) ITAE integralinio kokybės rodiklio (14) ir tiesioginio kokybės rodiklio  $t_{reg}$ . (15) vertėms stebėti)



2.2 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi reguliavimo laiko priklausomybė nuo reguliatoriaus struktūros perjungimo laiko



2.3 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi ITAE rodiklio priklausomybė nuo reguliatoriaus struktūros perjungimo laiko

2.2 pav. ir 2.3 pav. elektromechaninės vykdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros regulatoriumi priklausomybės gaunamos esant pastoviai apkrovai, bet keičiant P valdymo dėsnio veikimo trukmę. Priklausomybės pateiktos esant statinėms apkrovoms 0, 5, 10, 15, 20 %. Kaip matome iš paveikslų esant vienodai statinei apkrovai ITAE rodiklis ir reguliavimo laikas pasiekia minimumus esant tai pačiai P valdymo dėsnio veikimo trukmei, dėl to geriausiai struktūros perjungimo laikui nustatyti yra naudojama ITAE integralinio rodiklio minimali reikšmė.

## 2.2 Geriausių dinamikos kokybę užtikrinančio regulatoriaus perjungimo parametro priklausomybė nuo statinės apkrovos nustatymas

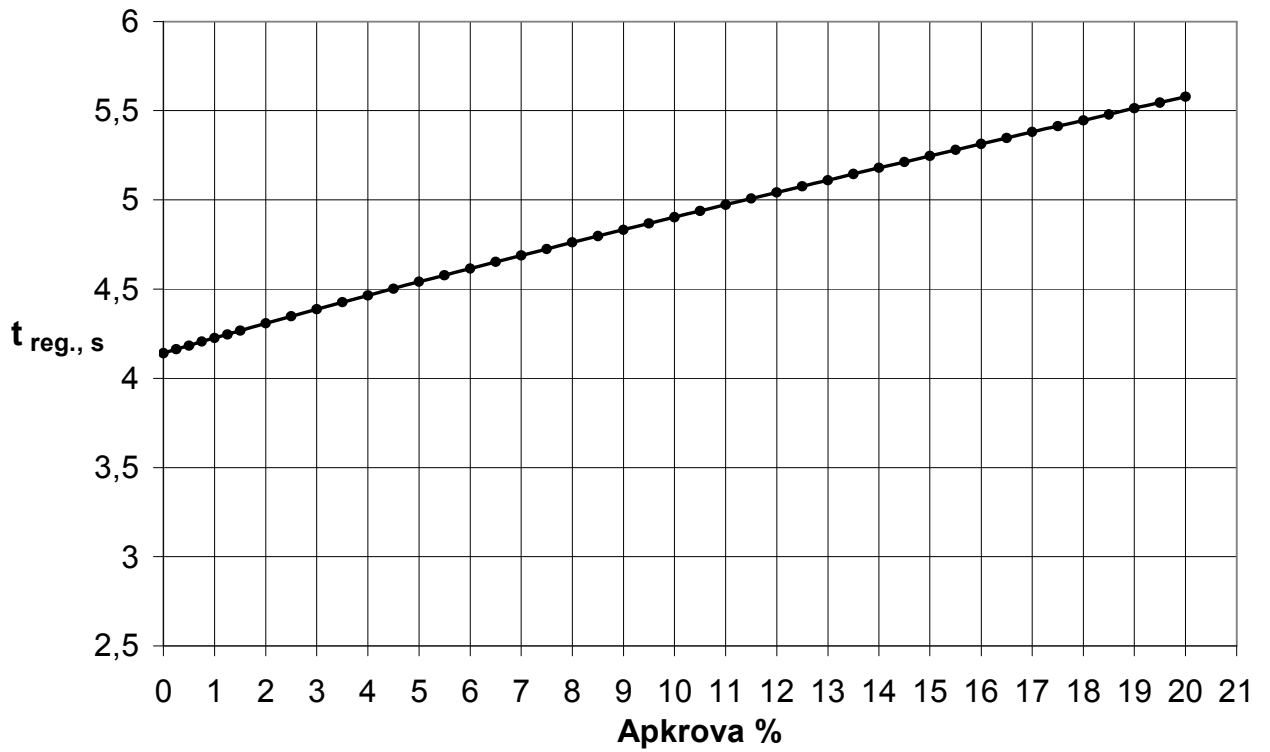
Iš 2.2, 2.3 pav. atrenkamos elektromechaninės vykdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros regulatoriumi geriausių dinamikos kokybę užtikrinančio  $P$  valdymo dėsnio veikimo trukmės  $t_{perj.l.}$ , ITAE integralinio rodiklio, reguliavimo laiko  $t_{reg.}$  vertės prie įvairių statinių apkrovų ir pateikiamos 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė

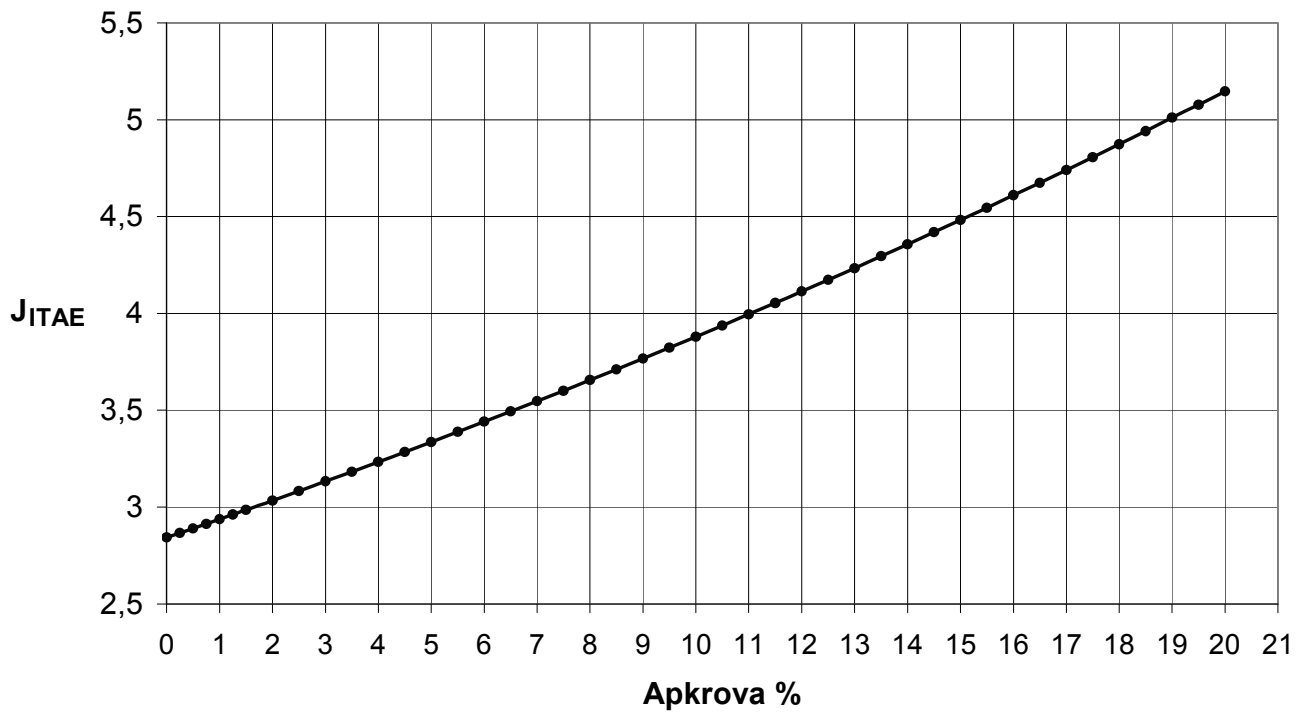
### Elektromechaninės vykdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros regulatoriumi perjungimo parametro vertės užtikrinančios geriausių dinamikos kokybę esant įvairioms statinėms apkrovoms

Apkrova	Perjungimo laikas $t_{perj.l.}$ , s	ITAE rodiklis	Reguliavimo laikas $t_{reg.}$ , s	Apkrova	Perjungimo laikas $t_{perj.l.}$ , s	ITAE rodiklis	Reguliavimo laikas $t_{reg.}$ , s
0	3,62917	2,843	4,141	9,5	2,557	3,823	4,868
0,25	3,51900	2,866	4,163	10	2,536	3,88	4,903
0,5	3,44809	2,89	4,184	10,5	2,516	3,938	4,939
0,75	3,38330	2,914	4,206	11	2,4954948	3,996	4,973
1	3,322107	2,938	4,226	11,5	2,477	4,054	5,007
1,25	3,270999	2,962	4,247	12	2,4595904001	4,114	5,042
1,5	3,226920	2,986	4,268	12,5	2,4426	4,173	5,076
2	3,142651	3,034	4,308	13	2,425	4,233	5,109
2,5	3,0742	3,083	4,349	13,5	2,4112	4,295	5,145
3	3,0114817	3,133	4,388	14	2,397518759	4,357	5,18
3,5	2,9585000	3,183	4,427	14,5	2,3826	4,419	5,213
4	2,907943	3,233	4,465	15	2,3692	4,482	5,246
4,5	2,8634	3,284	4,503	15,5	2,3562	4,545	5,28
5	2,82423	3,336	4,542	16	2,343998192	4,61	5,314
5,5	2,78300	3,388	4,578	16,5	2,3321	4,674	5,347
6	2,74924442	3,441	4,616	17	2,3222446	4,741	5,382
6,5	2,71620	3,494	4,652	17,5	2,3101	4,806	5,413
7	2,6856991	3,547	4,689	18	2,299887006	4,873	5,446
7,5	2,656995	3,601	4,725	18,5	2,2899	4,941	5,479
8	2,6310585	3,656	4,762	19	2,2823336999	5,011	5,515
8,5	2,6042	3,711	4,797	19,5	2,2715	5,078	5,545
9	2,58051799	3,767	4,833	20	2,2629	5,147	5,578

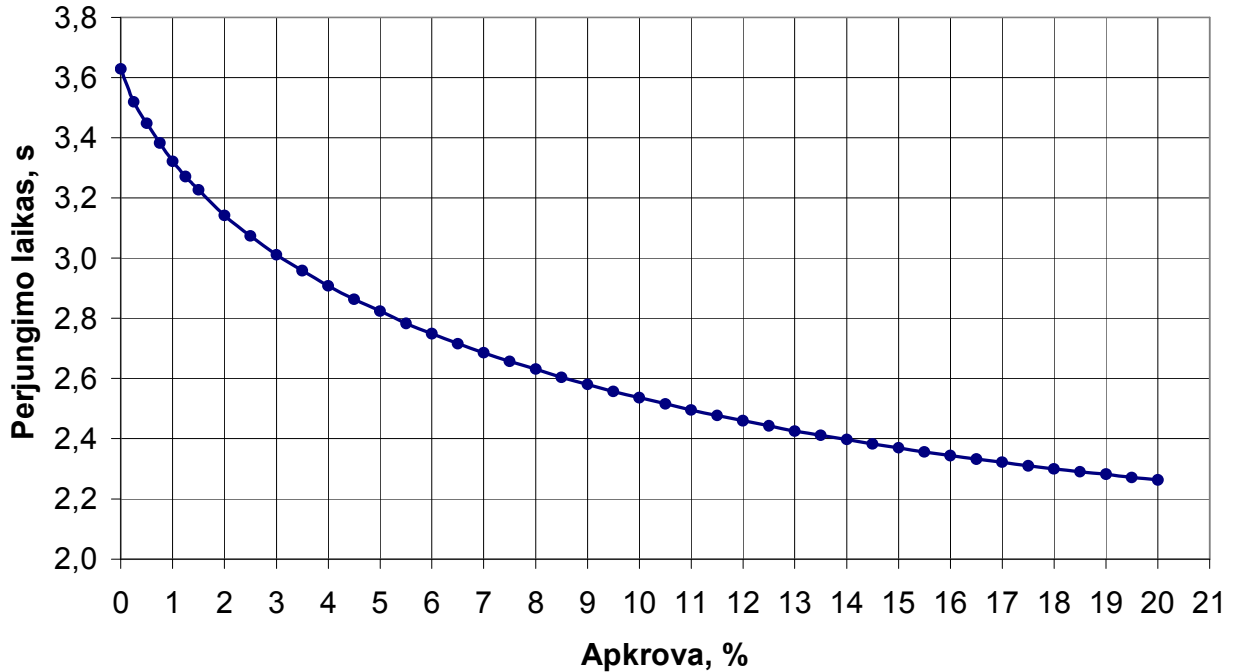




2.4 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi reguliavimo laiko  $t_{reg}$  priklausomybė nuo statinės apkrovos



2.5 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi ITAE integralinio rodiklio priklausomybė nuo statinės apkrovos



2.6 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi P valdymo dėsnio veikimo trukmės  $t_{perj.l.}$  priklausomybė nuo statinės apkrovos

2.1 lentelės duomenys grafiškai pateikti 2.4, 2.5, 2.6 paveiksluose. Iš 2.4 pav. ir 2.5 pav. matyti, kad didėjant statinei apkrovai reguliavimo ir ITAE integralinio rodiklio reikšmės didėja. Iš 2.6 pav. matome, kad didėjant statinei apkrovai P valdymo dėsnio veikimo trukmė mažėja.

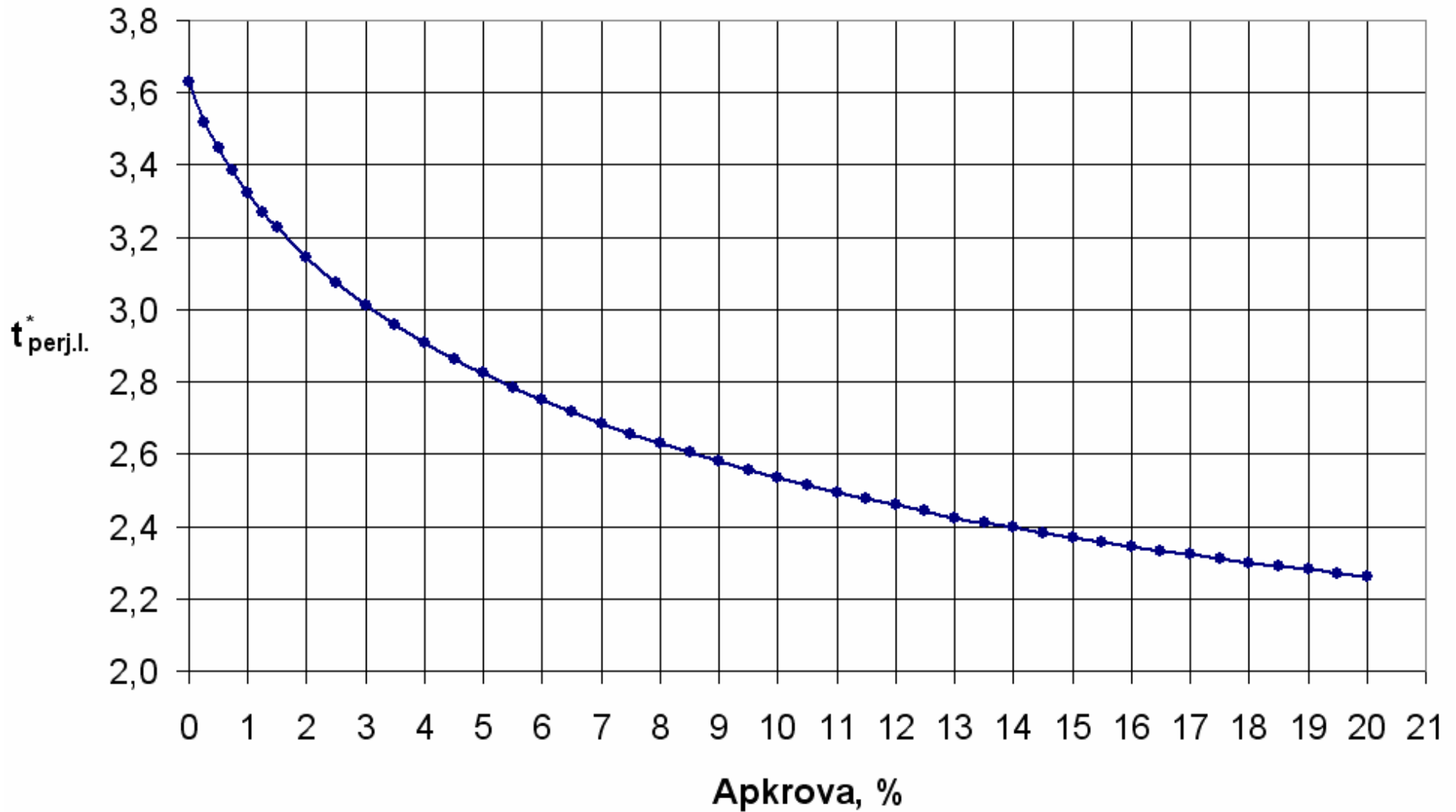
Atrinkus geriausias reguliatoriaus perjungimo laiko vertes iš 2.1 lentelės prie skirtingų apkrovos verčių, buvo sudaryta universalė, pritaikoma įvairioms sistemoms, P valdymo dėsnio veikimo trukmės priklausomybė nuo statinės apkrovos:

$$t_{perj.l.}^* = \frac{t_{perj.l.}}{T_{srov.kont.}}; \quad (2.2)$$

čia  $t_{perj.l.}$  – P valdymo dėsnio veikimo trukmė, s;

$T_{srov.kont.}$  – srovės kontūro laiko pastovioji, s;

Naudojant (2.2) formulę ir 2.7 pav. kreivę galima rasti elektromechaninės vykdyimo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi P valdymo dėsnio veikimo trukmę, žinant sistemos  $T_{srov.kont.}$  srovės kontūro laiko pastoviąją, tai yra, galima P-PI kintamos struktūros reguliatorių pritaikyti įvairioms elektromechaninėms vykdyimo sistemoms.

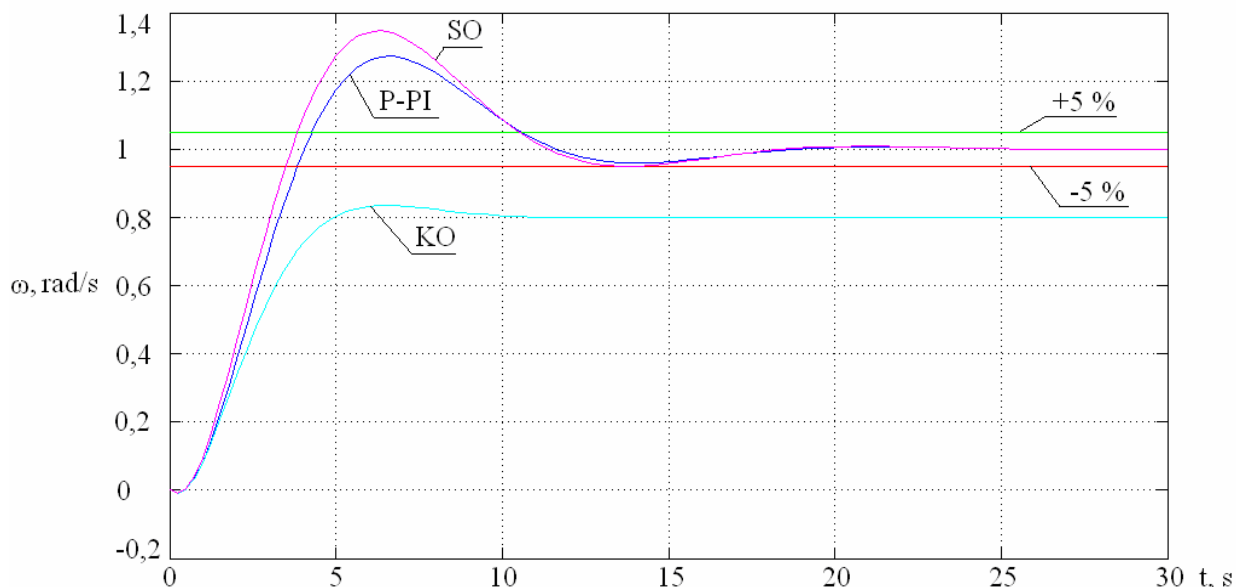


2.7 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos su P-PI kintamos struktūros regulatoriumi universali P valdymo dėsnio veikimo trukmės

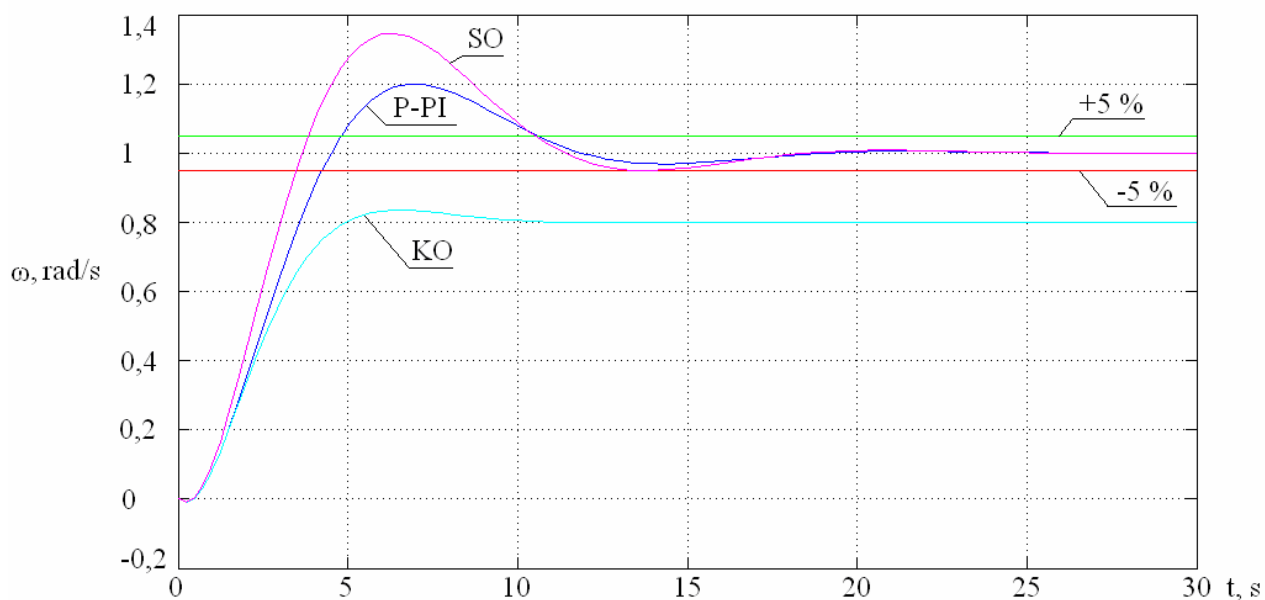
$t_{perj.l.}^*$  priklausomybė nuo statinės apkrovos

### 2.3 Elektromechaninės vykdyto sistemos greičio pereinamųjų procesų kreivės

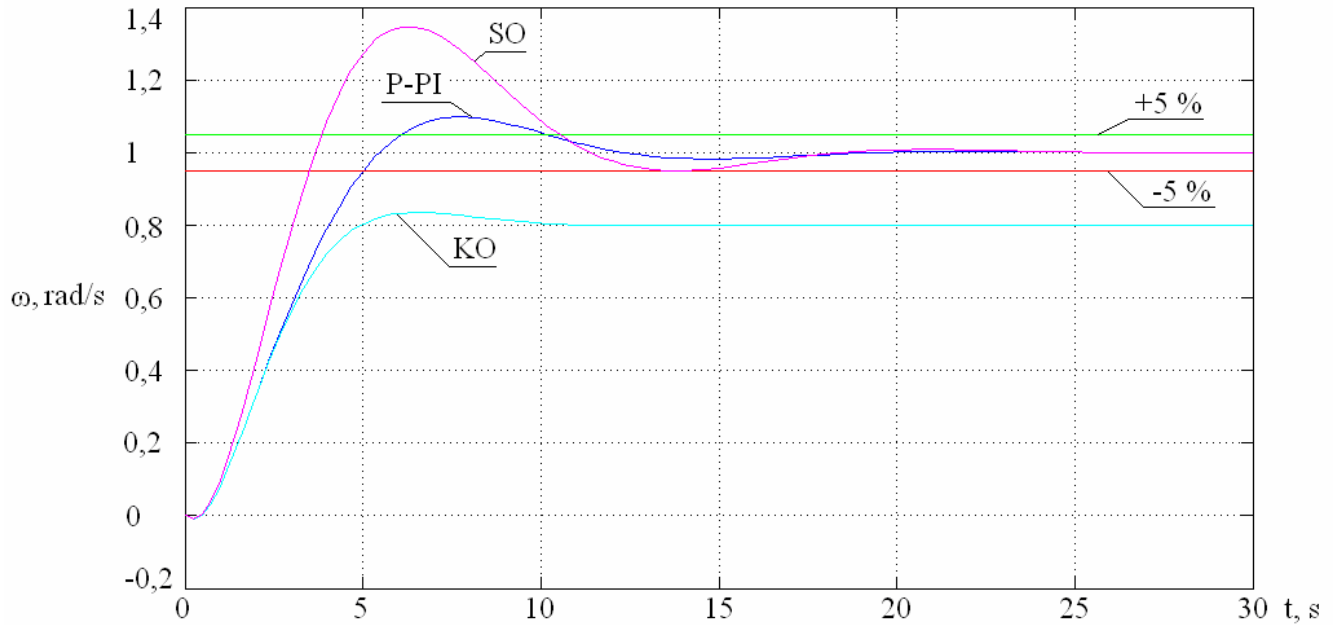
Pateikiama keletas elektromechaninės vykdyto sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi pereinamųjų procesų kreives esant pastoviai statinei 20 % apkrovai, bet keičiat P valdymo dėsnio veikimo trukmę, nuo 2.7 iki 2.13 pav.



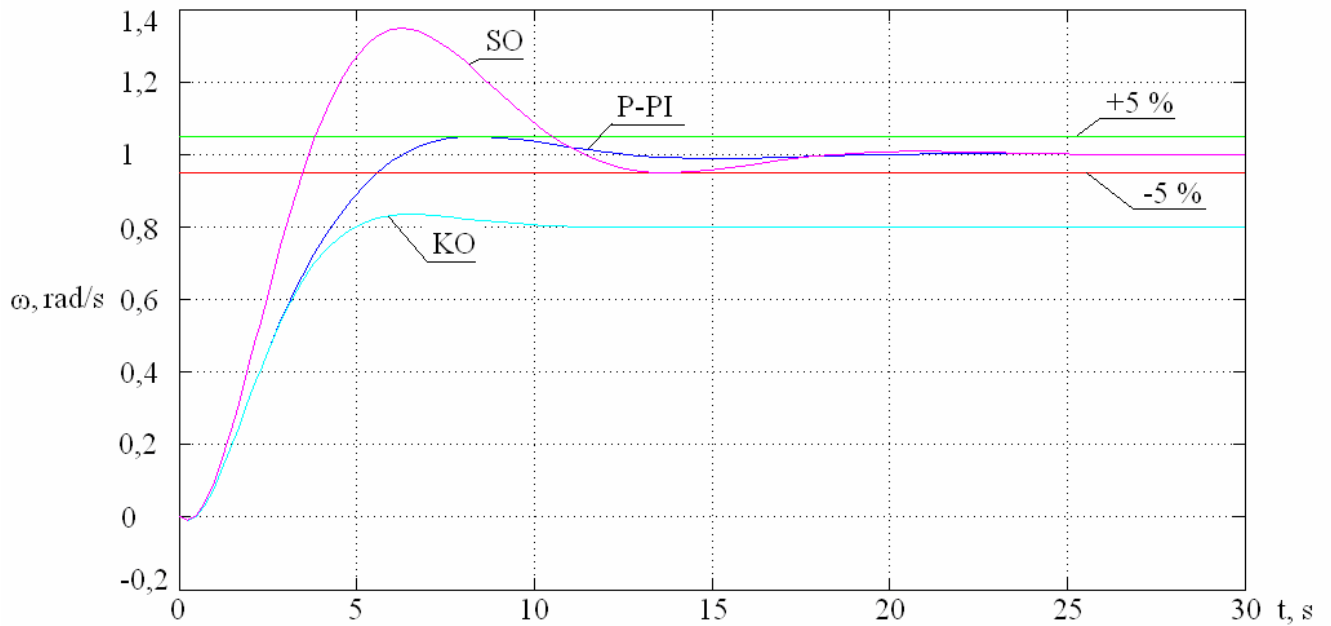
2.8 pav. Elektromechaninės vykdyto sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi pereinamojo proceso kreives esant pastoviai statinei 20 % apkrovai, P valdymo dėsnio veikimo trukmė yra 0,5 s



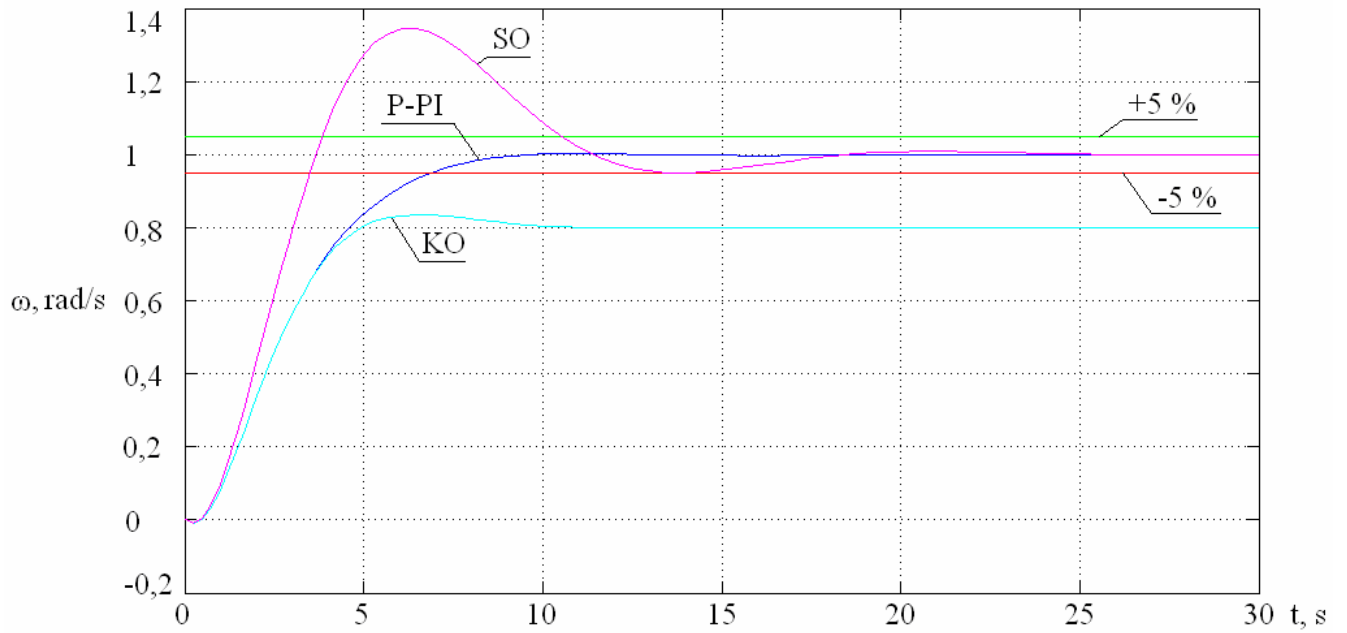
2.9 pav. Elektromechaninės vykdyto sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi pereinamojo proceso kreives esant pastoviai statinei 20 % apkrovai, P valdymo dėsnio veikimo trukmė yra 1 s



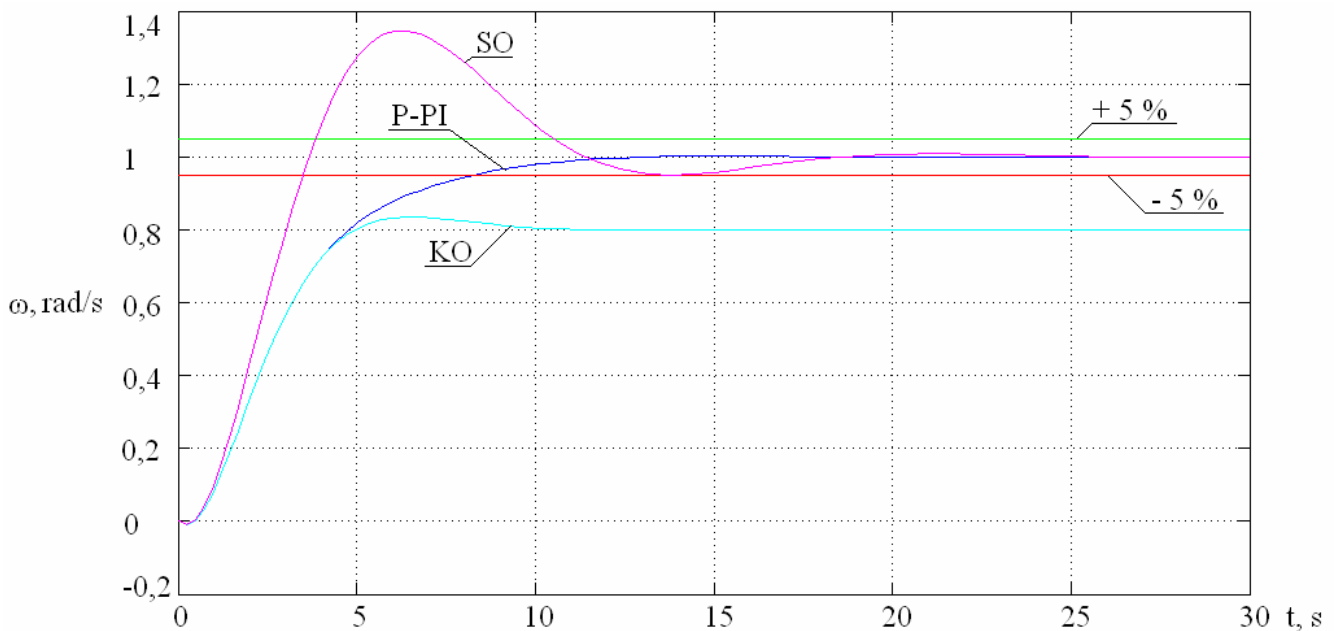
2.10 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi pereinamojo proceso kreivės esant pastoviai statinei 20 % apkrovai, P valdymo dėsnio veikimo trukmė yra 1,8 s



2.11 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi pereinamojo proceso kreivės esant pastoviai statinei 20 % apkrovai, P valdymo dėsnio veikimo trukmė yra 2,2629 s



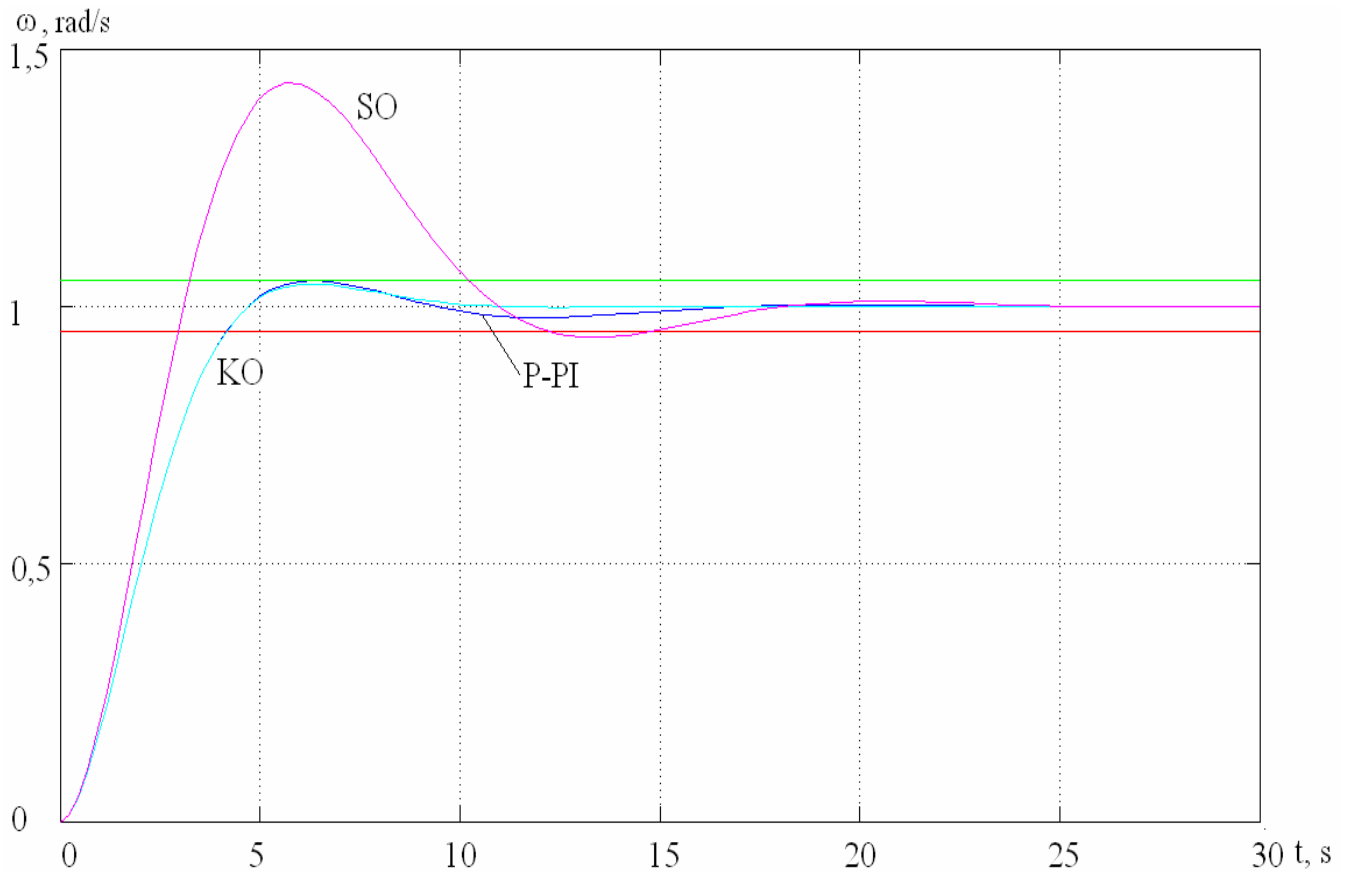
2.12 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi pereinamojo proceso kreivės esant pastoviai statinei 20 % apkrovai, P valdymo dėsnio veikimo trukmė yra 3 s



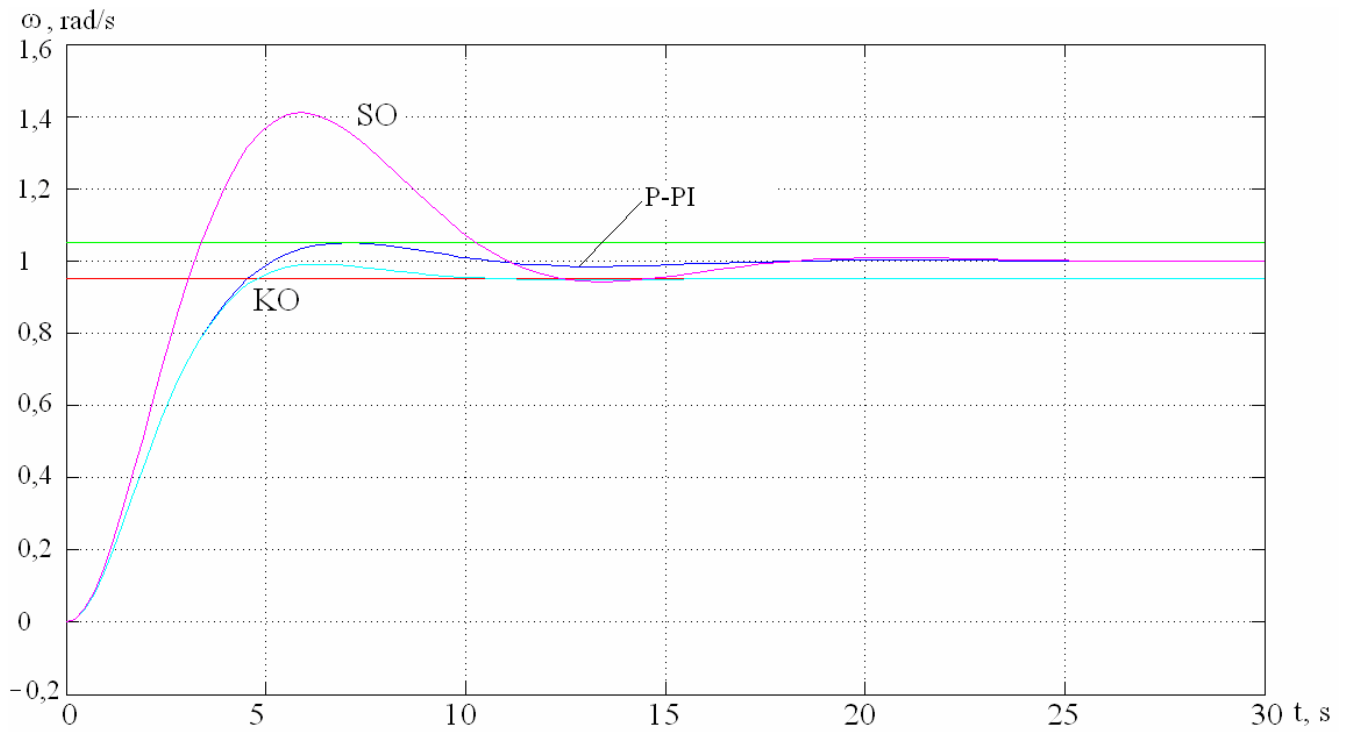
2.13 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi pereinamojo proceso kreivės esant pastoviai statinei 20 % apkrovai, P valdymo dėsnio veikimo trukmė yra 3,5 s

Iš pereinamųjų procesų kreivių matosi, kad esant minimaliam ITAE integraliniam rodikliui gauname geriausias pereinamojo proceso kreives 2.11 pav.

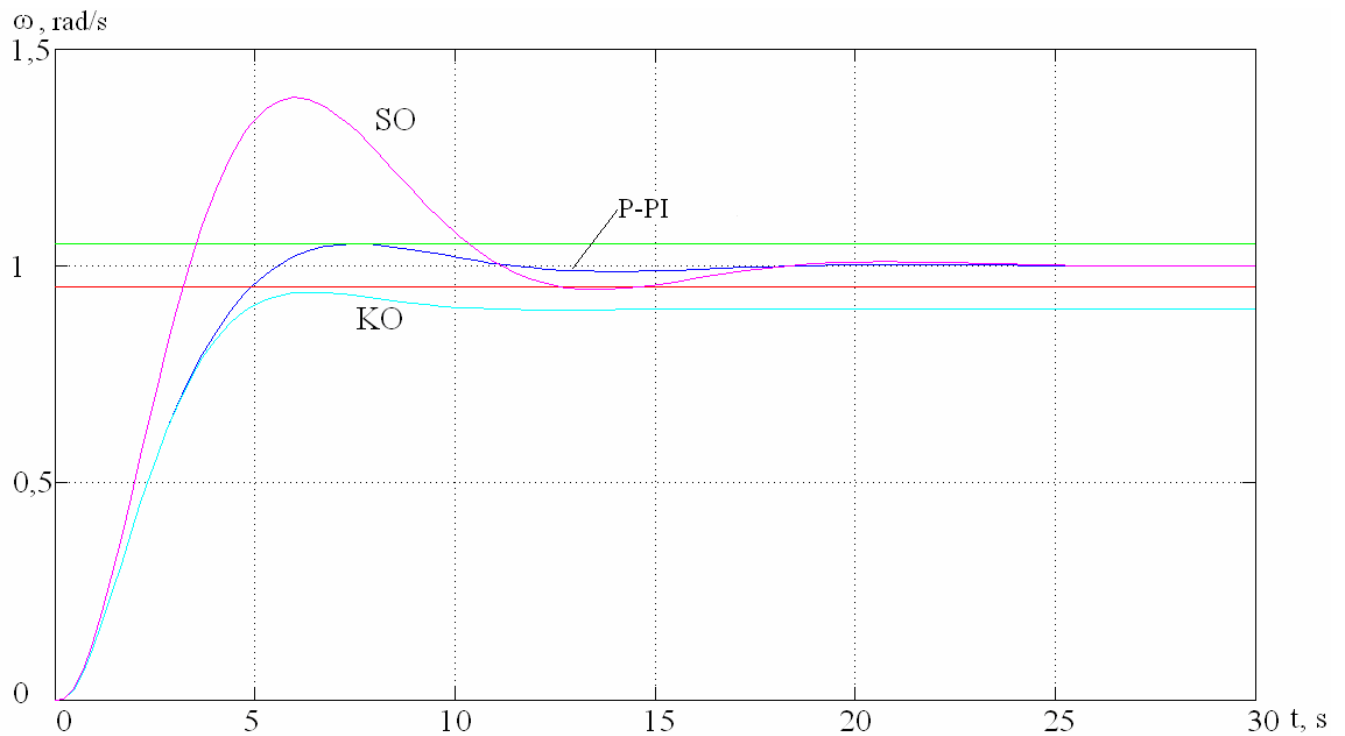
Nuo 2.14 iki 2.18 pav. pateikiama elektromechaninės vykdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi pereinamųjų procesų geriausios kreivės. Šios kreivės gaunamos esant geriausiai P valdymo dėsnio veikimo trukmei (2.1 lentelė), kai minimali ITAE integralinio rodiklio reikšmė, prie 0, 5, 10, 15, 20 % statinių apkrovų.



2.14 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai apkrova 0 %

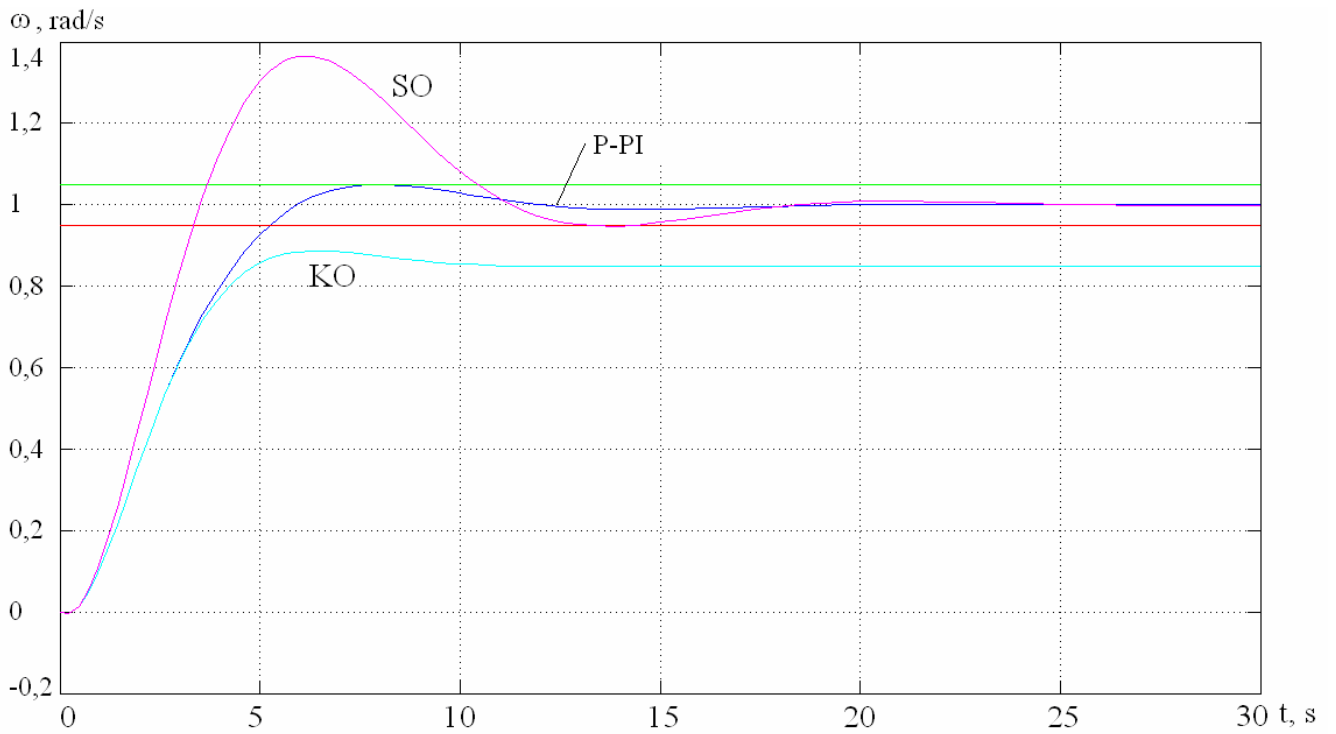


2.15 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai apkrova 5 %

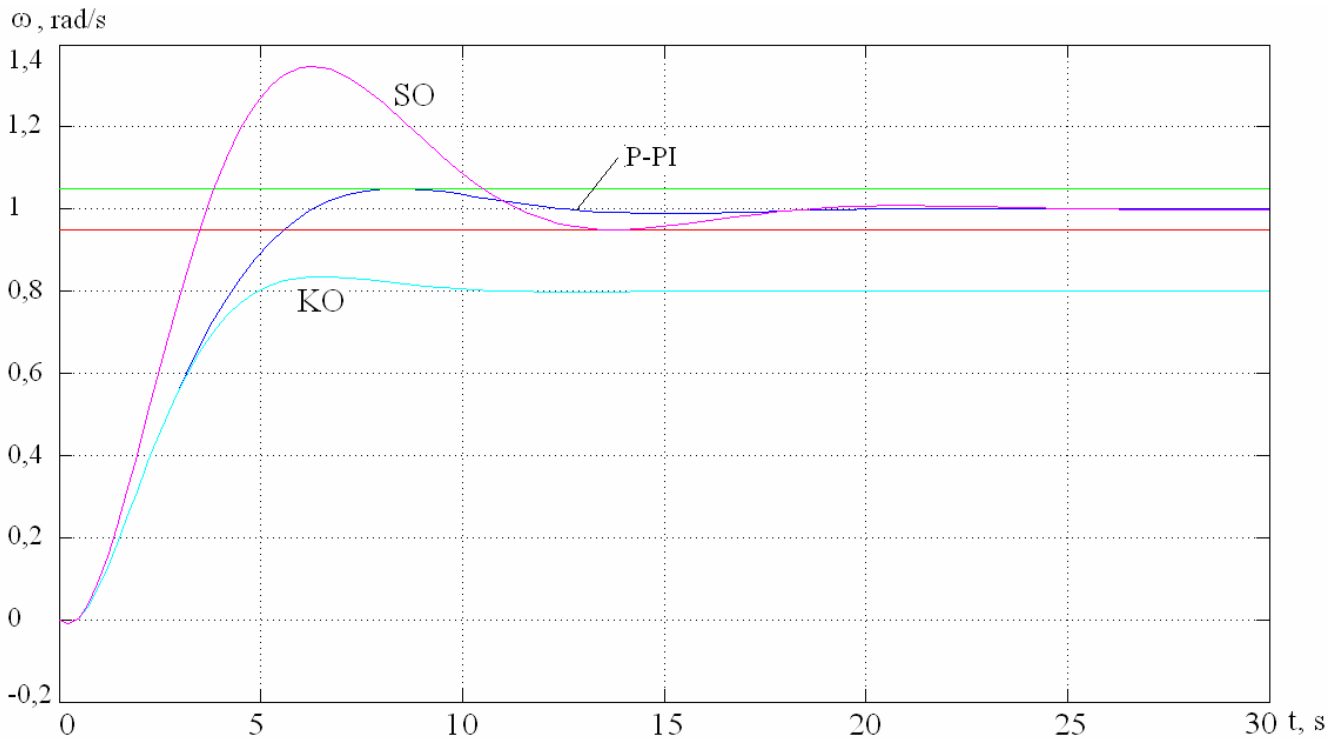


2.16 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai apkrova 10 %





2.17 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai apkrova 15 %



2.18 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai apkrova 20 %

Greičio pereinamojo proceso kreivės nuo 2.14 iki 2.18 pav. rodo, kad naudojant P-PI kintamos struktūros reguliatorių, suderinami simetrinio (SO) ir kiekybinio (KO) optimumų teikiami privalumai ir pašalinami trūkumai. Užtikrinamas nedidelis greičio dinaminis nuokrypis, neviršijantis 5 %, kas nėra būdinga simetriniam optimumui, ir garantuojamas nulinis greičio statinis nuokrypis, kas nėra būdinga kiekybiniam optimumui.

Gauti rezultatai yra universalūs ir gali būti pritaikyti įvairioms elektromechaninėms greičio valdymo sistemoms – tiek su nuolatinės, tiek ir su kintamosios srovės elektros varikliais.

### 3. GAUTŲ DUOMENŲ PRITAIKYMAS NUOLATINĖS SROVĖS ELEKTROS PAVARAI

#### 3.1 Modeliuojamos nuolatinės srovės elektros pavaros parametrai

Dėl greičio valdymo paprastumo kintamos struktūros greičio reguliatoriaus realizavimas modeliuojamas greičio valdymo sistemoje su nuolatinės srovės nepriklausomo žadinimo varikliu – nuolatinės srovės elektros pavaroje [3].

Kintamos struktūros greičio reguliatorius gali būti taikomas elektromechaninėse vykdyimo sistemose – nuolatinės srovės elektros pavarose, kai šulinio įėjimo signalo pokytis yra tokios vertės, kad inkaro srovė pereinamojo proceso metu nėra ribojama [3].

Kad būtų galima palyginti kintamos struktūros reguliatorių efektyvumą, buvo pasirinkta ta pati elektromechaninė sistema, kaip ir ištirtos [3] PI-P-PI sistemos. Nuolatinės srovės elektros pavaros modeliui sudaryti MATLAB/Simulink programa pasirenkamas nuolatinės srovės nepriklausomo žadinimo elektros variklis tokių parametrų:  $P_n = 0,28$  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>. Priimama, kad galios keitiklio laiko pastovioji  $T_k = 0,005$  s. Siekiant išvengti inkaro srovės ribojimo, elektros pavaros greičio nustatymo signalo vertė priimama 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 [3].

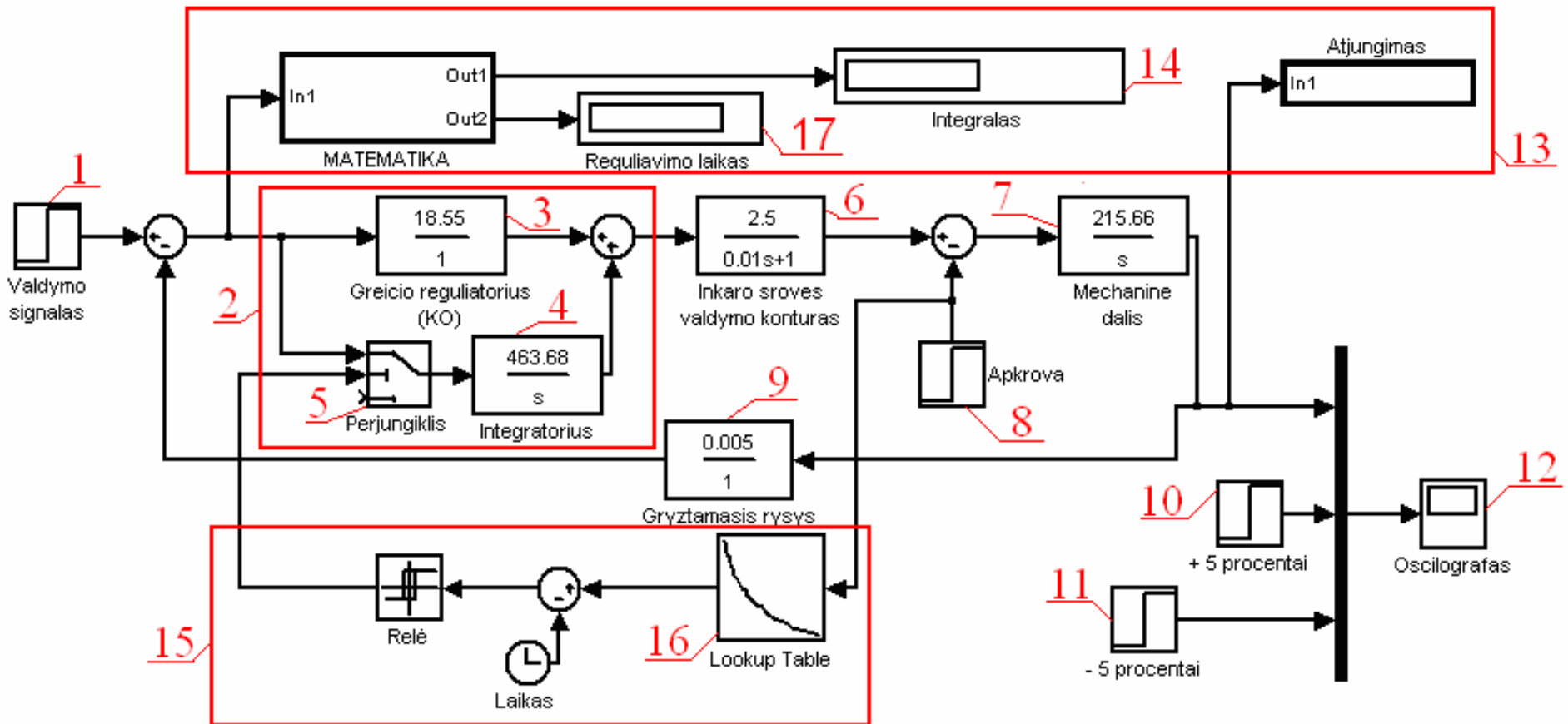
#### 3.2 Nuolatinės srovės elektros pavaros modelis su realizuotu kintamos struktūros reguliatoriumi MATLAB/Simulink programa

Modelio parametrų vertės:

Greičio nustatymo signalo vertė: 0.785395/4. Proporcinio reguliatoriaus, atitinkančio kiekybinį optimumą, stiprinimo koeficientas: 18.55. PI reguliatoriaus, atitinkančio simetrinį optimumą, integruojanti dalis:  $\frac{463.68}{s}$ . Pavaldis inkaro srovės valdymo kontūras suderintas pagal kiekybinį

optimumą ir aproksimuotas perdavimo funkcija:  $\frac{2.5}{0.01s+1}$ . Variklio mechaninė dalis apibūdinama

perdavimo funkcija:  $\frac{215.66}{s}$ . Grįžtamojo ryšio koeficientas: 0.005.



3.1 pav. Nuolatinės srovės elektros pavaros modelis su realizuotu kintamos struktūros reguliatoriumi (Sistemą sudaro: valdymo signalo grandis (1); kintamos struktūros reguliatorius (2) su atskirtomis proporcinė (3) ir integruojančia (4) dalimis, reguliatoriaus valdymo dėsnio perjungiklis (5); pavaldus srovės valdymo kontūras (6); variklio mechaninė grandis (7); apkrovos grandis (8); grįžtamojo ryšio grandis (9); leistino nuokrypio 5 % grandys (10, 11); oscilografas, pereinamiesiems procesams stebėti (12); matematinis modelis (13) ITAE integralinio kokybės rodiklio vertei stebėti (14)); P valdymo dėsnio veikimo trukmės valdymo grandis (15); P valdymo dėsnio veikimo trukmės nuo apkrovos priklausomybės duomenų masyvas (16); (17) grandis reguliavimo laikui stebėti )

Turėdami P-PI kintamos struktūros reguliatoriaus P valdymo dėsnio veikimo trukmės (perjungimo laiko) priklausomybę nuo apkrovos 2.7 pav., galime sudaryti modelį, kuris automatiškai keistų greičio reguliatoriaus struktūrą iš P dėsnio į PI dėsnį. Šiam veiksmui atlikti naudojame iš SIMULINK posistemės bloką LOOKUP TABLE, tai duomenų masyvo blokas, į jį yra suvedami jau žinomi duomenys, suvedę į šį bloką P valdymo dėsnio veikimo trukmės (perjungimo laiko) priklausomybę nuo apkrovos 2.7 pav., gauname tikslų perjungimo laiką veikiant įvestai (nustatytai tyrimo eigoje) statinės apkrovos vertei, tarpinės reikšmės šis blokas tiesiškai interpoliuoja.

### 3.3 Geriausią dinamikos kokybę užtikrinančio greičio reguliatoriaus perjungimo parametro priklausomybė nuo statinės apkrovos

Pritaikant P valdymo dėsnio veikimo trukmės  $t_{per.l.}^*$  priklausomybę nuo apkrovos šiam konkrečiam atvejui, reikia vadovautis formule:

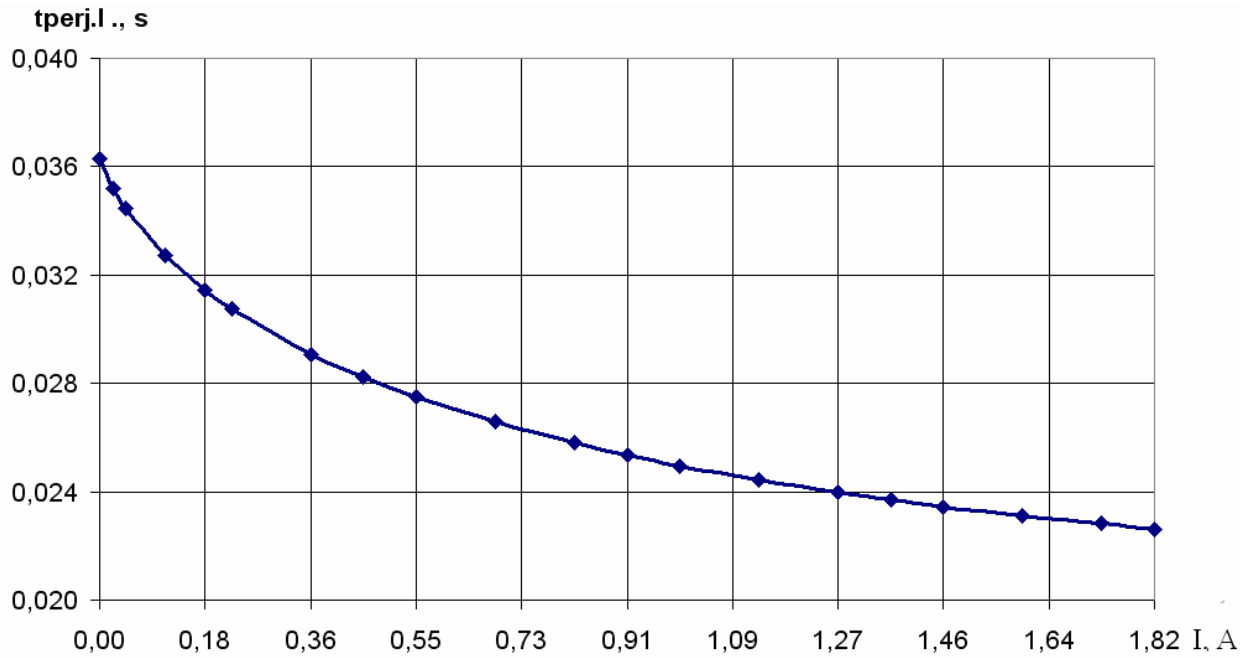
$$t_{per.l.} = t_{per.l.}^* \cdot T_{srov.kont.} \quad (3.1)$$

čia  $t_{per.l.}^*$  – universali P valdymo dėsnio veikimo trukmė, 2.7 pav.;

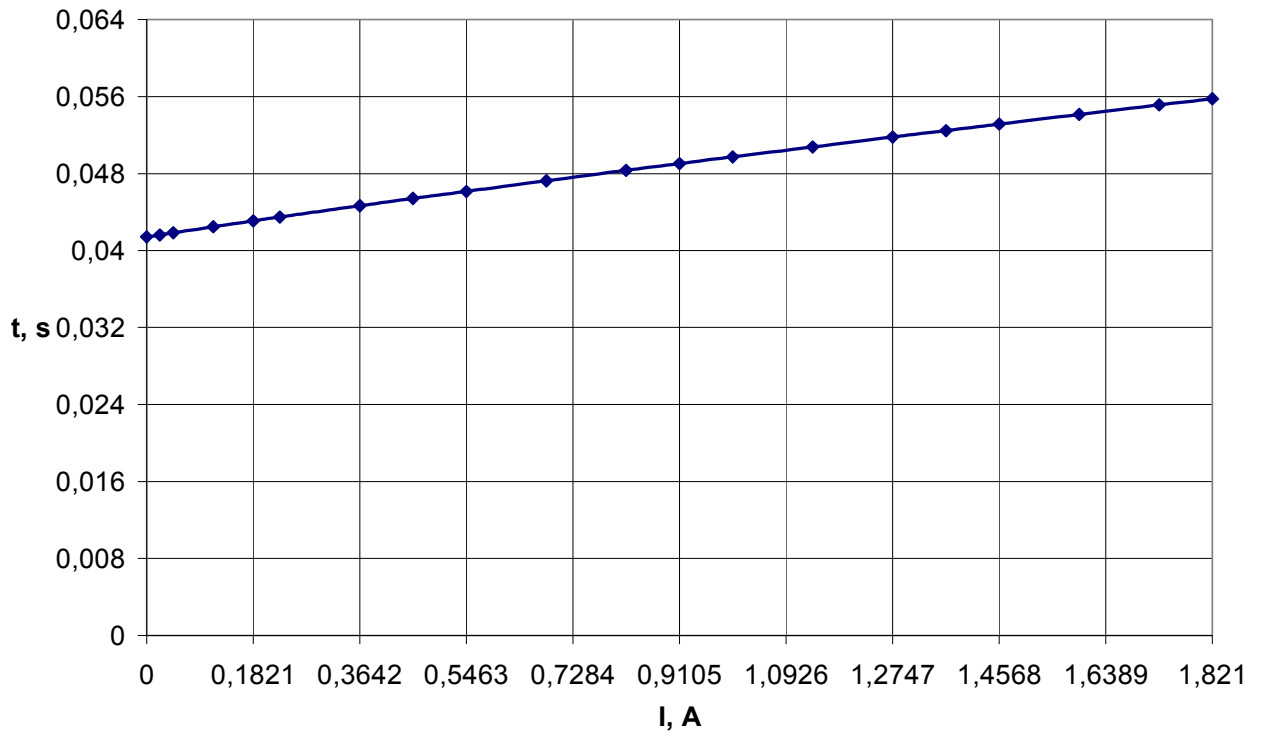
$T_{srov.kont.}$  – nagrinėjamos sistemos srovės kontūro laiko pastovioji, s;

Naudojant (3.1) formulę ir 2.7 pav. kreivę galima rasti elektromechaninės vykdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi P valdymo dėsnio veikimo trukmę, žinant sistemos  $T_{srov.kont.}$  srovės kontūro laiko pastoviąją, šiuo konkrečiu atveju, srovės kontūro laiko pastovioji yra 0,01 s.

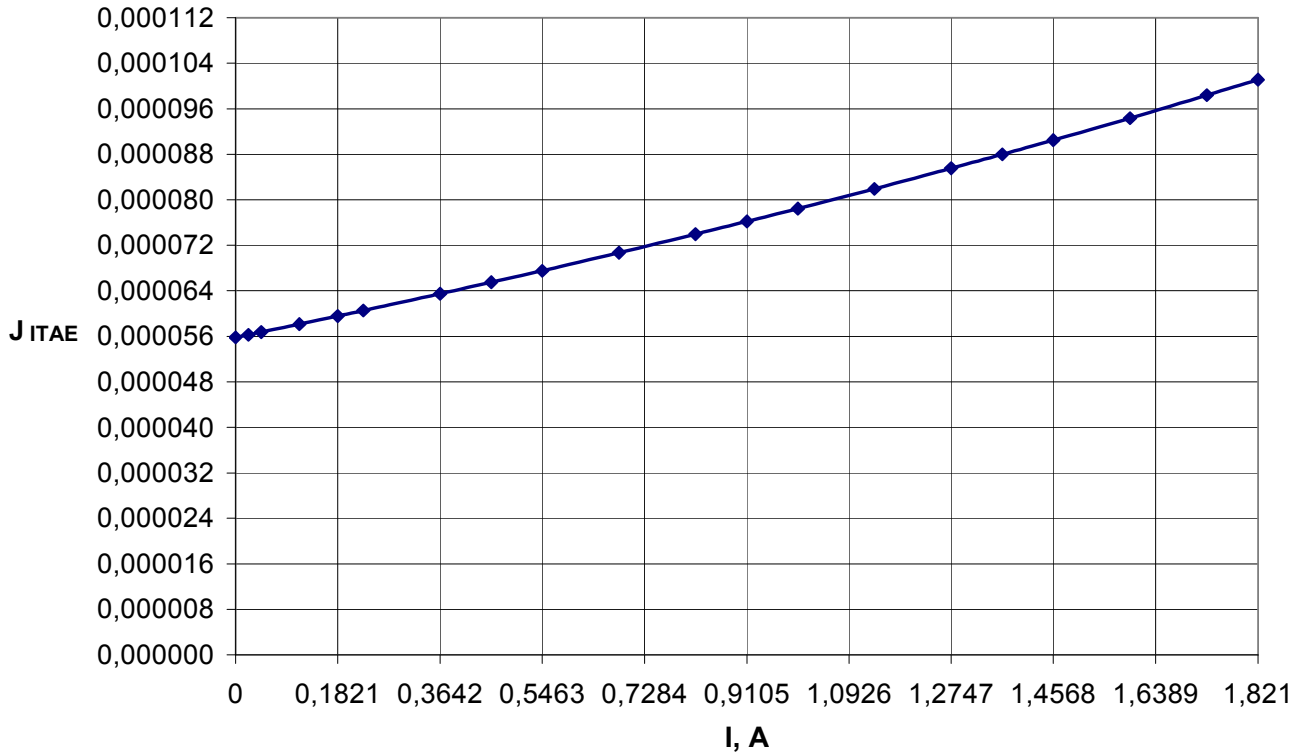
3.2 pav. pateikiama apskaičiuota nuolatinės srovės elektros pavaros P valdymo dėsnio veikimo trukmės priklausomybė nuo statinės apkrovos, šios priklausomybės kitimo pobūdis yra analogiškas 2.7 pav. priklausomybės kitimui.



3.2 pav. Elektros pavaros greičio valdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi P valdymo dėsnio veikimo trukmės priklausomybė nuo statinės apkrovos



3.3 pav. Elektros pavaros greičio valdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi reguliavimo laiko priklausomybė nuo statinės apkrovos



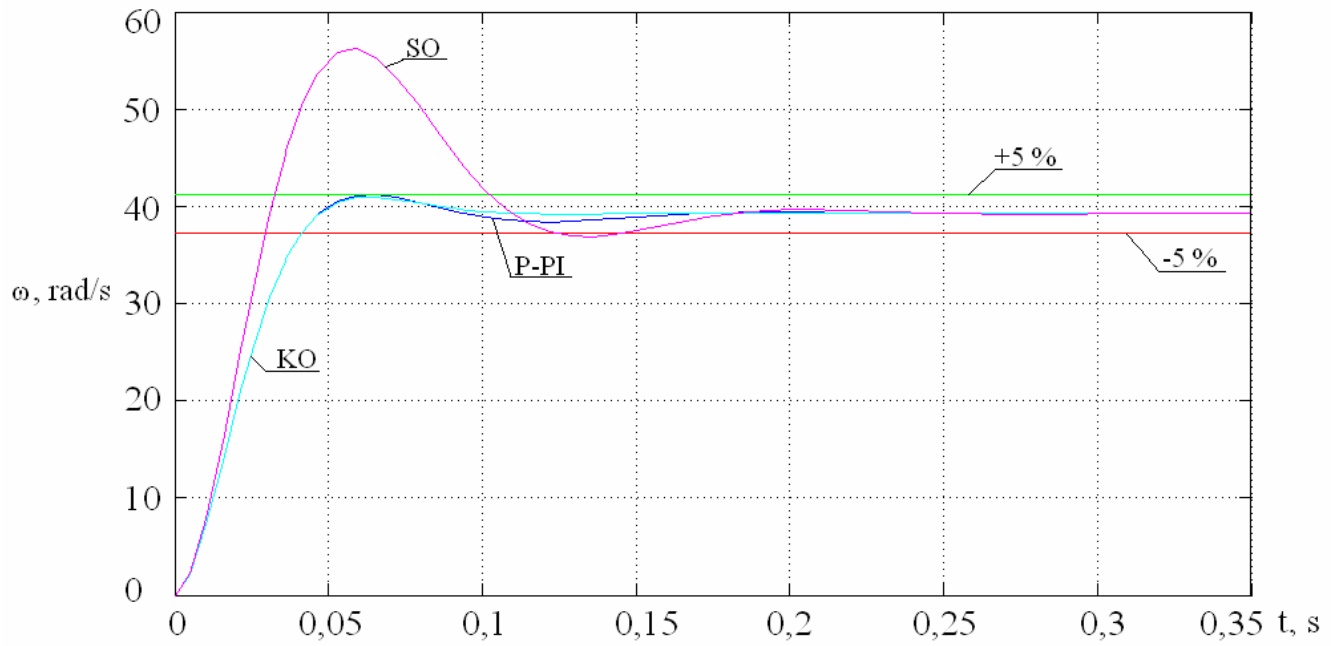
3.4 pav. Elektros pavaros greičio valdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi ITAE integralinio rodiklio priklausomybė nuo statinės apkrovos

Gaunamų elektros pavaros dinamikos kokybės rodiklių kreivių 3.3, 3.4 pav. kitimo pobūdis yra analogiškas gaunamoms apibendrintoje sistemoje 2.4, 2.5 pav. kokybės kitimo kreivėms.

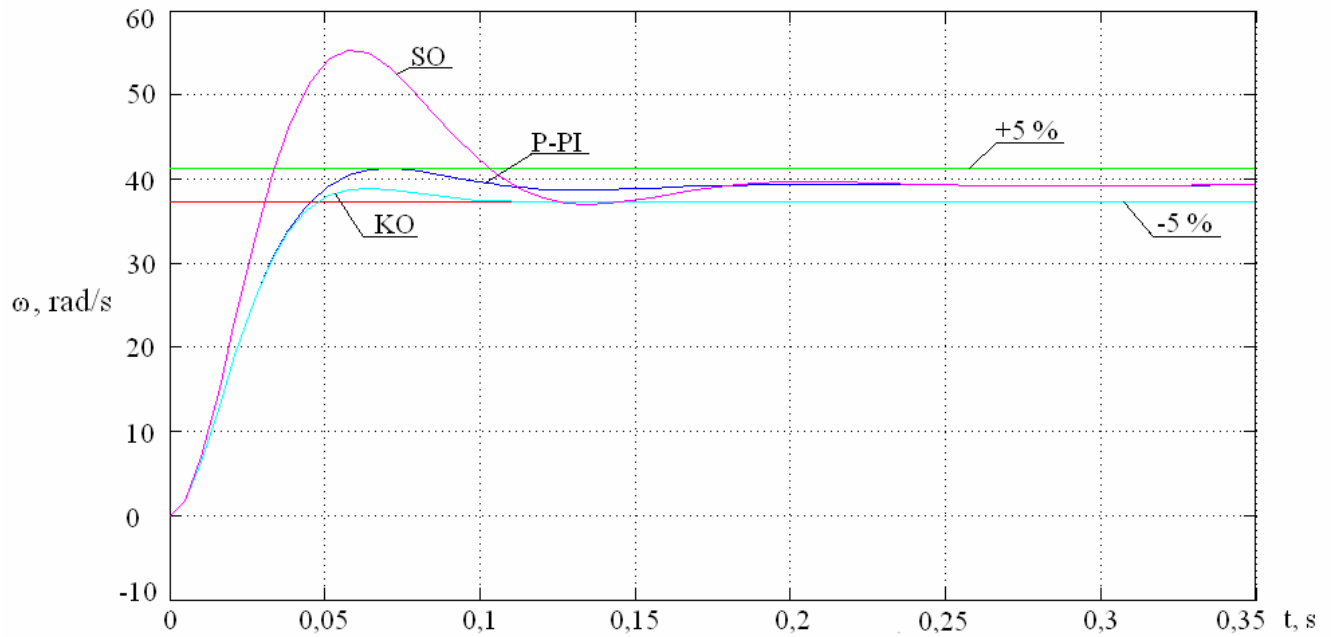
### 3.4 Nuolatinės srovės elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės

Nuo 3.5 iki 3.9 pav. pateikiama nuolatinės srovės elektros pavaros su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi pereinamųjų procesų geriausios kreivės. Šios kreivės gaunamos esant apskaičiuotai pagal (3.1) formulę geriausiai P valdymo dėsnio veikimo trukmei, prie 0, 5, 10, 15, 20 % statinių apkrovų.

Greičio pereinamojo proceso kreivės nuo 3.5 iki 3.9 pav. rodo, kad naudojant P-PI kintamos struktūros reguliatorių, suderinami simetrinio (SO) ir kiekybinio (KO) optimumų teikiami privalumai ir pašalinami trūkumai. Užtikrinamas nedidelis greičio dinaminis nuokrypis, neviršijantis 5 %, kas nėra būdinga simetriniam optimumui, ir garantuojamas nulinis greičio statinis nuokrypis, kas nėra būdinga kiekybiniam optimumui.

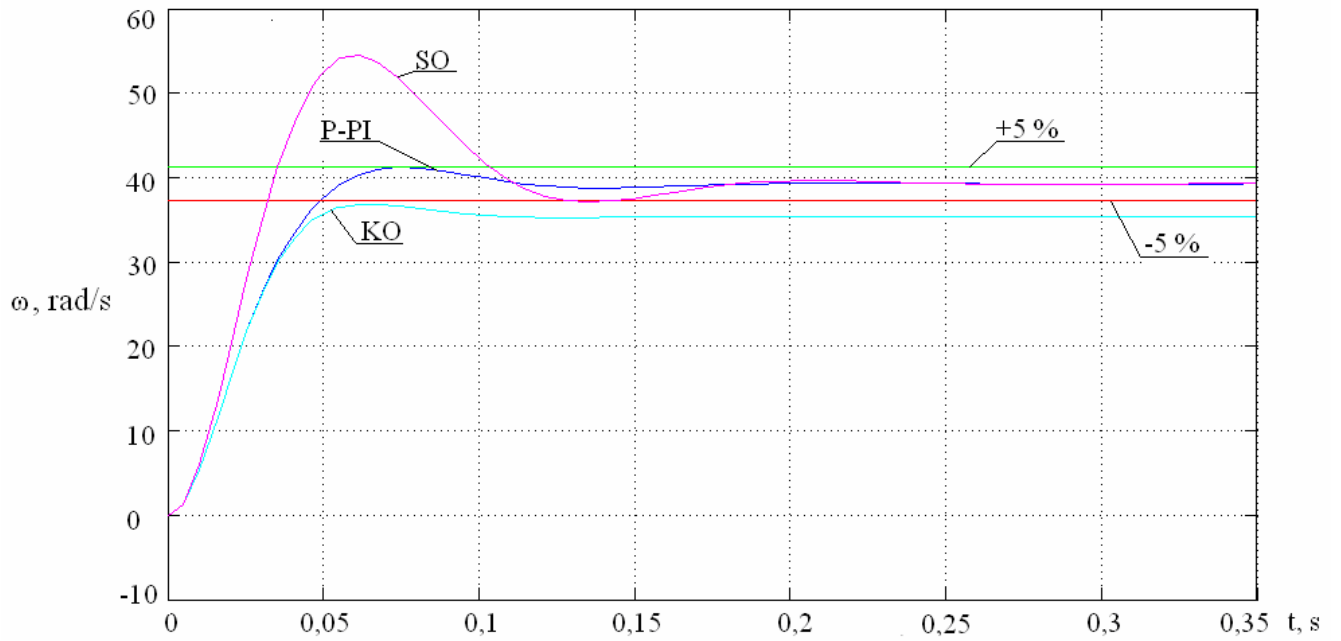


3.5 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai statinė apkrova 0 %

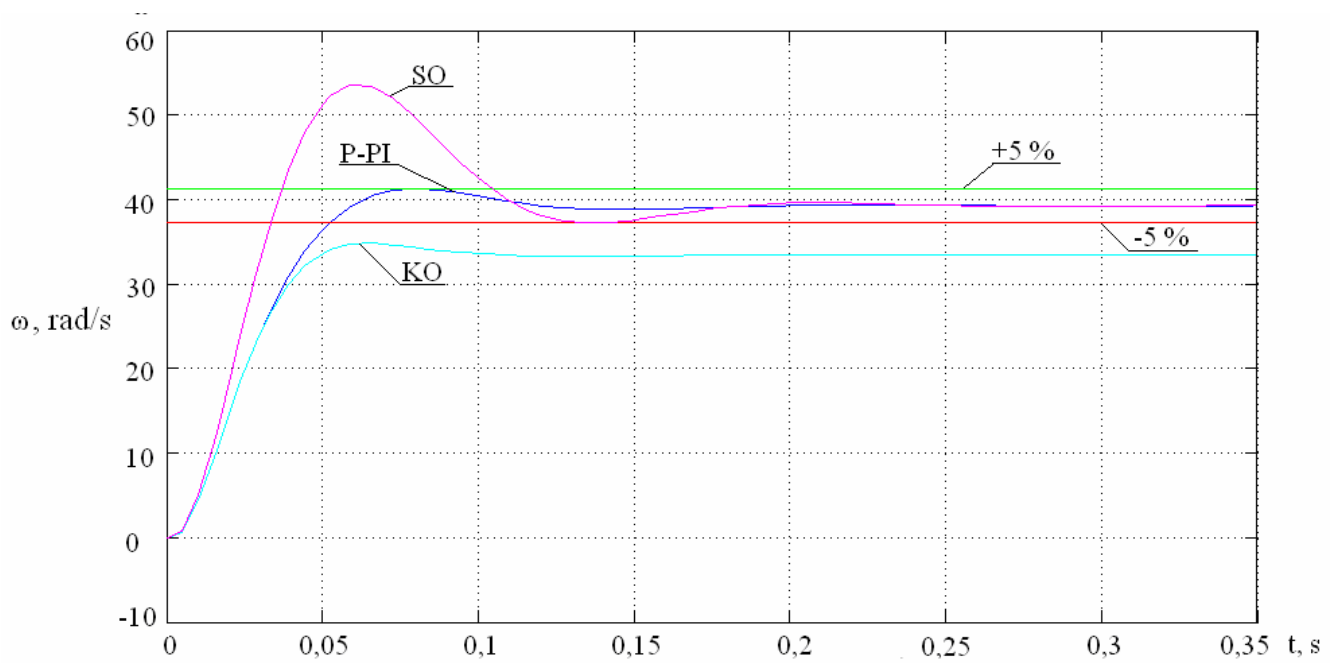


3.6 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai statinė apkrova 5 %

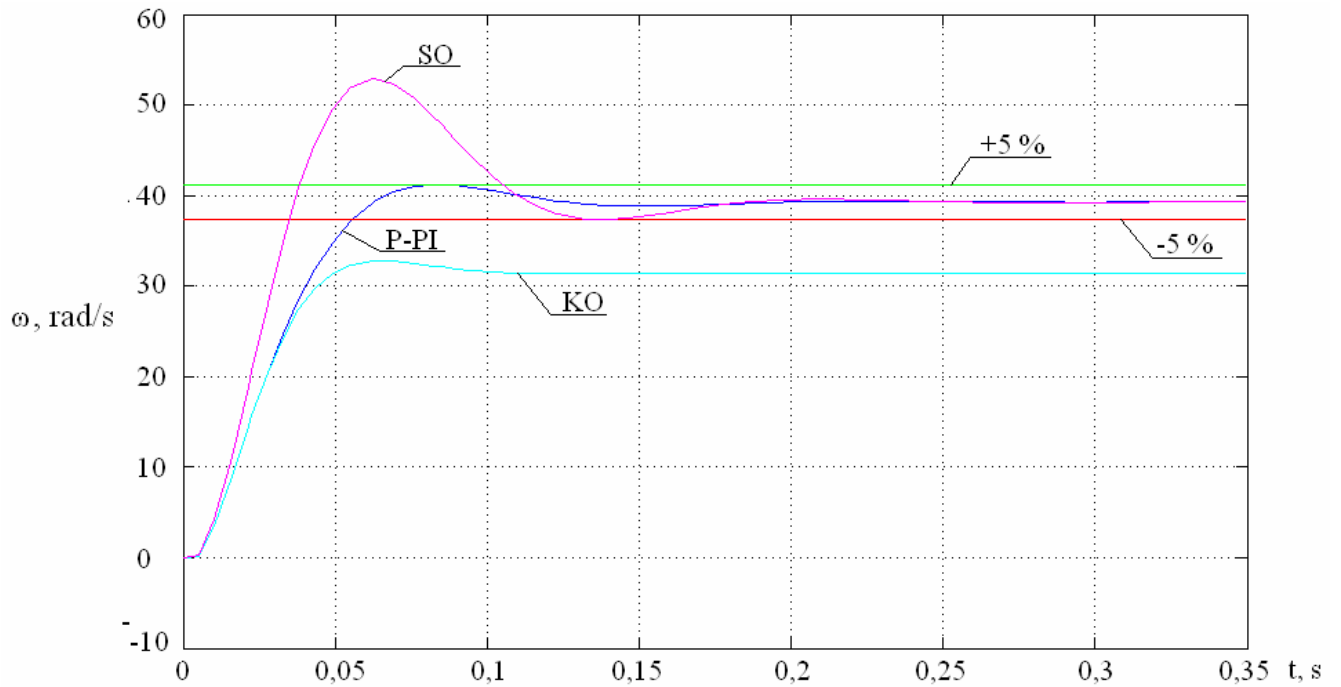




3.7 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai statinė apkrova 10 %



3.8 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai statinė apkrova 15 %



3.9 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai statinė apkrova 20 %

Elektros pavaros greičio pereinamojo proceso kreivių nuo 3.5 iki 3.9 pav. kitimo pobūdis yra analogiškas greičio pereinamojo proceso kreivėms gaunamoms apibendrintos sistemos atveju (nuo 2.14 iki 2.18 pav.). Tas parodo gautų rezultatų universalumą ir pritaikomumą.

## 4. ELEKTROMECHANINĖS VYKDYMO SISTEMOS SU PASTOVIOS IR KINTAMOS STRUKTŪROS REGULIATORIAIS DINAMIKOS KOKYBĖS PALYGINIMAS

### 4.1 Apibendrintos elektromechaninės vykdymo sistemos su pastovios ir kintamos struktūros regulatoriais dinamikos kokybės palyginimas

Turėdami apibendrintų elektromechaninių vykdymo sistemų su pastovios struktūros regulatoriumi (SO) ir (P-PI), (PI-P-PI) [3] kintamos struktūros regulatoriais dinamikos kokybės (ITAE rodiklio) kitimo duomenis 4.1 pav., galime juos tarpusavyje palyginti. Palyginama yra su sistemos su pastovios struktūros regulatoriaus (SO) integraliniu dinamikos kokybės rodikliu ITAE. Palyginimas atliekamas pagal (4.1) (4.2) formules:

$$\Delta 1 = \frac{J_{ITAE_{KSR(P-PI)}} - J_{ITAE_{SO}}}{J_{ITAE_{SO}}} \cdot 100\%; \quad (4.1)$$

čia  $J_{ITAE_{KSR(P-PI)}}$  – elektromechaninės vykdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros regulatoriumi ITAE integralinis rodiklis;

$J_{ITAE_{KSR(SO)}}$  – elektromechaninės vykdymo sistemos su (SO) pastovios struktūros regulatoriumi ITAE integralinis rodiklis;

$$\Delta 2 = \frac{J_{ITAE_{KSR(PI-P-PI)}} - J_{ITAE_{KSR(P-PI)}}}{J_{ITAE_{SO}}} \cdot 100\%; \quad (4.2)$$

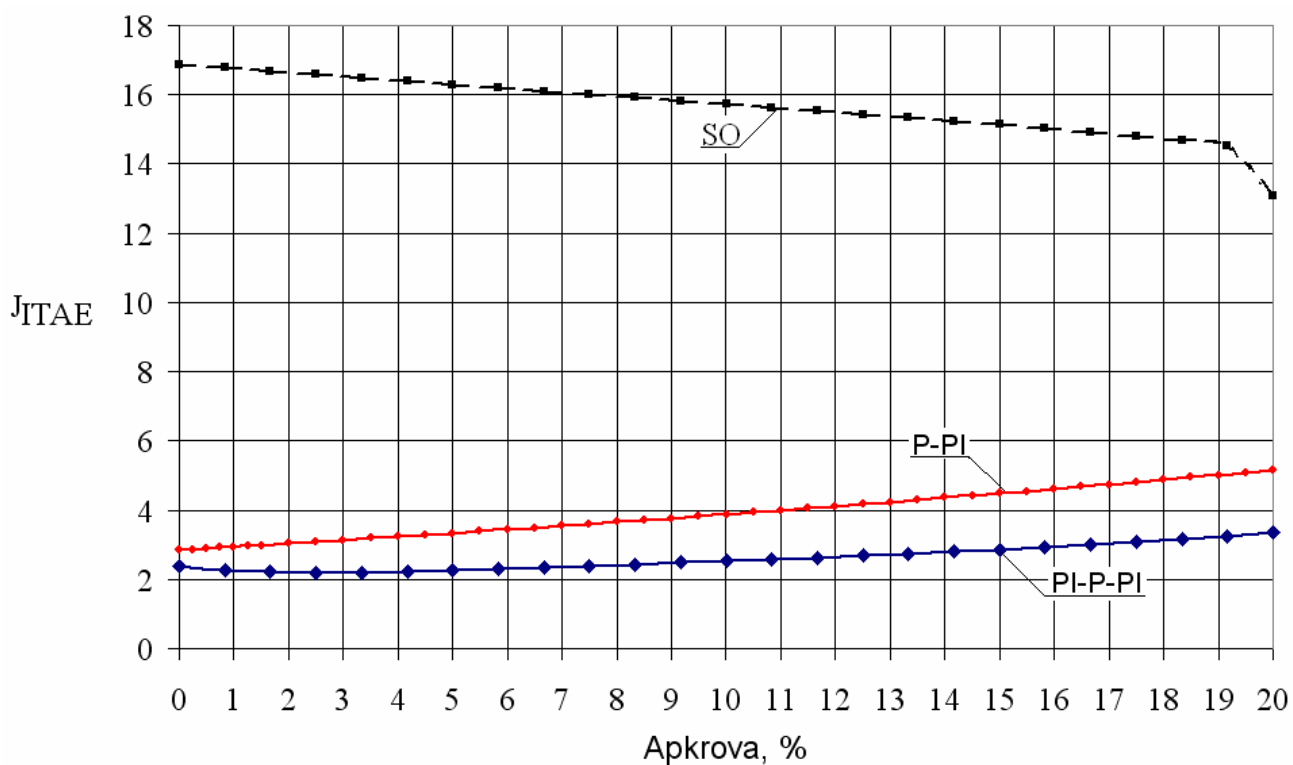
čia  $J_{ITAE_{KSR(PI-P-PI)}}$  – elektromechaninės vykdymo sistemos su PI-P-PI kintamos struktūros regulatoriumi ITAE integralinis rodiklis;

Skaičiavimo rezultatai pateikiami 4.1 lentelėje:

4.1 lentelė

**Elektromechaninės vykdymo sistemos dinamikos kokybės palyginimas**

Apkrova %	JITAE SO (PI)	JITAE KSR (PI-P-PI)	JITAE KSR (P-PI)	$\Delta 1$ %	$\Delta 2$ %
0	16,88	2,38	2,84	-83,15	-2,76
2,5	16,59	2,20	3,08	-81,41	-5,33
5	16,30	2,27	3,34	-79,53	-6,52
7,5	16,01	2,40	3,60	-77,51	-7,51
10	15,72	2,52	3,88	-75,32	-8,65
12,5	15,44	2,68	4,17	-72,96	-9,67
15	15,14	2,87	4,48	-70,39	-10,67
17,5	14,81	3,08	4,81	-67,56	-11,62
20	13,10	3,36	5,15	-60,70	-13,67



4.1 pav. Elektromechaninės vykdymo sistemos su pastovios ir kintamos struktūros reguliatoriais dinamikos kokybės kitimas

Elektromechaninės vykdymo sistemos su pastovios ir kintamos struktūros reguliatoriais ITAE rodiklio priklausomybės nuo apkrovos rodo, kad naudojant P-PI kintamos struktūros reguliatorių gaunamas elektromechaninės vykdymo sistemos dinamikos kokybės pagerėjimas atžvilgiu sistemos su pastovios struktūros reguliatoriumi yra nuo 60,7 iki 83,15 %. Tačiau atžvilgiu sistemos su PI-P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi gaunamas kokybės pablogėjimas yra nuo 2,76 iki 13,67 %.

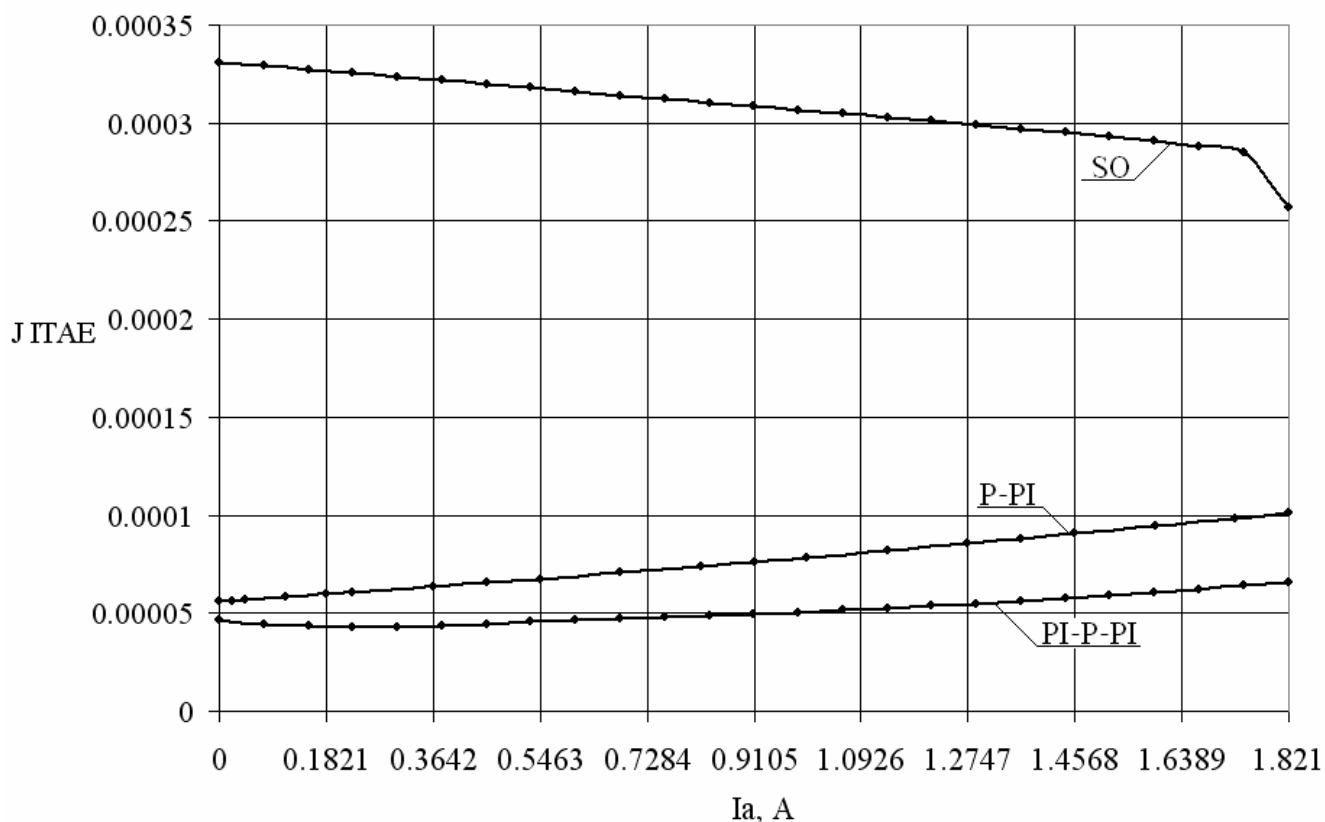
#### **4.2 Nuolatinės srovės elektros pavaros su pastovios ir kintamos struktūros reguliatoriais dinamikos kokybės palyginimas**

Turėdami nuolatinės srovės elektros pavaros (parametrai aprašyti 3.1 poskyryje) su pastovios struktūros reguliatoriumi (SO) ir (P-PI), (PI-P-PI) [3] kintamos struktūros reguliatoriais dinamikos kokybės (ITAE rodiklio) kitimo duomenis 4.2 pav., galime juos tarpusavyje palyginti. Palyginama yra sistemos su pastovios struktūros reguliatoriaus (SO) integraliniu dinamikos kokybės rodikliu ITAE. Palyginimas atliekamas pagal (4.1) (4.2) formules. Skaičiavimo duomenys pateikiami 4.2 lentelėje.

4.2 lentelė

#### **Nuolatinės srovės elektros pavaros dinamikos kokybės palyginimas**

<b>Apkrova I, A</b>	<b>JITAE SO (PI)</b>	<b>JITAE KSR (PI-P-PI)</b>	<b>JITAE KSR (P-PI)</b>	<b><math>\Delta 1</math> %</b>	<b><math>\Delta 2</math> %</b>
<b>0.00</b>	<b>0.00033115</b>	<b>0.00004664</b>	<b>0.0000558</b>	<b>-83.15</b>	<b>-2.77</b>
<b>0.23</b>	<b>0.00032544</b>	<b>0.00004314</b>	<b>0.0000605</b>	<b>-81.40</b>	<b>-5.35</b>
<b>0.46</b>	<b>0.00031977</b>	<b>0.00004461</b>	<b>0.0000655</b>	<b>-79.52</b>	<b>-6.53</b>
<b>0.68</b>	<b>0.00031414</b>	<b>0.00004707</b>	<b>0.0000707</b>	<b>-77.49</b>	<b>-7.52</b>
<b>0.91</b>	<b>0.00030851</b>	<b>0.00004942</b>	<b>0.0000762</b>	<b>-75.30</b>	<b>-8.68</b>
<b>1.14</b>	<b>0.00030288</b>	<b>0.00005263</b>	<b>0.0000819</b>	<b>-72.95</b>	<b>-9.67</b>
<b>1.37</b>	<b>0.00029705</b>	<b>0.00005626</b>	<b>0.0000880</b>	<b>-70.38</b>	<b>-10.69</b>
<b>1.59</b>	<b>0.00029067</b>	<b>0.00006052</b>	<b>0.0000943</b>	<b>-67.54</b>	<b>-11.64</b>
<b>1.82</b>	<b>0.00025697</b>	<b>0.00006587</b>	<b>0.0001011</b>	<b>-60.66</b>	<b>-13.71</b>



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

Elektromechaninės vykdymo sistemos su pastovios ir kintamos struktūros reguliatoriais ITAE rodiklio priklausomybės nuo apkrovos rodo, kad naudojant P-PI kintamos struktūros reguliatorių gaunamas elektromechaninės vykdymo sistemos dinamikos kokybės pagerėjimas atžvilgiu sistemos su pastovios struktūros reguliatoriumi yra nuo 60,66 iki 83,15 %. Tačiau atžvilgiu sistemos su PI-P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi gaunamas kokybės pablogėjimas yra nuo 2,77 iki 13,71 %. Gaunami procentai yra analogiški kaip ir apibendrintos sistemos.

## IŠVADOS

1. Proporcinio (P) – proporcinio integruojančio (PI) valdymo dėsnio kintamos struktūros reguliatorius suderina simetrinio ir kiekybinio optimumų privalumus bei pašalina jų trūkumus, užtikrindamas elektromechaninės vykdyto sistemos greičio dinaminį nuokrypį neviršijantį  $\pm 5\%$  ir nulinį greičio statinį nuokrypį.
2. Remiantis ITAE integraliniu kokybės rodikliu nustatyta geriausią elektromechaninės vykdyto sistemos dinamikos kokybę užtikrinanti greičio reguliatoriaus valdymo dėsnio perjungimo parametro priklausomybė nuo statinės apkrovos. Nustatyta, kad didėjant statinei apkrovai P valdymo dėsnio trukmė turi mažėti.
3. Atlikti nuolatinės srovės elektros pavaros su kintamos struktūros greičio reguliatoriumi veikimo imitacijos tyrimai MATLAB/Simulink aplinkoje patvirtina P-PI kintamos struktūros reguliatoriaus tinkamumą kartu užtikrinant sistemos pereinamojo proceso greitaveiką ir nusistovėjusiojo režimo tikslumą.
4. P-PI kintamos struktūros reguliatorius užtikrina nuo 60,7 % iki 83,15 % geresnę elektromechaninės vykdyto sistemos dinamikos kokybę nei pastovios struktūros simetrinio optimumo reguliatorius (PI). Tačiau naudojant P-PI kintamos struktūros reguliatorių gaunama nuo 2,76 % iki 13,67 % blogesnė sistemos dinamikos kokybė nei PI-P-PI kintamos struktūros reguliatoriaus atveju.

**LITERATŪRA**

1. V. Geleževičius, K. Kriščiūnas, V. Kubilius. Elektros pavarų valdymo sistemos. – Vilnius: Mokslas, 1990. – 360 p.
2. В. И. Ключев. Теория электропривода. 2-е издание. Москва: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.
3. N. Šulčius. Mechatroninių vykdyto sistemų valdymas kintamos struktūros reguliatoriais. Daktaro disertacija. Kauno technologijos universitetas, Kaunas, 2008, p. 98.
4. C. Kessler. Über die Vorausberechnung optimal abgestimmter Regelkreise. Teil III: Die optimale Einstellung des Reglers nach dem Betragsoptimum. Regelungstechnik, vol. 3, no. 2, 1955, p. 40-49.
5. C. Kessler. Das symmetrische optimum. Teil 1, 2. Regelungstechnik, vol. 6, 1958, no. 11, p. 395-400, no. 12, p. 432-436.
6. V. A. Geleževičius. Dvikoordinatės vykdyto sistemos. Habilitacinis darbas. Kaunas, Technologija, 1997, p. 86.
7. N. Šulčius, V. A. Geleževičius. Kintamos struktūros reguliatorių taikymas elektros pavarų greitaveikai didinti // Tarpt. konf. Automatika ir valdymo technologijos 2004 pranešimų medžiaga. – Kaunas: Technologija, 2004. – P. 114-118.
8. N. Šulčius, V. A. Geleževičius. Elektromechaninių vykdyto sistemų su kintamos struktūros reguliatoriais dinamikos kokybės tyrimas // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2005. – Nr.7 (63). – P. 40-43.
9. N. Šulčius, V. A. Geleževičius. Investigation of Dynamical Quality of Mechatronic Drive with Variable Structure Velocity Controller // Acta Technica Napocensis, Series: Applied Mathematics and Mechanics, 2006, 49, Vol.III, P.543-548.
10. N. Šulčius, V. A. Geleževičius. Implementation of the Control Algorithm of the Variable Structure Controller in the Electromechanical Servo System // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2006. – No. 7(71). – P. 51-54.
11. N. Šulčius, V. A. Geleževičius. Investigation of Velocity Control System with Programmable Variable Structure Controller // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2007. – No. 5(77). – P. 53-56.



12. V. A. Geleževičius, N. Šulčius. Dynamical Quality Improvement of Mechatronic Servo System Using Variable Structure Velocity Controller // Information Technology and Control. – Kaunas: Technologija, 2009, Vol. 38, No. 1. – P. 38-42.
13. Algis Ivanauskas. Automatinio valdymo teoriniai pagrindai. Kaunas, Technologija, 2005, 484 p.
14. Vytis Svajūnas Januševičius. Automatinis valdymas: teorija, uždaviniai, sprendimai. Kaunas, Technologija, 2003, 556 p.
15. Palm W.J. Modeling, analysis, and control of dynamic systems. 2nd ed. – New York: John Wiley & Sons, 2000. – 854 p.

## SUMMARY

Mikulskis A., Investigation of variable structure controllers application in the electromechanical servo systems: Master thesis of energetic engineer. Research advisor Lect. Dr. N. Šulčius; Šiauliai University, Technological Faculty, Electrical Engineering Department. – Šiauliai, 2009 54 p.

Classical dynamics optimization methods of the electromechanical servo drives are the quantitative and symmetrical optimums. These methods have advantages and disadvantages and are based on the fixed structure velocity controllers – proportional (P) and proportional-integrating (PI). In order to coordinate the advantages and eliminate disadvantages of the quantitative and symmetrical optimum methods have been investigated the P-PI variable structure velocity controller in the electromechanical servo drive. The P-PI variable structure velocity controller ensures that the dynamic error does not exceed 5 % and enables avoiding the static velocity error. According to the ITAE (Integral of Time multiplied by Absolute Error) quality indicator it was determined the control law switching parameter dependence on the static load ensuring the best dynamical quality of the electromechanical servo system. The investigations have been accomplished simulating the electromechanical servo system with P-PI variable structure velocity controller using MATLAB/Simulink program. It has been determined that P-PI variable structure velocity controller ensures from 60,7 % to 83,15 % better dynamical quality of the electromechanical servo system compared to the fixed structure controller (PI) of the symmetrical optimum. But using P-PI variable structure velocity controller the dynamical quality declines from 2,76 % to 13,67 % compared to the PI-P-PI variable structure velocity controller

## TURINYS

LENTELĖS .....	3
PAVEIKSLAI.....	4
ĮVADAS .....	7
1. AUTOMATINIO VALDYMO SISTEMŲ DINAMIKOS OPTIMIZAVIMAS TAIKANT KIEKYBINIO IR SIMETRINIO OPTIMUMŲ METODUS .....	8
1.1 Klasikiniai elektromechaninių vykdyimo sistemų dinamikos optimizavimo metodai.....	8
1.2 Elektromechaninės vykdyimo sistemos hierarchinio valdymo struktūra .....	12
1.3 Srovės reguliavimo kontūro optimizavimas taikant kiekybinio optimumo kriterijų.....	14
1.4 Greičio reguliavimo kontūro optimizavimas taikant simetrinio optimumo kriterijų .....	18
1.5 Elektromechaninė vykdyimo sistema su PI-P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi.....	22
2. ELEKTROMECHANINĖS VYKDYMO SISTEMOS SU P-PI KINTAMOS STRUKTŪROS REGULIATORIUMI TYRIMAS .....	25
2.1 Modelio sudarymas MATLAB/Simulink programa .....	25
2.2 Geriausią dinamikos kokybę užtikrinančio regulatoriaus perjungimo parametro priklausomybė nuo statinės apkrovos nustatymas .....	29
2.3 Elektromechaninės vykdyimo sistemos greičio pereinamųjų procesų kreivės.....	33
3. GAUTŲ DUOMENŲ PRITAIKYMAS NUOLATINĖS SROVĖS ELEKTROS PAVARAI.....	40
3.1 Modeliuojamos nuolatinės srovės elektros pavaros parametrai .....	40
3.2 Nuolatinės srovės elektros pavaros modelis su realizuotu kintamos struktūros reguliatoriumi MATLAB/Simulink programa .....	40
3.3 Geriausią dinamikos kokybę užtikrinančio greičio regulatoriaus perjungimo parametro priklausomybė nuo statinės apkrovos.....	42
3.4 Nuolatinės srovės elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės .....	44
4. ELEKTROMECHANINĖS VYKDYMO SISTEMOS SU PASTOVIOS IR KINTAMOS STRUKTŪROS REGULIATORIAIS DINAMIKOS KOKYBĖS PALYGINIMAS .....	48
4.1 Apibendrintos elektromechaninės vykdyimo sistemos su pastovios ir kintamos struktūros regulatoriais dinamikos kokybės palyginimas.....	48
4.2 Nuolatinės srovės elektros pavaros su pastovios ir kintamos struktūros regulatoriais dinamikos kokybės palyginimas .....	50

IŠVADOS.....	52
LITERATŪRA.....	53

**LENTELĖS**

2.1 lentelė. Elektromechaninės vykdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi perjungimo parametro vertės užtikrinančios geriausią dinamikos kokybę esant įvairioms statinėms apkrovoms.

4.1 lentelė. Elektromechaninės vykdymo sistemos dinamikos kokybės palyginimas.

4.2 lentelė. Nuolatinės srovės elektros pavaros dinamikos kokybės palyginimas.

## PAVEIKSLAI

- 1.1 pav. Automatinio valdymo sistemos reguliavimo kontūro struktūrinė schema.
- 1.2 pav. Reguliavimo kontūro vienetinės šuolinės reakcijos.
- 1.3 pav. Atviro reguliavimo kontūro 1.1 pav., suderinto pagal kiekybinį (KO) bei simetrinį (SO) optimumą LADCH Bode diagramos.
- 1.4 pav. Atviro reguliavimo kontūro 1.1 pav., suderinto pagal kiekybinį (KO) bei simetrinį (SO) optimumą LFDCH Bode diagramos.
- 1.5 pav. Nuolatinės srovės elektros pavaros hierarchinio valdymo sistemos struktūrinė schema.
- 1.6 pav. Srovės reguliavimo kontūro struktūrinė schema.
- 1.7 pav. Nuolatinės srovės elektros pavaros greičio reguliavimo kontūro struktūrinė schema.
- 1.8 pav. Greičio reguliavimo kontūro, optimizuoto pagal kiekybinio optimumo kriterijų, kintamųjų reakcija į šuolinius  $u_{no}(t)$  ir  $i_a(t)$  signalų pokyčius.
- 1.9 pav. Greičio reguliavimo kontūro, optimizuoto pagal simetrinio optimumo kriterijų, kintamųjų reakcija į šuolinius  $u_{no}(t)$  ir  $i_a(t)$  signalų pokyčius.
- 1.10 pav. Nuolatinės srovės elektros pavaros greičio reguliavimo kontūro su įjungtu filtru  $H_F$  struktūrinė schema.
- 1.11 pav. Greičio pereinamojo proceso kreivės: a – tuščiosios veikos metu, b – kai statinė apkrova  $I_a=0,5I_n$ , c – kai statinė apkrova  $I_a=1I_n$  [8, 9].
- 1.12 pav.. Kokybės kitimas tuščiosios veikos ( $t_v$ ) ir statinės apkrovos ( $I_a=0,25\div 1I_n$ ) metu, kai perjungiamą pagal vieną parametą [8].
- 2.1 pav. Apibendrintas elektromechaninės vykdymo sistemos modelis MATLAB/Simulink programos aplinkoje.
- 2.2 pav. Elektromechaninės vykdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi reguliavimo laiko priklausomybė nuo reguliatoriaus struktūros perjungimo laiko.
- 2.3 pav. Elektromechaninės vykdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi ITAE rodiklio priklausomybė nuo reguliatoriaus struktūros perjungimo laiko.
- 2.4 pav. Elektromechaninės vykdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi reguliavimo laiko  $t_{reg}$  priklausomybė nuo statinės apkrovos.
- 2.5 pav. Elektromechaninės vykdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi ITAE integralinio rodiklio priklausomybė nuo statinės apkrovos.

2.6 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi P valdymo dėsnio veikimo trukmės  $t_{perj.l}$  priklausomybė nuo statinės apkrovos.

2.7 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi universali P valdymo dėsnio veikimo trukmės  $t^*_{perj.l}$  priklausomybė nuo statinės apkrovos.

2.8 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi pereinamojo proceso kreives esant pastoviai statinei 20 % apkrovai, P valdymo dėsnio veikimo trukmė yra 0,5 s.

2.9 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi pereinamojo proceso kreives esant pastoviai statinei 20 % apkrovai, P valdymo dėsnio veikimo trukmė yra 1 s.

2.10 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi pereinamojo proceso kreives esant pastoviai statinei 20 % apkrovai, P valdymo dėsnio veikimo trukmė yra 1,8 s.

2.11 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi pereinamojo proceso kreives esant pastoviai statinei 20 % apkrovai, P valdymo dėsnio veikimo trukmė yra 2,2629 s.

2.12 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi pereinamojo proceso kreives esant pastoviai statinei 20 % apkrovai, P valdymo dėsnio veikimo trukmė yra 3 s.

2.13 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi pereinamojo proceso kreives esant pastoviai statinei 20 % apkrovai, P valdymo dėsnio veikimo trukmė yra 3,5 s.

2.14 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai apkrova 0 %.

2.15 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai apkrova 5 %.

2.16 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai apkrova 10 %.

2.17 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai apkrova 15 %.

2.18 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai apkrova 20 %.

3.1 pav. Nuolatinės srovės elektros pavaros modelis su realizuotu kintamos struktūros reguliatoriumi.

3.2 pav. Elektros pavaros greičio valdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi P valdymo dėsnio veikimo trukmės priklausomybė nuo statinės apkrovos.

3.3 pav. Elektros pavaros greičio valdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi reguliavimo laiko priklausomybė nuo statinės apkrovos.

3.4 pav. Elektros pavaros greičio valdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi ITAE integralinio rodiklio priklausomybė nuo statinės apkrovos.

3.5 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai statinė apkrova 0 %.

3.6 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai statinė apkrova 5 %.

3.7 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai statinė apkrova 10 %.

3.8 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai statinė apkrova 15 %.

3.9 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai statinė apkrova 20 %.

4.1 pav. Elektromechaninės vykdymo sistemos su pastovios ir kintamos struktūros reguliatoriais dinamikos kokybės kitimas.

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



## IVADAS

Klasikinės elektros pavarų greičio reguliavimo sistemos yra derinamos kiekybiniam arba simetriniam optimumui [1, 2]. Tenkinant kiekybinio optimumo principą garantuojama optimali greičio reguliavimo kontūro reakcija į šuolinį valdymo poveikį (greičio dinaminis nuokrypis neviršija 5 %) , tačiau atsiranda apkrovos sąlygojama statinė greičio paklaida. Simetrinis optimumas garantuoja nulinę statinę paklaidą, bet išauga maksimali dinaminės paklaidos reikšmė ir pailgėja reguliavimo laikas. Siekiant suderinti kiekybinio ir simetrinio optimumų teikiamus privalumus bei pašalinti jų trūkumus, naudojami kintamos struktūros reguliatoriai. Jau yra ištirtas PI-P-PI kintamos struktūros reguliatorius [3], kuriame du kartus keičiamas valdymo dėsnis. Tačiau suderinti kiekybinio ir simetrinio optimumų teikiamus privalumus bei pašalinti jų trūkumus būtų galima atliekant tik vieną reguliatoriaus valdymo dėsnio keitimą. Todėl šiame darbe ir ištirtas P-PI kintamos struktūros reguliatorius.

**Darbo tikslas** – ištirti P-PI kintamos struktūros reguliatoriaus tinkamumą simetrinio ir kiekybinio optimumų privalumų suderinimui bei trūkumų pašalinimui.

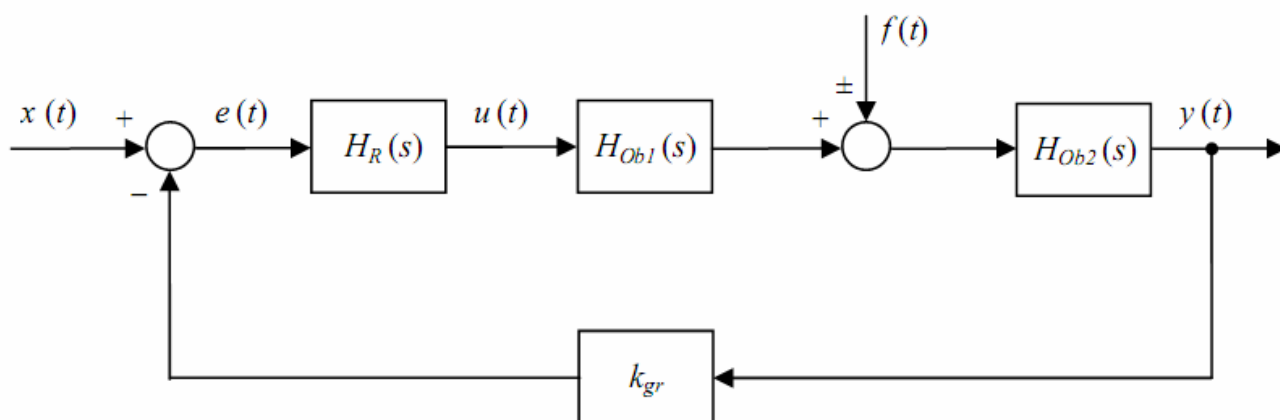
Darbo tikslui pasiekti išskelti šie **uždaviniai**:

1. Sudaryti apibendrintos elektromechaninės vykdymo sistemos su kintamos struktūros reguliatoriumi modelį MATLAB/Simulink programa.
2. Pagal pasirinktus kokybės rodiklius nustatyti geriausią elektromechaninės vykdymo sistemos dinamikos kokybę užtikrinančią reguliatoriaus perjungimo parametro priklausomybę nuo statinės apkrovos.
3. MATLAB/Simulink aplinkoje imituoti realizuoto P-PI kintamos struktūros reguliatoriaus funkcionavimą pasirinktoje konkrečioje elektromechaninėje vykdymo sistemoje.
4. Palyginti elektromechaninės vykdymo sistemos dinamikos kokybę gaunamą naudojant pastovios struktūros (PI), P-PI ir PI-P-PI kintamos struktūros reguliatorius.

# 1. AUTOMATINIO VALDYMO SISTEMŲ DINAMIKOS OPTIMIZAVIMAS TAIKANT KIEKYBINIO IR SIMETRINIO OPTIMUMŲ METODUS

## 1.1 Klasikiniai elektromechaninių vykdyto sistemų dinamikos optimizavimo metodai

Automatinio valdymo sistemų dinamikos optimizavimo metodai – kiekybinis ir simetrinis optimumai suformuoti vokiečių mokslininko Keslerio praėjusio amžiaus viduryje [4, 5]. Pasiūlytų dinamikos formavimo principų, pagrįstų sistemos dažninėmis charakteristikomis, taikymas ypač paplito elektromechaninėse judesio valdymo sistemose ir yra sėkmingai taikoma iki šių dienų. Tai yra universalūs sistemos optimizavimo metodai, kurie yra taikomi ir kitose automatinio valdymo sistemose, kaip vieni iš daugelio reguliatorių parinkimo ir derinimo būdų.



1.1 pav. Automatinio valdymo sistemos reguliavimo kontūro struktūrinė schema

Priimame, kad automatinio valdymo sistemos reguliavimo kontūro struktūrinė schema yra tokia kaip pateikta 1.1 pav., kurioje  $H_{Ob1}$ ,  $H_{Ob2}$  – valdymo objektą aprašančios perdavimo funkcijos,  $k_{gr}$  – sistemos grįžtamojo ryšio koeficientas. Nesant sistemoje papildomų įtaisų, sistemos valdymo kokybinės charakteristikos netenkina keliamų reikalavimų. Todėl norint pagerinti sistemos valdymo kokybines charakteristikas reikalinga, nuosekliai valdymo objektui, įvesti reguliatorių (kompensatorių) su perdavimo funkcija  $H_R$ . Tačiau tuomet iškyla reguliatoriaus valdymo dėsnio parinkimo problema. Siekiant kiekybinio optimumo, automatinio valdymo sistemos reguliatoriaus perdavimo funkcija renkama taip, kad automatinio valdymo sistemos pertraukto (atviro) reguliavimo kontūro 1.1 pav., atstojamoji perdavimo funkcija įgytų tokį pavidalą [1, 2]:

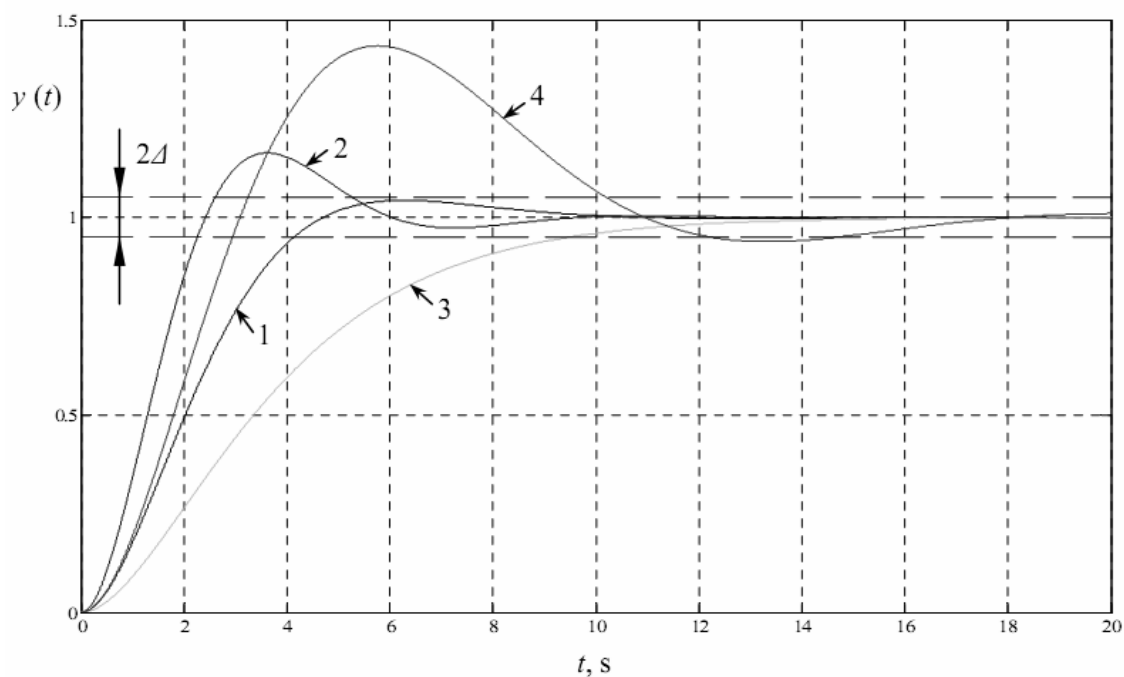
$$H_a(s) = \frac{1}{m \cdot T_\mu \cdot s \cdot (T_\mu \cdot s + 1)}; \quad (1.1)$$

čia  $m$  – pasirenkamas koeficientas;  
 $T_\mu$  – sistemos laiko pastovioji, s;  
 $s$  – kompleksinis (Laplaso) kintamasis.

Tada sujungto (uždaro) reguliavimo kontūro 1.1 pav. atstojamoji perdavimo funkcija:

$$H(s) = \frac{H_{RK}(s) \cdot k_{g.r.}^{-1}}{H_{RK}(s) + 1} = \frac{k_{g.r.}^{-1}}{m \cdot T_\mu \cdot s \cdot (T_\mu \cdot s + 1) + 1}; \quad (1.2)$$

čia  $H_{RK}(s)$  – nekoreguoto pertraukto reguliavimo kontūro perdavimo funkcija;  
 $k_{g.r.}$  – grįžtamojo ryšio stiprinimo koeficientas.



1.2 pav. Reguliavimo kontūro vienatinės šuolinės reakcijos

Darome prielaidą, kad sistemos pereinamasis procesas baigiasi, kai reguliuojamas kintamasis įeina į leistino nuokrypio sritį ir joje pasilieka (5% kriterijus):

$$|y(t) - y_{\infty}(t)| \leq \Delta = 0,05; \quad (1.3)$$

čia  $y(t)$  – momentinė reguliuojamojo kintamojo vertė;  
 $y_{\infty}(t) = x(t)$  – nusistovėjusi reguliuojamojo kintamojo vertė;  
 $\Delta$  – leistino nuokrypio sritis, 5 % .

Tuomet reguliavimo trukmė yra mažiausia:  $t_{regKO} = 4,14 \cdot T_{\mu}$ , kai (1.1) ir (1.2) išraiškose esantis koeficientas  $m = 2$ . Tokį atvejį atitinkanti reguliavimo kontūro 1.1 pav. vienetinė šuolinė reakcija yra parodyta 1.2 pav. 1 kreivė. Maksimalus dinaminis nuokrypis (maksimalus persvyris) tuomet siekia tik 4,32% ir reguliuojamas kintamasis  $y(t)$  pirmą kartą pasiekia nusistovėjusiąją vertę  $x(t) = 1(t)$  per  $4,7 \cdot T_{\mu}$  laiko tarpą. Kai  $m < 2$ , tuomet didėja maksimalus dinaminis nuokrypis ir dėl to ilgėja reguliavimo trukmė (1.2 pav. 2 kreivė, kai  $m = 1$ ). Kai  $m > 2$ , tuomet maksimalus dinaminis nuokrypis mažėja, tačiau ilgėja reguliavimo trukmė (1.2 pav. 3 kreivė, kai  $m = 4$ ). Todėl koeficiento reikšmė  $m = 2$  laikoma geriausia, kiekybiškai optimalia, o atviras reguliavimo kontūras, turintis atstojamąją perdavimo funkciją [1, 2]:

$$H_{KOa}(s) = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu} \cdot s \cdot (T_{\mu} \cdot s + 1)}; \quad (1.4)$$

vadinamas kiekybiškai optimaliu. Todėl norint, kad reguliavimo kontūras būtų kiekybiškai optimalus, įjungiamo regulatoriaus perdavimo funkcija turi būti [1]:

$$H_R(s) = \frac{H_{KOa}(s)}{H_{aNek}(s)}; \quad (1.5)$$

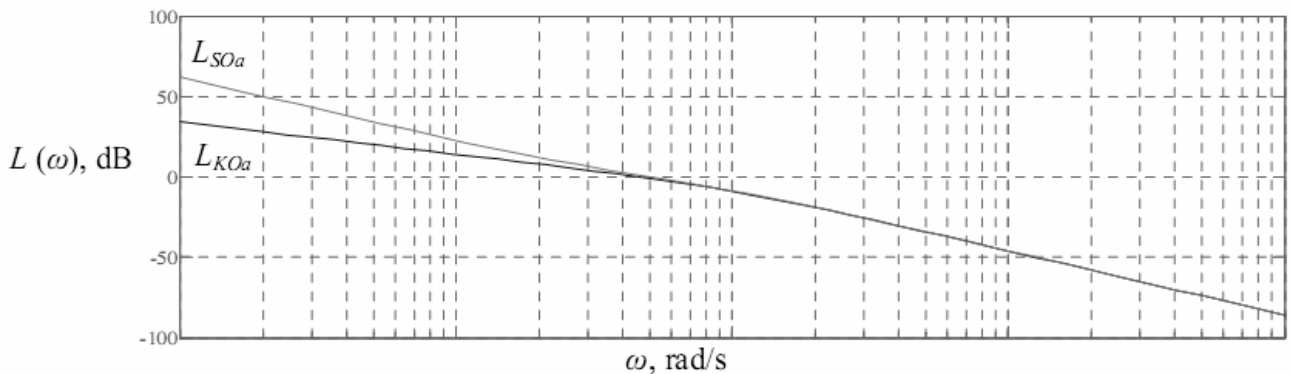
čia  $H_{aNek}(s)$  – atviro nekoreguoto (neturinčio regulatoriaus) reguliavimo kontūro atstojamoji perdavimo funkcija.

Kaip matyti iš (1.4) išraiškos, kiekybiškai optimalus reguliavimo kontūras turi vieną integruojančiąją grandį, todėl šuolinio įėjimo poveikio  $x(t)$  atžvilgiu, sistema yra pirmojo astatiškumo

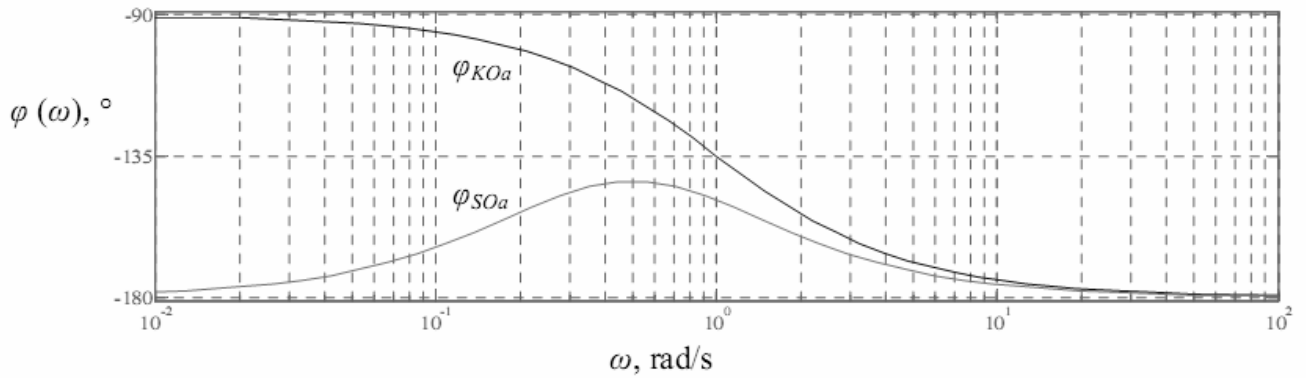
laipsnio – reakcijos  $y(t)$  dydis esant nusistovėjusiam režimui visiškai sutampa su šuolinio įėjimo poveikio verte. Trikdžio  $f(t)$  atžvilgiu 1.1 pav. toks reguliavimo kontūras yra astatinis tik tuomet, kai trikdys veikia už integruojančiosios grandies. Tais atvejais, kai integruojanti grandis yra paskutinė ( $H_{Ob2}(s)$  – 1.1 pav.) ir reguliatorius pagal kiekybinio optimumo sąlygą gaunamas proporcingasis ( $P$ ), tuomet trikdys, veikdamas tarp integruojančiosios grandies ir reguliatoriaus (1.1 pav.), sukelia statinį reguliuojamojo kintamojo  $y(t)$  nuokrypį nuo įėjimo poveikio  $x(t)$  vertės. Nuokrypis yra tuo mažesnis, kuo didesnis stiprinimo koeficientas grandžių, esančių tarp trikdžio veikimo vietos ir sumavimo įtaiso, tačiau nelygus nuliui. Visiškai panaikinti trikdžio sukeltą statinį nuokrypį, galima tikrai įvedus į reguliatorių papildomą integruojančiąją grandį. Tuomet atviro reguliavimo kontūro atstojamoji perdavimo funkcija įgyja pavidalą [1, 2]:

$$H_{SOa}(s) = \frac{1 + 4 \cdot T_{\mu} \cdot s}{4 \cdot T_{\mu} \cdot s} \cdot \frac{1}{2 \cdot T_{\mu} \cdot s \cdot (T_{\mu} \cdot s + 1)}; \quad (1.6)$$

ir kontūras tuomet yra vadinamas simetriškai optimaliu, nes jo Bode amplitudinė diagrama  $L_{SOa}$  1.3 , 1.4 pav. yra simetriška kirtimo (lūžio) dažnio atžvilgiu. Tačiau tai pablogina reguliavimo kontūro dinamines savybes: maksimalus dinaminis nuokrypis padidėja 10 kartų ir siekia 43,4% 1.2 pav. 4 kreivė, reguliavimo trukmė pailgėja 3,5 karto ( $t_{regSO} = 14,7 \cdot T_{\mu}$ ), lyginant su kontūru suderintu pagal kiekybinio optimumo sąlygą 1.2 pav. 1 kreivė.



1.3 pav. Atviro reguliavimo kontūro 1.1 pav., suderinto pagal kiekybinį (KO) bei simetrinį (SO) optimumą LADCH Bode diagramos



1.4 pav. Atviro reguliavimo kontūro 1.1 pav., suderinto pagal kiekybinį (KO) bei simetrinį (SO) optimumą LFDCH Bode diagramos

## 1.2 Elektromechaninės vykdymo sistemos hierarchinio valdymo struktūra

Hierarchinio (kaskadinio, angliškai – *cascade*) valdymo principas yra plačiai taikomas elektromechaninėse vykdymo sistemose. Daugiakontūrėje hierarchinio valdymo sistemoje kiekvienas valdomas kintamasis (koordinatė) turi savo reguliatorių. Kiekvieno pirmesnio (vidinio) kintamojo reguliavimo kontūras yra pavaldus paskesnio (išorinio) kintamojo reguliavimo kontūrai. Todėl tokioje sistemoje kiekvieno kintamojo reguliavimo kontūras yra optimizuojamas (suderinamas) atskirai, pradedant nuo mažiausio ir sparčiausiai veikiančio – vidinio ir baigiant išoriniu valdymo kontūru. Nuolatinės srovės elektros pavaros hierarchinio valdymo sistemos struktūrinė schema yra pavaizduota 1.5 pav. Priimame, kad galios keitiklio laiko pastovioji  $T_K$  yra daug mažesnė už variklio inkaro grandinės elektromagnetinę laiko pastoviąją  $T_{i\Sigma}$ , tuomet nuolatinės srovės elektros pavaros hierarchinio valdymo sistemoje 5 pav. mažiausias valdymo kontūras yra nuolatinės srovės nepriklausomo žadinimo elektros variklio inkaro srovės reguliavimo kontūras su srovės reguliatoriumi  $H_{SR}$ , galios keitikliu, apibūdinamu perdavimo funkcija [1, 2]:

$$H_K(s) = \frac{k_K K}{T_K \cdot s + 1}; \quad (1.9)$$

čia  $k_K$  – galios keitiklio stiprinimo koeficientas;  
 $T_K = L_k/R_k$  – galios keitiklio laiko pastovioji;  
 $L_k$  – galios keitiklio induktyvioji varža;

$R_k$  – galios keitiklio aktyvioji varža;

nuolatinės srovės nepriklausomo žadinimo elektros variklio inkaro grandinė [1]:

$$H_{ink}(s) = \frac{R_{i\Sigma}^{-1}}{T_{i\Sigma} \cdot s + 1}; \quad (1.10)$$

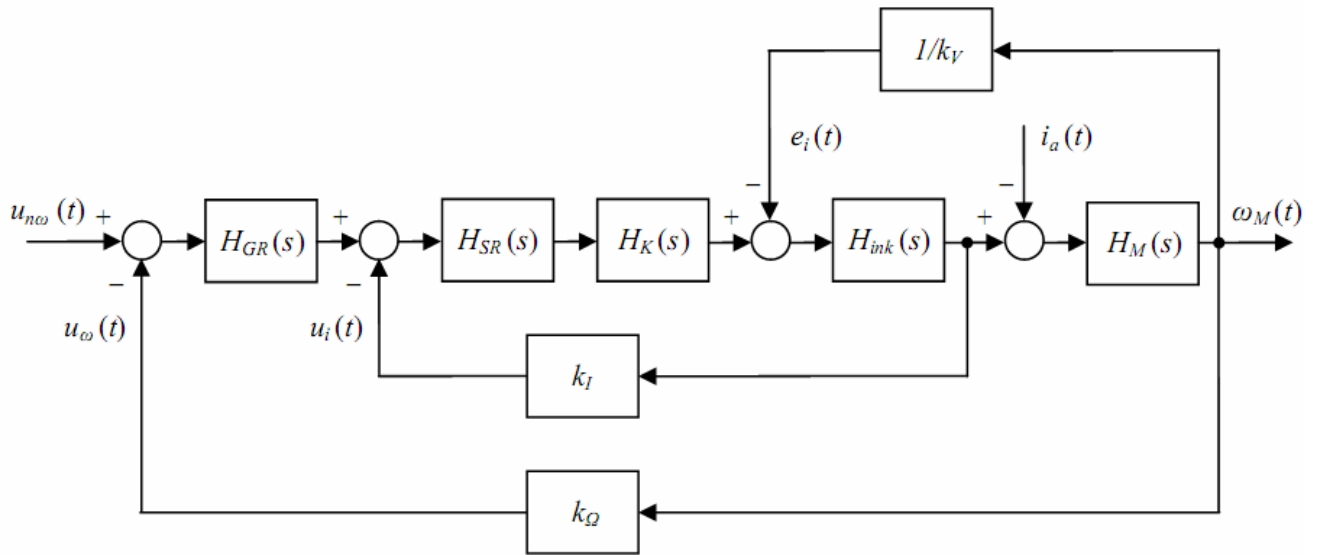
čia  $R_{i\Sigma} = R_i + R_k$  – bendra inkaro grandinės aktyvioji varža;  
 $T_{i\Sigma} = L_{i\Sigma} / R_{i\Sigma}$  – inkaro grandinės elektromagnetinė laiko pastovioji;  
 $L_{i\Sigma} = L_i + L_k$  – bendra inkaro grandinės induktyvioji varža;  
 $R_i$  – inkaro grandinės aktyvioji varža;  
 $L_i$  – inkaro grandinės induktyvioji varža;  
 $k_I$  – srovės grystamojo ryšio stiprinimo koeficientas.

Srovės reguliavimo kontūras yra pavaldus greičio reguliavimo kontūrai, kurį sudaro greičio regulatorius  $H_{GR}$ , srovės reguliavimo kontūras, variklio mechaninė dalis, apibūdinama perdavimo funkcija [1]:

$$H_M(s) = \frac{R_{i\Sigma} \cdot k_V}{T_{M\Sigma} \cdot s}; \quad (1.11)$$

čia  $k_V = (C \cdot \Phi)^{-1}$  – variklio stiprinimo koeficientas,  $C$  – variklio konstrukcijos koeficientas,  $\Phi$  – magnetinis srautas variklio oro tarpe;  
 $T_{m\Sigma} = J_\Sigma \cdot R_{i\Sigma} / (C \cdot \Phi)^2$  – variklio elektromechaninė laiko pastovioji,  $J_\Sigma$  – variklio inercijos momentas;  
 $k_\Omega$  – greičio grįžtamojo ryšio koeficientas .

Variklio priešinė elektrovaros jėga  $e_i$  yra srovės reguliavimo kontūro trikdys, variklio apkrovos srovė  $i_a$  – greičio reguliavimo kontūro trikdys 1.5 pav.. Sistemos įėjimo kintamojo – įtampos  $u_{no}$  dydis lemia sistemos išėjimo kintamojo – greičio  $\omega_M$  reikšmę [1].



1.5 pav. Nuolatinės srovės elektros pavaros hierarchinio valdymo sistemos struktūrinė schema

Valdymo kontūrų dinamikos optimizavimas (derinimas) hierarchinio valdymo sistemose pradedamas nuo sparčiau veikiančių vidinių reguliavimo kontūrų, todėl nuolatinės srovės elektros pavaros hierarchinio valdymo sistemoje pirmiausiai yra optimizuojamas srovės reguliavimo kontūras [1, 2].

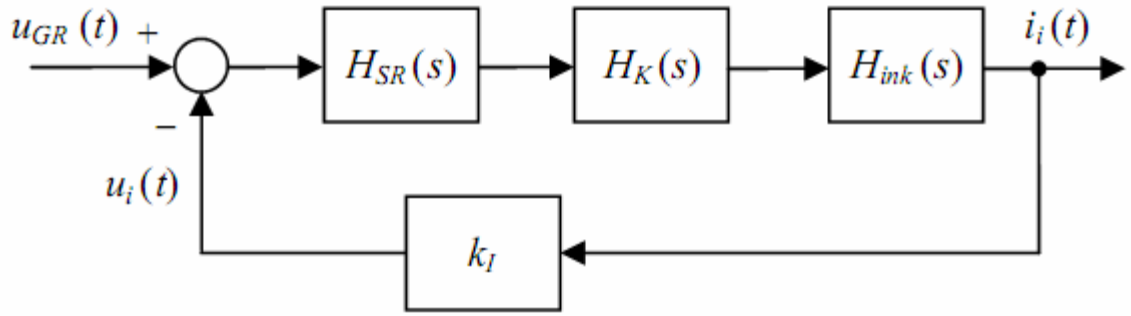
### 1.3 Srovės reguliavimo kontūro optimizavimas taikant kiekybinio optimumo kriterijų

Siekdami sparčiausio pereinamojo proceso, srovės reguliavimo kontūro optimizavimui taikysime kiekybinio optimumo kriterijų. Hierarchinio valdymo sistemose optimizuojant reguliavimo kontūrus pagal kiekybinio optimumo kriterijų, (1.4) išraiška įgauna pavidalą [1, 2]:

$$H_{KOa}(s) = \frac{1}{2^k \cdot T_\mu \cdot s \cdot (2^k - 1 \cdot T_\mu \cdot s + 1)}; \quad (1.12)$$

čia  $k$  – reguliavimo kontūro eilės numeris, Srovės reguliavimo kontūro eilės numeris nagrinėjamoje sistemoje  $k = 1$ .





1.6 pav. Srovės reguliavimo kontūro struktūrinė schema

Darome prielaidą, kad srovės reguliavimo kontūre priešinė elektrovaros jėga  $e_i$  1.5 pav. pereinamojo proceso metu nekinta. Tuomet galima supaprastinti srovės reguliavimo kontūro struktūrinę schemą, kaip yra parodyta 1.6 pav. Siekiant srovės reguliavimo kontūrą optimizuoti pagal kiekybinio optimumo kriterijų, srovės regulatoriaus perdavimo funkcija apskaičiuojama pagal (1.5) ir (1.12) išraiškas [1]:

$$\begin{aligned}
 H_{SR}(s) &= \frac{H_{KOa}(s)}{H_{aNek}(s)} = \frac{H_{KOaI}(s)}{H_K(s) \cdot H_{ink}(s) \cdot k_I} = \frac{1}{\frac{2 \cdot T_K \cdot s \cdot (T_K \cdot s + 1)}{k_K \cdot \frac{R_{i\Sigma}^{-1}}{T_K \cdot s + 1} \cdot k_I}} = \\
 &= \frac{T_{i\Sigma} \cdot s + 1}{2 \cdot k_K \cdot k_I \cdot R_{i\Sigma}^{-1} \cdot T_K \cdot s} = \frac{T_{i\Sigma} \cdot s}{2 \cdot k_K \cdot k_I \cdot R_{i\Sigma}^{-1} \cdot T_K \cdot s} + \frac{1}{2 \cdot k_K \cdot k_I \cdot R_{i\Sigma}^{-1} \cdot T_K \cdot s} = k_{Psr} + \frac{k_{Isr}}{s}. \quad (1.13)
 \end{aligned}$$

Kaip matyti iš (1.13) išraiškos, proporcinio-integralinio (PI) valdymo dėsnio srovės regulatorius užtikrina srovės reguliavimo kontūro suderinimą pagal kiekybinio optimumo kriterijų ir garantuoja srovės reguliavimo kontūro astatiškumą įėjimo poveikio  $u_{GR}$  bei galimo trikdžio, jeigu jis yra įvertinamas,  $e_i$  atžvilgiu [1].

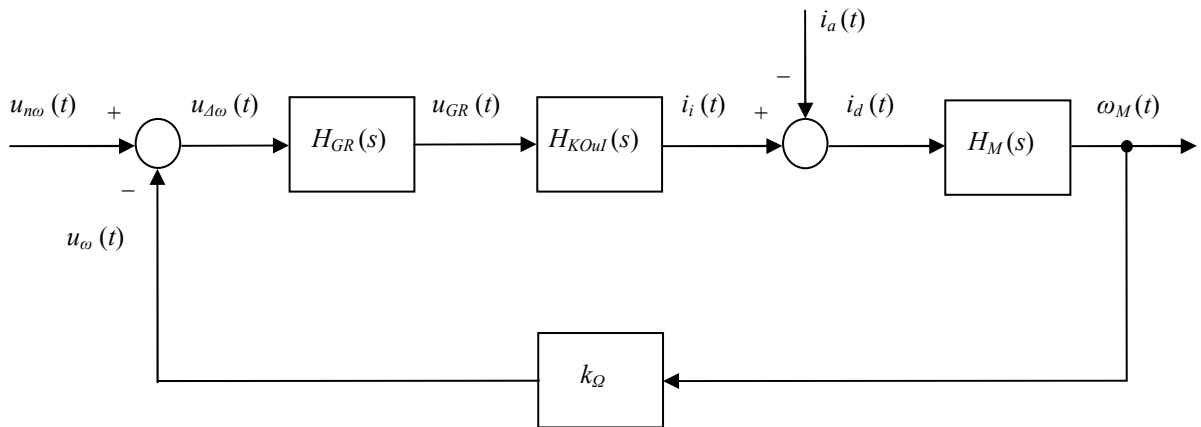
Tuomet atstojamoji uždaro srovės reguliavimo kontūro perdavimo funkcija apskaičiuojama pagal (1.2) ir (1.12) išraiškas [1]:

$$H_{KOul}(s) = \frac{H_{KOal}(s) \cdot k_I^{-1}}{H_{KOal}(s) + 1} = \frac{\frac{1}{2 \cdot T_K \cdot s \cdot (T_K \cdot s + 1)} \cdot k_I^{-1}}{\frac{1}{2 \cdot T_K \cdot s \cdot (T_K \cdot s + 1)} + 1} = \frac{k_I^{-1}}{2 \cdot T_K \cdot s \cdot (T_K \cdot s + 1) + 1} \quad (1.14)$$

Priimama, kad srovės reguliavimo kontūro įėjimo signalas – greičio regulatoriaus išėjimo kintamasis –  $u_{GR}$  įtampos signalas neįgyja tokios reikšmės, kuri sukeltų neigiamų padarinių fiziniams elektromechaninės pavaros įtaisams, todėl inkaro srovės ribojimo priemonės yra nereikalingos. Optimizavus elektromechaninės pavaros vidinį (pirmąjį) – srovės reguliavimo kontūrą pagal kiekybinio optimumo kriterijų, toliau yra atliekamas elektromechaninės pavaros išorinio (antrojo) – greičio reguliavimo kontūro optimizavimas taikant taip pat kiekybinio optimumo kriterijų [1, 2].

Nuolatinės srovės elektros pavaros greičio reguliavimo kontūrą 1.7 pav. sudaro variklio mechaninė dalis  $H_M$ , greičio grįžtamojo ryšio koeficientas  $k_\Omega$ , greičio regulatorius  $H_{GR}$ , ir pavaldus inkaro srovės reguliavimo kontūras, apibūdinamas priimtina supaprastinta (1.14) išraiškos forma, kurioje vardiklio narys  $2 \cdot T_K^2 \cdot s^2$  yra neįvertinamas [1]:

$$H_{KOul}(s) = \frac{k_I^{-1}}{2 \cdot T_K \cdot s \cdot (T_K \cdot s + 1) + 1} = \frac{k_I^{-1}}{2 \cdot T_K^2 \cdot s^2 + 2 \cdot T_K \cdot s + 1} \approx \frac{k_I^{-1}}{2 \cdot T_K \cdot s + 1} \quad (1.15)$$



1.7 pav. Nuolatinės srovės elektros pavaros greičio reguliavimo kontūro struktūrinė schema

Taikant kiekybinio optimumo kriterijų, greičio regulatoriaus perdavimo funkcija apskaičiuojama pagal (1.5), (1.12) ir (1.15) išraiškas [1]:

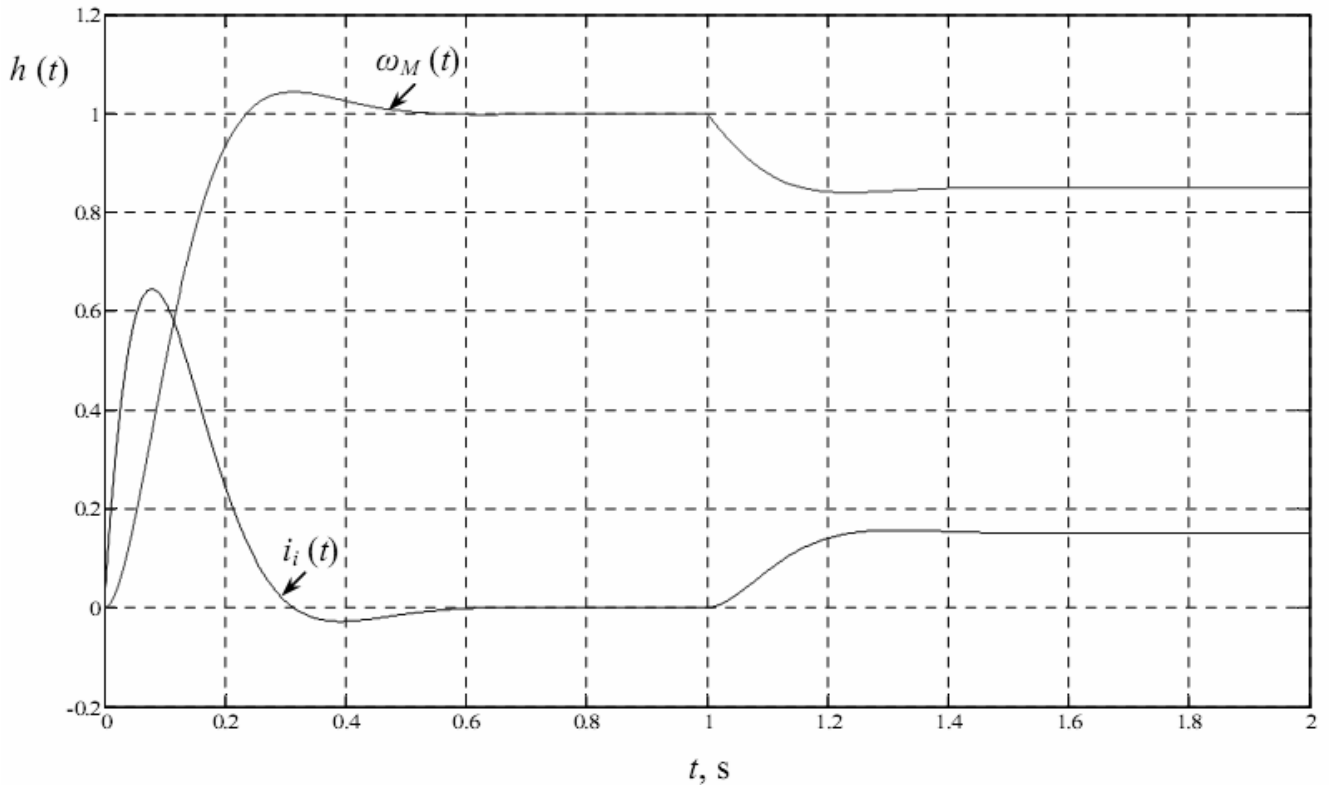
$$\begin{aligned}
H_{GR.KO}(s) &= \frac{H_{KOa}(s)}{H_{aNek}(s)} = \frac{H_{KOa\Omega}(s)}{H_{KOuI}(s) \cdot H_M(s) \cdot k_\Omega} = \frac{1}{\frac{4 \cdot T_K \cdot s \cdot (2 \cdot T_K \cdot s + 1)}{k_I^{-1} \cdot \frac{R_{i\Sigma} \cdot k_V}{T_{m\Sigma} \cdot s} \cdot k_\Omega}} = \\
&= \frac{k_I}{k_V \cdot k_\Omega \cdot R_{i\Sigma}} \cdot \frac{T_{m\Sigma}}{4 \cdot T_K} = k_{P\Omega}.
\end{aligned} \tag{1.16}$$

Kaip matyti iš (1.16) išraiškos, kad optimizuoti greičio reguliavimo kontūrą pagal kiekybinio optimumo kriterijų, reikalingas proporcinio ( $P$ ) valdymo dėsnio greičio regulatorius. Tuomet atstojamoji uždaro greičio reguliavimo kontūro perdavimo funkcija apskaičiuojama pagal (1.2) ir (1.12) išraiškas [1]:

$$H_{KOu\Omega}(s) = \frac{H_{KOa\Omega}(s) \cdot k_\Omega^{-1}}{H_{KOa\Omega}(s) + 1} = \frac{\frac{1}{4 \cdot T_K \cdot s \cdot (2 \cdot T_K \cdot s + 1)} \cdot k_\Omega^{-1}}{\frac{1}{4 \cdot T_K \cdot s \cdot (2 \cdot T_K \cdot s + 1)} + 1} = \frac{k_\Omega^{-1}}{4 \cdot T_K \cdot s \cdot (2 \cdot T_K \cdot s + 1) + 1} \tag{1.17}$$

Palyginus (1.17) ir (1.14) išraiškas, matyti, kad laisvasis judesys greičio reguliavimo kontūre yra du kartus lėtesnis nei srovės reguliavimo kontūre. Kampinio greičio  $\omega_M$  ir inkaro srovės  $i_i$  pereinamojo proceso kreivės – reakcijos į šuolinius sistemos valdymo signalo  $u_{n\omega}$  ir trikdžio – apkrovos srovės  $i_a$ , pradedančios veikti kai  $t = 1s$ , pokyčius yra pateiktos 1.8 pav. Kaip matyti iš 1.8 pav., nagrinėjamos elektromechaninės sistemos išėjimo kintamojo – kampinio greičio  $\omega_M$  pereinamojo proceso dinamika, maksimalaus dinaminio nuokrypio ir reguliavimo trukmės atžvilgiu, yra optimali. Tačiau šioje elektromechaninėje sistemoje susidaro situacija, kuri buvo aptarta 1.1 skyriuje, tai yra, kad veikiant sistemą trikdžiui, nagrinėjamu atveju – apkrovos srovei  $i_a$ , yra gaunamas statinis reguliuojamojo kintamojo nuokrypis, nagrinėjamu atveju – kampinio greičio  $\omega_M$  statinis nuokrypis 1.8 pav., kuris yra apskaičiuojamas pagal išraišką [1]:

$$\Delta\omega(t) = i_a(t) \cdot R_{i\Sigma} \cdot k_V \cdot \frac{4 \cdot T_K}{T_{m\Sigma}}. \tag{1.18}$$



1.8 pav. Greičio reguliavimo kontūro, optimizuoto pagal kiekybinio optimumo kriterijų, kintamųjų reakcija į šuolinius  $u_{no}(t)$  ir  $i_a(t)$  signalų pokyčius

Taigi nuolatinės srovės elektros pavaros greičio reguliavimo kontūras, optimizuotas pagal kiekybinio optimumo kriterijų, yra astatinis įėjimo kintamojo – greičio nuostato  $u_{no}(t)$  šuolinio pokyčio atžvilgiu, tačiau statinis trikdžio – apkrovos srovės  $i_a(t)$  šuolinio pokyčio atžvilgiu. 1.4 poskyryje yra pateiktas sistemos dinamikos optimizavimo metodas taikant simetrinio optimumo kriterijų, kuris įgalina išvengti nepageidaujamo statinio reguliuojamojo kintamojo nuokrypio, nagrinėjamu atveju – greičio statinio nuokrypio [1].

#### 1.4 Greičio reguliavimo kontūro optimizavimas taikant simetrinio optimumo kriterijų

Hierarchinio valdymo sistemose simetrinio optimumo kriterijaus (1.6) išraiška įgauna pavidalą [2]:

$$H_{SOa}(s) = \frac{1 + 2^{k+1} \cdot T_\mu \cdot s}{2^{k+1} \cdot T_\mu \cdot s} \cdot \frac{1}{2^k \cdot T_\mu \cdot s \cdot (2^{k-1} \cdot T_\mu \cdot s + 1)}; \quad (1.19)$$

Greičio reguliavimo kontūro eilės numeris nagrinėjamojoje elektromechaninėje sistemoje  $k = 2$ . Optimizuojant nuolatinės srovės elektros pavaros greičio reguliavimo kontūrą pagal simetrinio optimumo kriterijų, sistemos struktūrinė schema išlieka nepakitusi 1.7 pav., išskyrus greičio regulatoriaus perdavimo funkciją, kuri tuomet apskaičiuojama pagal (1.5), (1.19) ir (1.15) išraiškas [1]:

$$\begin{aligned}
 H_{GR.SO}(s) &= \frac{H_{SOa}(s)}{H_{aNek}(s)} = \frac{H_{SOa\Omega}(s)}{H_{KOul}(s) \cdot H_M(s) \cdot k_\Omega} = \frac{1 + 8 \cdot T_K \cdot s}{8 \cdot T_K \cdot s} \cdot \frac{1}{4 \cdot T_K \cdot s \cdot (2 \cdot T_K \cdot s + 1)} = \\
 &= \frac{1 + 8 \cdot T_K \cdot s}{8 \cdot T_K \cdot s} \cdot \frac{k_I}{k_V \cdot k_\Omega \cdot R_{i\Sigma}} \cdot \frac{T_{m\Sigma}}{4 \cdot T_K} = k_{P\Omega} \cdot \frac{1 + 8 \cdot T_K \cdot s}{8 \cdot T_K \cdot s} = k_{P\Omega} + \frac{k_{P\Omega}}{8 \cdot T_K \cdot s} = k_{P\Omega} + \frac{k_{I\Omega}}{s}. \quad (1.20)
 \end{aligned}$$

Kaip matyti iš (1.20) išraiškos, kad optimizuoti greičio reguliavimo kontūrą pagal simetrinio optimumo kriterijų, reikalingas proporcinio-integralinio ( $PI$ ) valdymo dėsnio greičio regulatorius. Be to proporcinio valdymo dėsnio stiprinimo koeficientas  $k_{P\Omega}$  sutampa su proporcinio valdymo dėsnio greičio regulatoriaus, apskaičiuoto pagal kiekybinį optimumą, stiprinimo koeficientu ((1.16) išraiška). Tuomet atstojamoji uždaro greičio reguliavimo kontūro perdavimo funkcija įgyja pavidalą [1]:

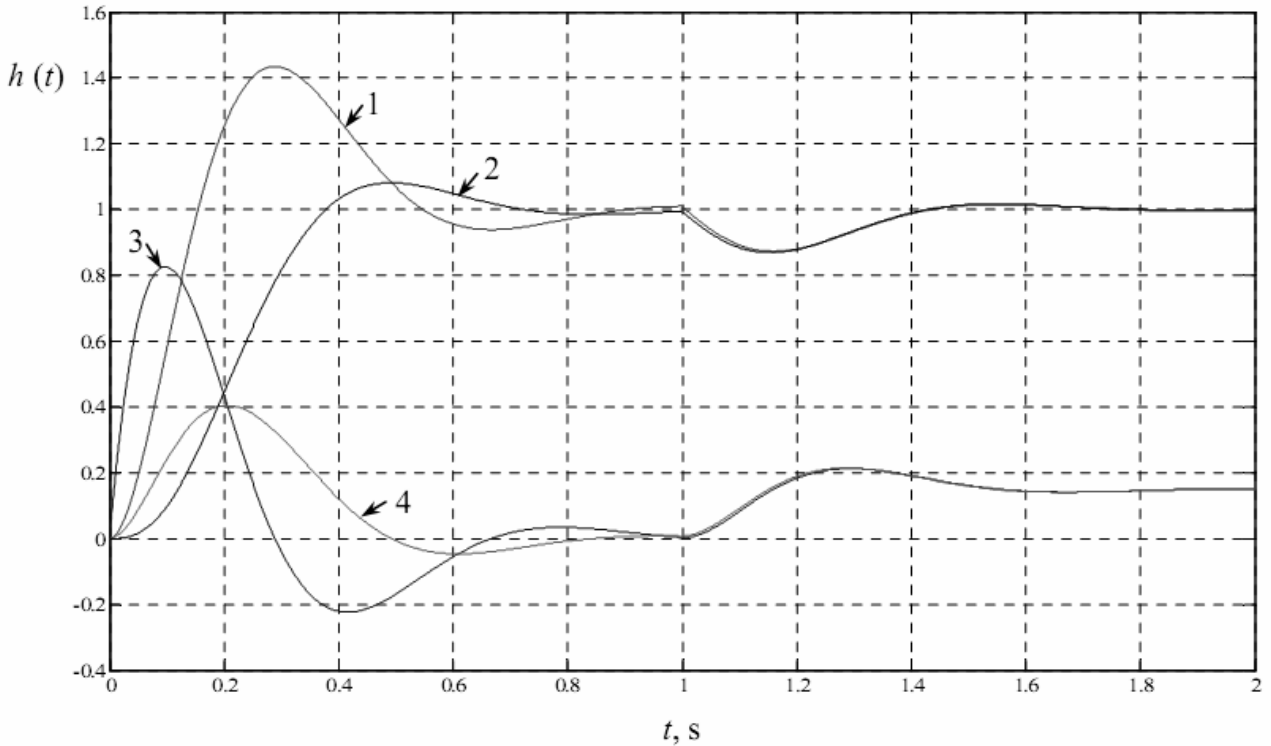
$$\begin{aligned}
 H_{SOu\Omega}(s) &= \frac{H_{SOa\Omega}(s) \cdot k_\Omega^{-1}}{H_{SOa\Omega}(s) + 1} = \frac{1 + 8 \cdot T_K \cdot s}{8 \cdot T_K \cdot s} \cdot \frac{1}{4 \cdot T_K \cdot s \cdot (2 \cdot T_K \cdot s + 1)} \cdot k_\Omega^{-1} = \\
 &= \frac{(1 + 8 \cdot T_K \cdot s) \cdot k_\Omega^{-1}}{8 \cdot T_K \cdot s \cdot (4 \cdot T_K \cdot s \cdot (2 \cdot T_K \cdot s + 1)) + 1}. \quad (1.21)
 \end{aligned}$$

Nuolatinės srovės elektros pavaros, optimizuotos pagal simetrinio optimumo kriterijų, išėjimo kintamojo – kampinio greičio  $\omega_M$  (1 kreivė) ir inkaro srovės  $i_i$  (3 kreivė) pereinamojo proceso kreivės – reakcijos į šuolinius sistemos valdymo signalo  $u_{n\omega}$  ir trikdžio – apkrovos srovės  $i_a$ , pradedančios veikti kai  $t = 1s$ , pokyčius yra pateiktos 1.9 pav. Kaip matyti iš 1.9 pav., optimizavus elektromechaninę sistemą pagal simetrinio optimumo kriterijų, sistemos išėjimo kintamojo – kampinio greičio  $\omega_M$  statinis nuokrypis yra pašalinamas, tačiau suprastėja pereinamojo proceso kokybė – padidėja maksimalus dinaminis nuokrypis ir pailgėja reguliavimo trukmė, lyginant su sistema optimizuotą pagal kiekybinio

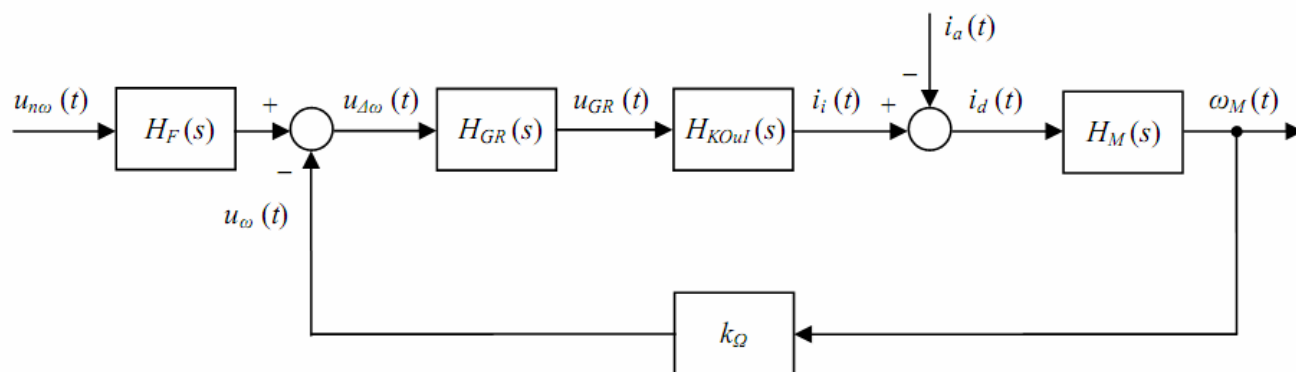
optimumo kriterijų 1.8 pav., kad sumažinti maksimalų dinaminį nuokrypį, kurį sąlygoja (1.21) išraiškos skaitiklio  $(1+8 \cdot T_K \cdot s)$  narys, į sistemą yra įjungiamas filtras, kaip parodyta 10 pav., turintis perdavimo funkciją [1]:

$$H_F(s) = \frac{1}{2^{k+1} \cdot T_\mu \cdot s} = \frac{1}{8 \cdot T_K \cdot s + 1}; \quad (1.22)$$

Tuomet tokios sistemos išėjimo kintamojo – kampinio greičio  $\omega_M$  (2 kreivė) ir inkaro srovės  $i_i$  (4 kreivė) pereinamojo proceso charakteristikos – reakcijos į šuolinius sistemos valdymo signalo  $u_{no}$  ir trikdžio – apkrovos srovės  $i_a$  pokyčius, įgauna pavidalą pateiktą 1.9 pav. Kaip matyti iš 1.9 pav., tokioje elektromechaninėje sistemoje yra išlaikomas statinis tikslumas – statinis kampinio greičio nuokrypis lygus nuliui 1.9 pav. 2 kreivė, maksimalus dinaminis nuokrypis sumažėja nuo 43,4% (simetrinio optimumo atveju be filtro) iki 8,15%, reguliavimo trukmė sutrumpėja nuo  $14,7 \cdot T_\mu$  iki  $11,93 \cdot T_\mu$ . Tačiau sistemos dinamiką charakterizuojančių rodiklių įgyjamos reikšmės yra didesnės, lyginant su kiekybiškai optimalaus kontūro atitinkamų rodiklių reikšmėmis (1.1 skyrius). Taigi ir sistemos, optimizuotos pagal simetrinio optimumo kriterijų su nuostato signalo filtru, dinamikos kokybė yra prastesnė, nei sistemos optimizuotos pagal kiekybinio optimumo kriterijų.



1.9 pav. Greičio reguliavimo kontūro, optimizuoto pagal simetrinio optimumo kriterijų, kintamųjų reakcija į šuolinius  $u_{no}(t)$  ir  $i_a(t)$  signalų pokyčius



1.10 pav. Nuolatinės srovės elektros pavaros greičio reguliavimo kontūro su įjungtu filtru  $H_F$  struktūrinė schema

Hierarchinio valdymo elektromechaninės sistemos reguliavimo kontūrų optimizavimo metodai turi savų privalumų bei trūkumų. Kiekybinio optimumo taikymo nuolatinės srovės elektros pavaroje privalumas – optimali sistemos pereinamojo proceso dinamika, trūkumas – veikiant trikdžiui (apkrovos srovei) yra gaunamas greičio statinis nuokrypis. Simetrinio optimumo kriterijaus taikymo nuolatinės srovės elektros pavaroje privalumas – statinio greičio nuokrypio nulinė vertė, trūkumas – prastos kokybės sistemos pereinamojo proceso dinamika (didelis maksimalus dinaminis nuokrypis bei ilga reguliavimo trukmė). Plačiai naudojamas maksimalaus dinaminio nuokrypio elektromechaninėje sistemoje, kurios greičio valdymo kontūras yra optimizuotas pagal simetrinio optimumo kriterijų, sumažinimo būdas yra nuostato signalo filtro įjungimas. Tuomet yra išlaikomas sistemos statinis tikslumas – statinis greičio nuokrypis lygus nuliui, tačiau reguliavimo trukmė sutrumpėja nežymiai ir todėl pereinamojo proceso dinamikos kokybė gaunama prastesnė nei sistemos optimizuotos pagal kiekybinio optimumo kriterijų. Todėl toks metodas nors ir įgalina išlaikyti simetrinio optimumo sąlygojamą sistemos statinį tikslumą, tačiau neleidžia pasiekti kiekybinio optimumo sąlygojamos sistemos pereinamojo proceso dinamikos kokybės.

Taigi iškyla dilema – kurį reguliavimo kontūrų optimizavimo metodą taikyti hierarchinio valdymo elektromechaninėje sistemoje. Pasirinkimą nulemia automatinio valdymo sistemai keliami reikalavimai, kuriais dažnai (ypač pozicionavimo pavarose) yra siekiama ne tik optimalaus sistemos greitaveikiškumo, bet ir statinio tikslumo. Atskirai taikomi kiekybinis ir simetrinis optimumai negali užtikrinti tuo pat metu sistemos optimalios greitaveikos ir statinio tikslumo. Taigi iškyla elektromechaninės sistemos dinamikos kokybės problema, kurios sprendimo idėją pasiūlė KTU prof. V.A. Geleževičius [6], o įgyvendino ŠU lekt. N. Šulčius [3]: siekiant suderinti kiekybinio ir simetrinio optimumų teikiamus privalumus bei pašalinti jų trūkumus, naudojamas kintamos struktūros greičio

regulatorius, kurio valdymo dėsnis pereinamojo proceso metu yra automatiškai keičiamas iš proporcinio - integruojančio (PI), suderinto pagal simetrinio optimumo kriterijų, į proporcinį (P), suderintą pagal kiekybinio optimumo kriterijų, ir atvirkščiai.

### **1.5 Elektromechaninė vykdymo sistema su PI-P-PI kintamos struktūros regulatoriumi**

Išnagrinėtas būdas elektromechaninių vykdymo sistemų dinamikos kokybei pagerinti, naudojant kintamos struktūros regulatorių, kurio valdymo dėsnis pereinamojo proceso metu automatiškai keičiamas iš proporcinio - integruojančio (PI) į proporcinį (P) ir atvirkščiai [7, 8, 9, 10, 11, 12].

Ištirti du regulatoriaus struktūros keitimo algoritmai ir nustatytos optimalios regulatoriaus struktūros keitimo parametrų vertės. Nustatyta, kad, veikiant statinei apkrovai, abiem regulatoriaus struktūros keitimo atvejais geriausia pereinamojo proceso kokybė pasiekama, kai PI – P struktūra perjungama esant maksimaliai srovei  $i_{imax}$ . Kai perjungimo parametrai formuojami nepriklausomai vienas nuo kito, regulatoriaus P dėsnio palaikymo trukmė, didėjant statinei apkrovai, trumpėja. [8, 9]

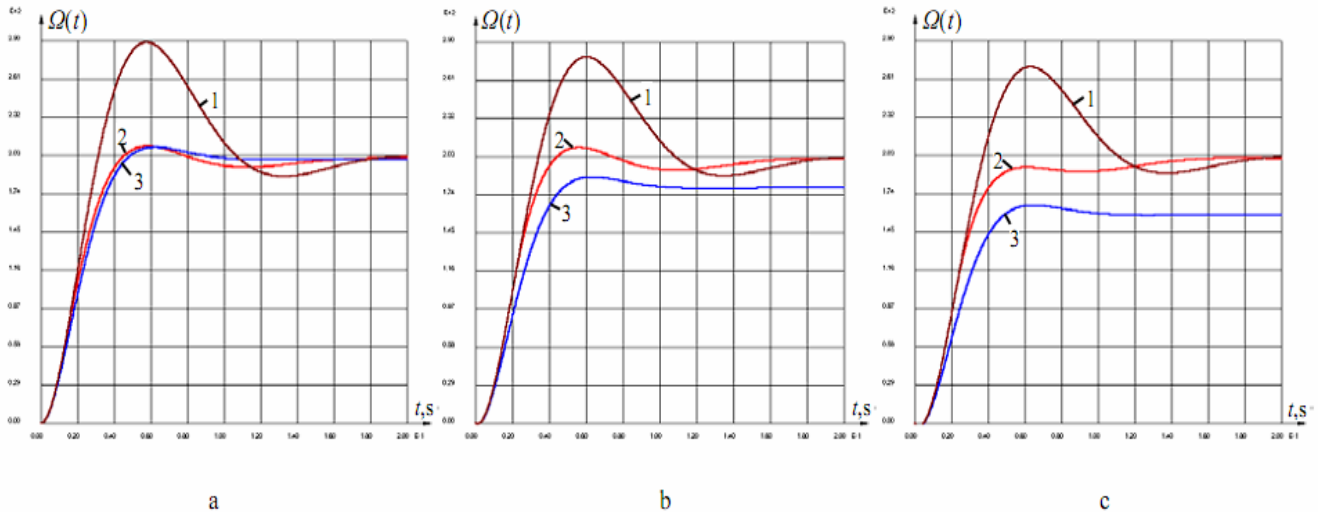
Nagrinėjama elektromechaninė vykdymo sistema su kintamos struktūros greičio regulatoriumi, kuris valdomas Fuzzy logika pagrįstu valdymo dėsnio (PI-P-PI) perjungimo bloku. Fuzzy logikos įtaisas naudojamas proporcinio (P) valdymo dėsnio palaikymo trukmei nustatyti priklausomai nuo elektros pavaros statinės apkrovos dydžio. Taikomas Fuzzy logika pagrįstas valdymo metodas užtikrina optimalią sistemos dinamikos kokybę (remiantis ITAE kokybės kriterijumi) nepriklausomai nuo pavaros statinės apkrovos dydžio. Sukonstruoti bei ištirti dviejų tipų – Mamdani tipo ir Sugeno tipo Fuzzy logikos įtaisai. Pateikti elektromechaninės vykdymo sistemos modeliavimo rezultatai patvirtina pasiūlyto valdymo metodo tinkamumą [10, 12].

Nagrinėjama greičio valdymo sistema su programuojamuoju kintamos struktūros greičio regulatoriumi. Programuojamasis įtaisas naudojamas proporcinio (P) valdymo dėsnio palaikymo trukmei nustatyti priklausomai nuo sistemos statinės apkrovos dydžio. Statinės apkrovos srovei nustatyti sudarytas Luenbergerio observatorius. Gaunamas statinės apkrovos srovės signalas yra tinkamas naudoti P valdymo dėsnio palaikymo trukmės nustatymo įtaise. Sudaryta programuojamojo įtaiso įėjimo ir išėjimo priklausomybė užtikrina optimalią sistemos dinamikos kokybę nepriklausomai nuo statinės apkrovos dydžio. Pateikti greičio valdymo sistemos su programuojamuoju kintamos struktūros regulatoriumi modeliavimo rezultatai sutampa su rezultatais, gautais taikant Fuzzy logika pagrįstą kintamos struktūros regulatorių [11, 12].

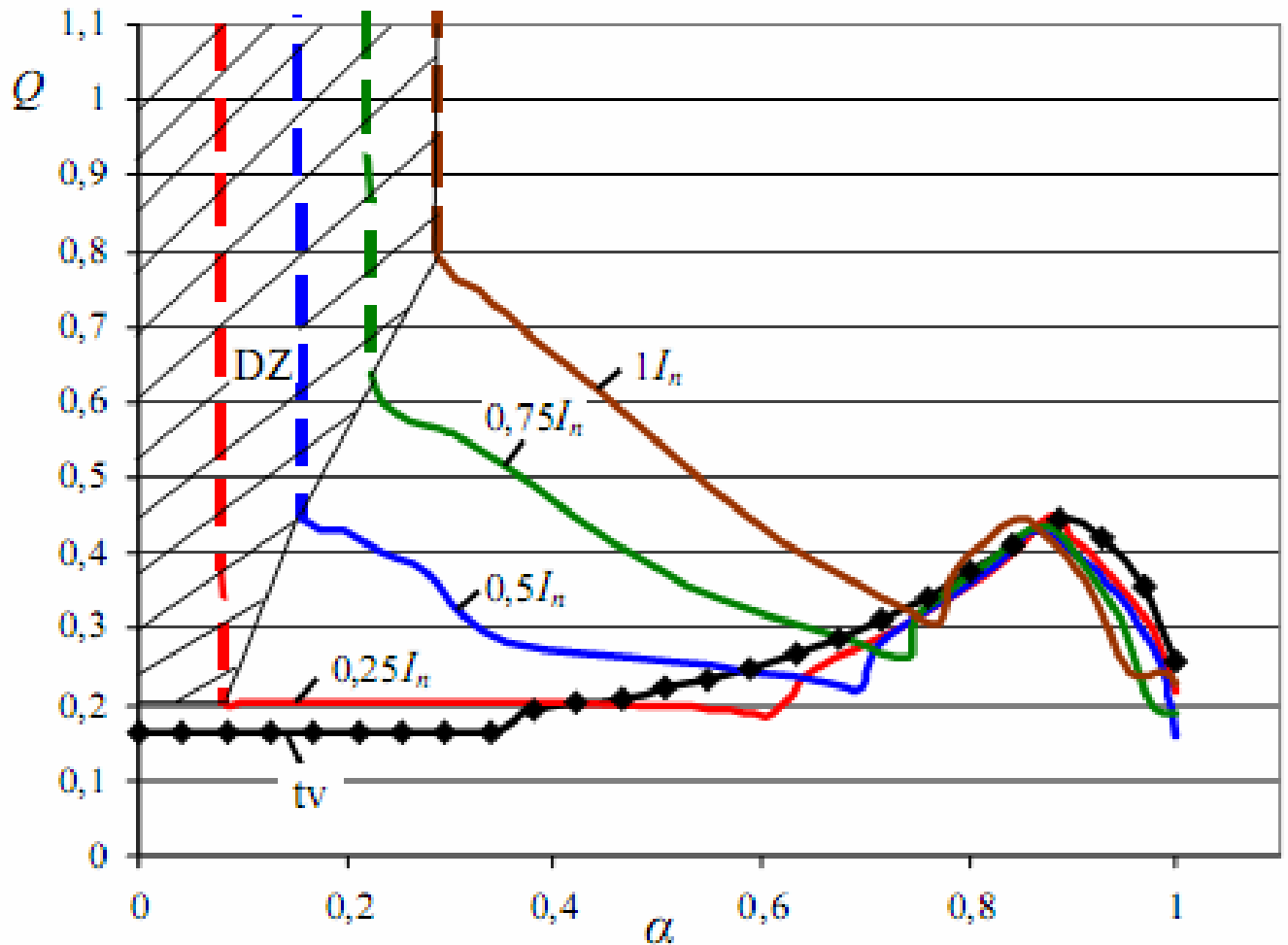


Geriausios greičio pereinamojo proceso kreivės, gautos naudojant kintamos ir tradicinių struktūrų reguliatorius, yra pateiktos 1.11 pav. [8, 9]. Tuščiosios veikos metu pavaros su kintamos struktūros reguliatoriumi pereinamojo proceso (1.11 pav., a, – 2 kreivė) dinaminis nuokrypis neviršija 5% (daug mažesnis 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 (1.11 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). [8, 9]

Pateikiama keletas greičio pereinamojo proceso kreivių 1.11 pav. [8, 9] a – tuščiosios veikos metu, b – kai statinė apkrova  $I_a=0,5I_n$ , c – kai statinė apkrova  $I_a=1I_n$  ir kokybės kitimo tuščiosios veikos ir statinės apkrovos ( $I_a=0,25\div 1I_n$ ) metu 1.12 pav. [8], kai perjungiamo pagal vieną parametą.



1.11 pav. Greičio pereinamojo proceso kreivės: a – tuščiosios veikos metu, b – kai statinė apkrova  $I_a=0,5I_n$ , c – kai statinė apkrova  $I_a=1I_n$  [8, 9]



1.12 pav.. Kokybės kitimas tuščiosios veikos ( $tv$ ) ir statinės apkrovos ( $I_a=0,25\div 1I_n$ ) metu, kai perjungžiama pagal vieną parametą [8]

Taigi siekiant suderinti kiekybinio ir simetrinio optimumų teikiamus privalumus bei pašalinti jų trūkumus, naudojami kintamos struktūros reguliatoriai. Jau yra ištirtas PI-P-PI kintamos struktūros reguliatorius [3], kuriame du kartus keičiamas valdymo dėsnis. Tačiau suderinti kiekybinio ir simetrinio optimumų teikiamus privalumus bei pašalinti jų trūkumus būtų galima atliekant tik vieną reguliatoriaus valdymo dėsnio keitimą. Todėl šiame darbe ištirtas P-PI kintamos struktūros reguliatorius.

## 2. ELEKTROMECHANINĖS VYKDYMO SISTEMOS SU P-PI KINTAMOS STRUKTŪROS REGULIATORIUMI TYRIMAS

### 2.1 Modelio sudarymas MATLAB/Simulink programa

Siekiant gaunamų rezultatų universalumo ir pritaikomumo įvairiose sistemose, buvo sudarytas apibendrintas elektromechaninės vykdyimo sistemos modelis MATLAB/Simulink programa 2.1 pav.

Sistemą sudaro: valdymo signalo grandis (1); kintamos struktūros reguliatorius (2) su atskirtomis proporcinė (3) ir integruojančia (4) dalimis, reguliatoriaus valdymo dėsnio perjungiklis (5); pavaldu srovės valdymo kontūras (6); variklio mechaninė grandis (7); Apkrovos grandis(8); grįžtamojo ryšio grandis (9); leistino nuokrypio 5 % grandys (10, 11); oscilografas, pereinamiesiems procesams stebėti (12); matematinis modelis netiesioginio (13) ITAE integralinio kokybės rodiklio (14) ir tiesioginio kokybės rodiklio  $t_{reg}$ . (15) vertėms stebėti.

Elektromechaninės vykdyimo sistemos dinamikos kokybės tiesioginis rodiklis yra reguliavimo trukmė  $t_{reg}$ . [13, 14] (laikas, per kurį reguliuojamo parametro nuokrypis pasiekia 5 % ribą ir vėliau jos neviršija). Netiesioginis kokybės rodiklis yra ITAE (Integral of Time multiplied by Absolute Error) integralinis rodiklis [15], kartu įvertinantis tiesioginius kokybės rodiklius – reguliavimo trukmę  $t_{reg}$  ir perreguliavimą.

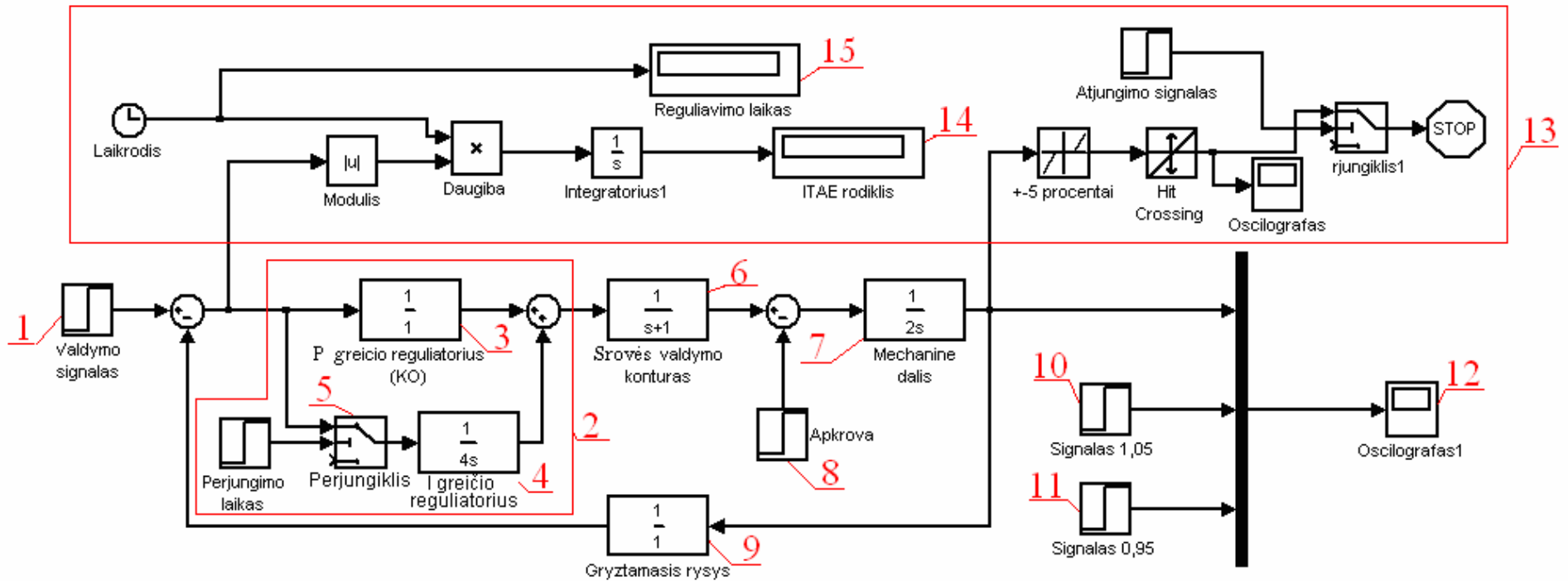
Tyrimas atliktas keičiant reguliatoriaus perjungimo laiką ir stebint ITAE integralinio kokybės rodiklio vertę:

$$J_{ITAE} = \int_0^{t_{reg}} t \cdot |\Delta x(t)| dt \quad (2.1)$$

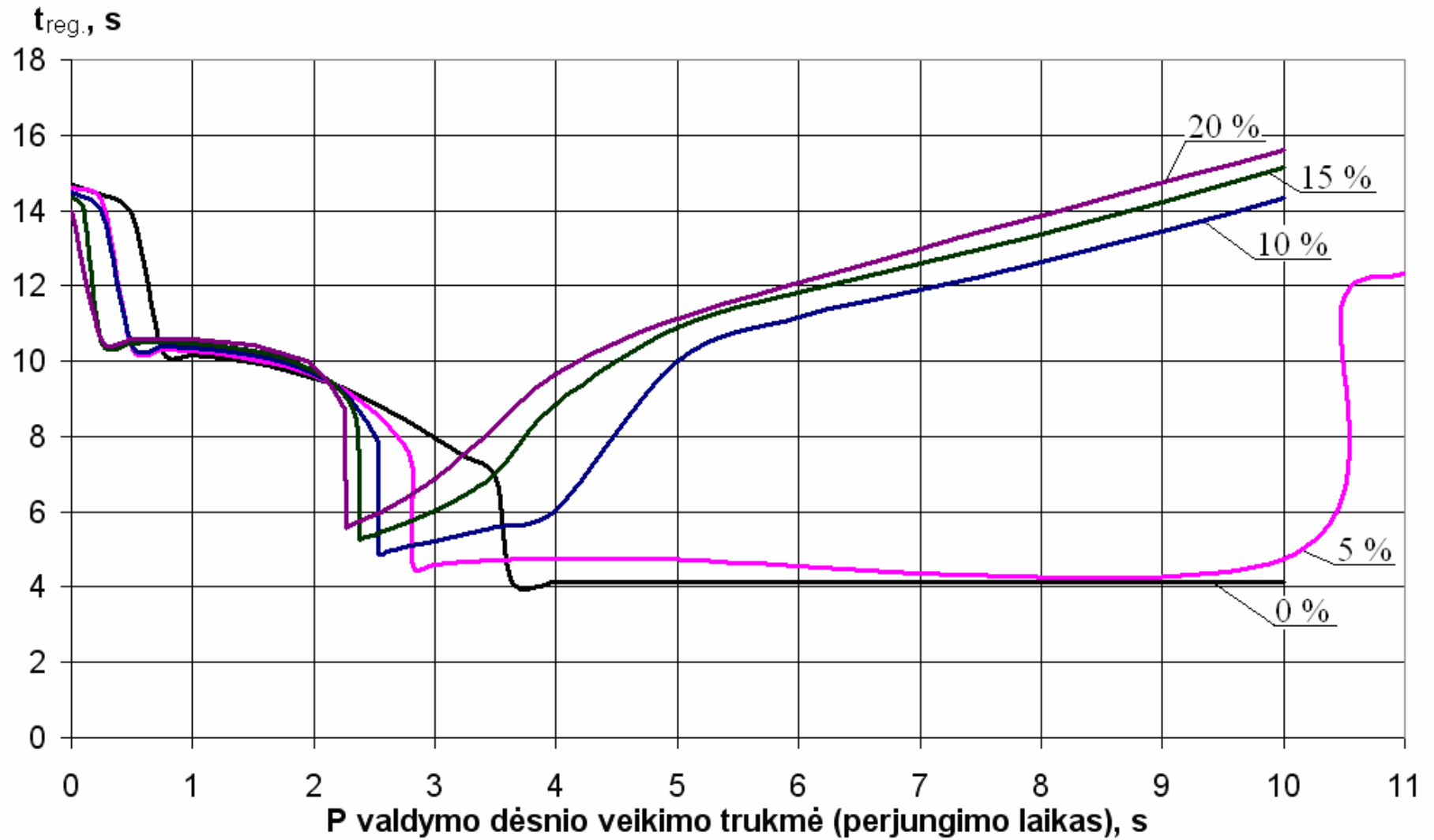
čia  $|\Delta x(t)|$  – reguliuojamo parametro nuokrypio modulis;

$t_{reg}$  – reguliavimo trukmė (laikas, per kurį reguliuojamo parametro nuokrypis pasiekia 5 % ribą ir vėliau jos neviršija), s;

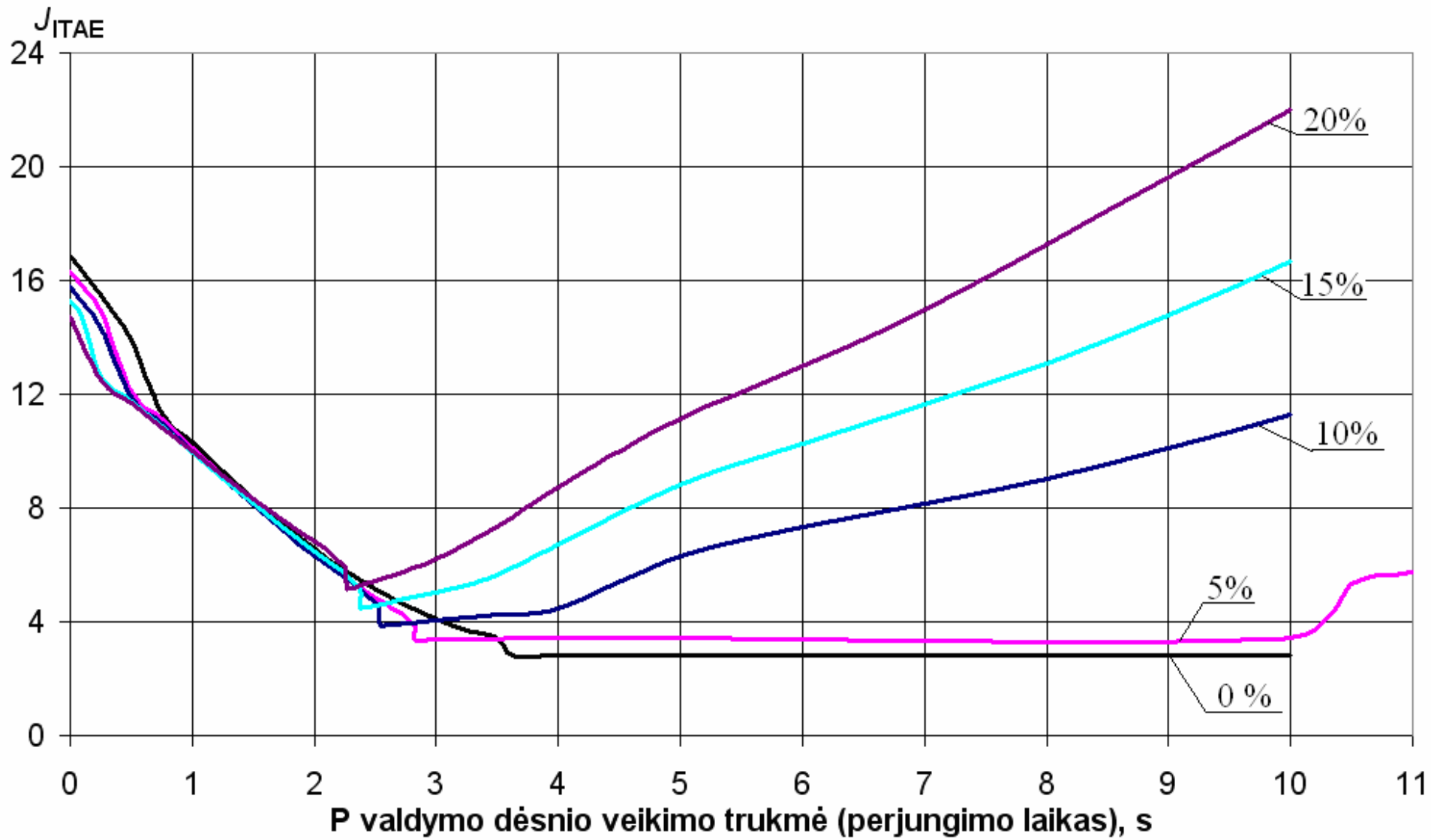
Kuo mažesnė rodiklio vertė, tuo pereinamasis procesas yra geresnės kokybės. Minimali reguliavimo trukmė arba minimali ITAE rodiklio vertė nurodo reguliatoriaus perjungimo laiką nustatantį geriausią elektromechaninės vykdyimo sistemos dinamikos kokybę.



2.1 pav. Apibendrintas elektromechaninės vykdyimo sistemos modelis MATLAB/Simulink programos aplinkoje (Sistemą sudaro: valdymo signalo grandis (1); kintamos struktūros reguliatorius (2) su atskirtomis proporcinė (3) ir integruojančia (4) dalimis, reguliatoriaus valdymo dėsnio perjungiklis (5); pavaldus srovės valdymo kontūras (6); variklio mechaninė grandis (7); Apkrovos grandis(8); grįžtamojo ryšio grandis (9); leistino nuokrypio 5 % grandys (10, 11); oscilografas, pereinamiesiems procesams stebėti (12); matematinis modelis netiesioginio (13) ITAE integralinio kokybės rodiklio (14) ir tiesioginio kokybės rodiklio  $t_{reg}$ . (15) vertėms stebėti)



2.2 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi reguliavimo laiko priklausomybė nuo reguliatoriaus struktūros perjungimo laiko



2.3 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi ITAE rodiklio priklausomybė nuo reguliatoriaus struktūros perjungimo laiko

2.2 pav. ir 2.3 pav. elektromechaninės vykdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros regulatoriumi priklausomybės gaunamos esant pastoviai apkrovai, bet keičiant P valdymo dėsnio veikimo trukmę. Priklausomybės pateiktos esant statinėms apkrovoms 0, 5, 10, 15, 20 %. Kaip matome iš paveikslų esant vienodai statinei apkrovai ITAE rodiklis ir reguliavimo laikas pasiekia minimumus esant tai pačiai P valdymo dėsnio veikimo trukmei, dėl to geriausiai struktūros perjungimo laikui nustatyti yra naudojama ITAE integralinio rodiklio minimali reikšmė.

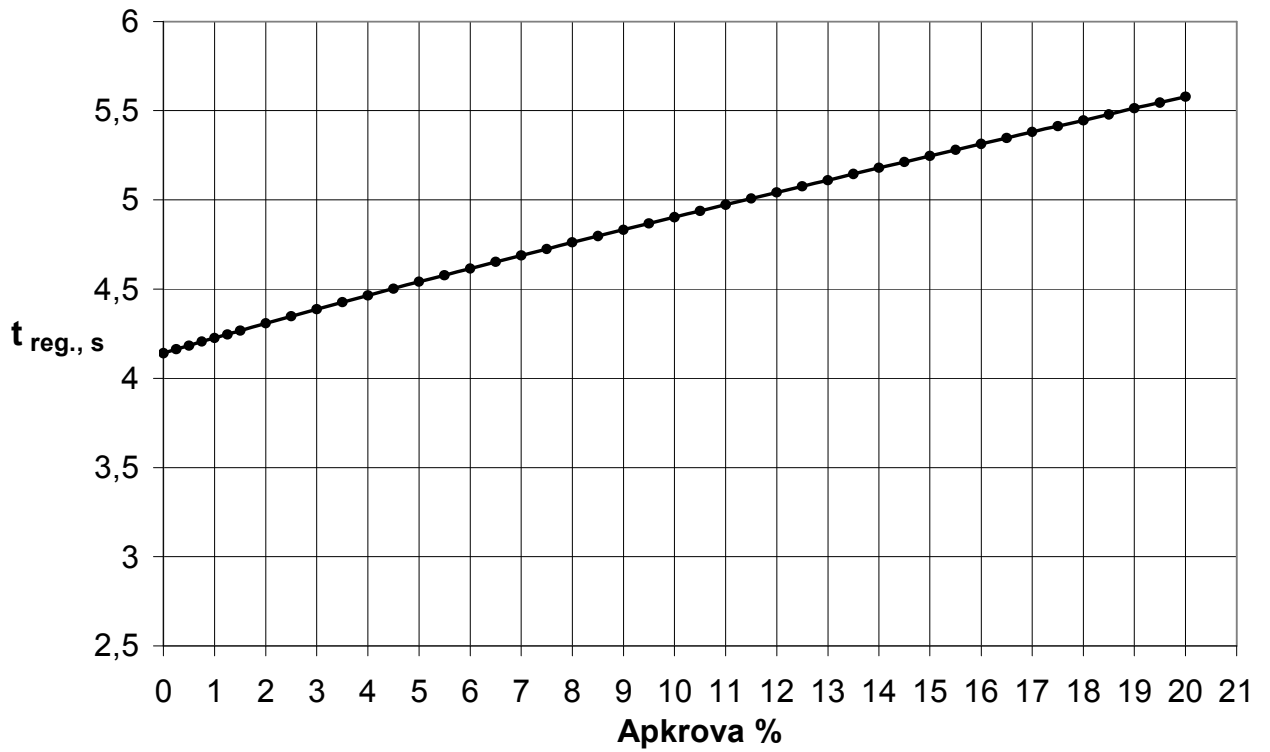
## 2.2 Geriausių dinamikos kokybę užtikrinančio regulatoriaus perjungimo parametro priklausomybė nuo statinės apkrovos nustatymas

Iš 2.2, 2.3 pav. atrenkamos elektromechaninės vykdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros regulatoriumi geriausių dinamikos kokybę užtikrinančio  $P$  valdymo dėsnio veikimo trukmės  $t_{perj.l.}$ , ITAE integralinio rodiklio, reguliavimo laiko  $t_{reg.}$  vertės prie įvairių statinių apkrovų ir pateikiamos 2.1 lentelėje.

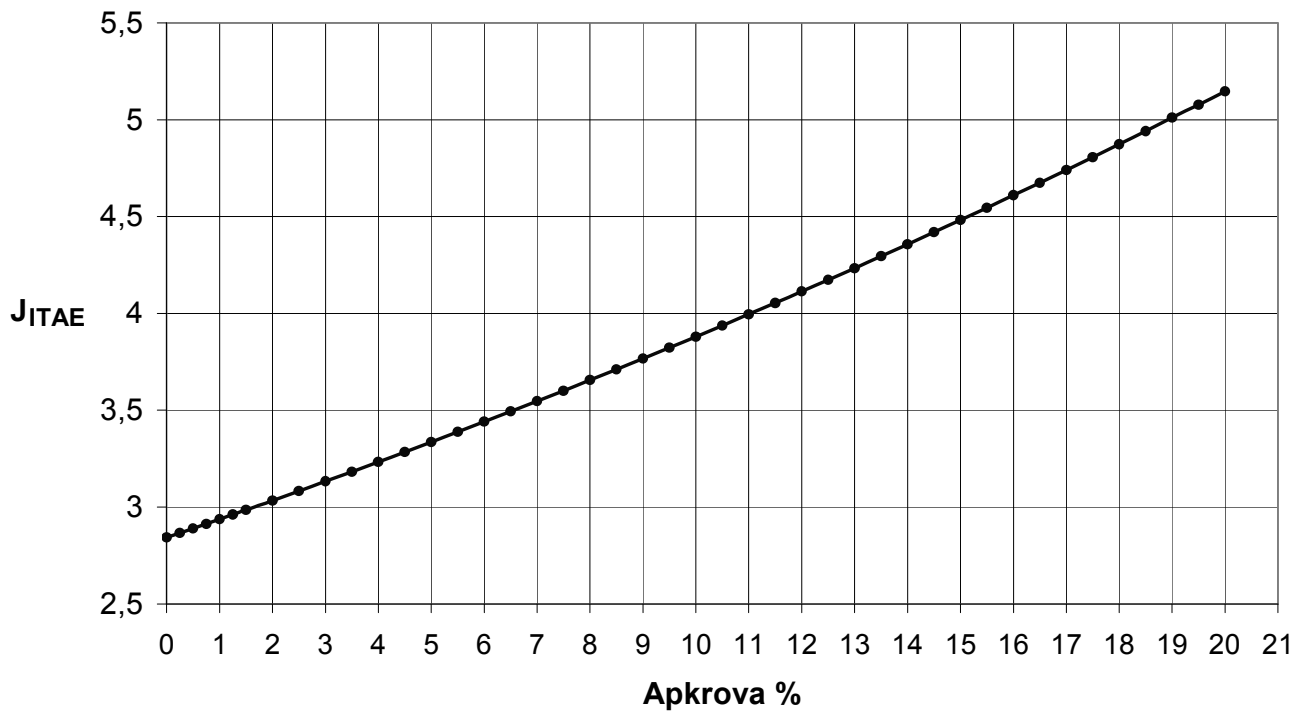
2.1 lentelė

### Elektromechaninės vykdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros regulatoriumi perjungimo parametro vertės užtikrinančios geriausių dinamikos kokybę esant įvairioms statinėms apkrovoms

Apkrova	Perjungimo laikas $t_{perj.l.}$ , s	ITAE rodiklis	Reguliavimo laikas $t_{reg.}$ , s	Apkrova	Perjungimo laikas $t_{perj.l.}$ , s	ITAE rodiklis	Reguliavimo laikas $t_{reg.}$ , s
0	3,62917	2,843	4,141	9,5	2,557	3,823	4,868
0,25	3,51900	2,866	4,163	10	2,536	3,88	4,903
0,5	3,44809	2,89	4,184	10,5	2,516	3,938	4,939
0,75	3,38330	2,914	4,206	11	2,4954948	3,996	4,973
1	3,322107	2,938	4,226	11,5	2,477	4,054	5,007
1,25	3,270999	2,962	4,247	12	2,4595904001	4,114	5,042
1,5	3,226920	2,986	4,268	12,5	2,4426	4,173	5,076
2	3,142651	3,034	4,308	13	2,425	4,233	5,109
2,5	3,0742	3,083	4,349	13,5	2,4112	4,295	5,145
3	3,0114817	3,133	4,388	14	2,397518759	4,357	5,18
3,5	2,9585000	3,183	4,427	14,5	2,3826	4,419	5,213
4	2,907943	3,233	4,465	15	2,3692	4,482	5,246
4,5	2,8634	3,284	4,503	15,5	2,3562	4,545	5,28
5	2,82423	3,336	4,542	16	2,343998192	4,61	5,314
5,5	2,78300	3,388	4,578	16,5	2,3321	4,674	5,347
6	2,74924442	3,441	4,616	17	2,3222446	4,741	5,382
6,5	2,71620	3,494	4,652	17,5	2,3101	4,806	5,413
7	2,6856991	3,547	4,689	18	2,299887006	4,873	5,446
7,5	2,656995	3,601	4,725	18,5	2,2899	4,941	5,479
8	2,6310585	3,656	4,762	19	2,2823336999	5,011	5,515
8,5	2,6042	3,711	4,797	19,5	2,2715	5,078	5,545
9	2,58051799	3,767	4,833	20	2,2629	5,147	5,578

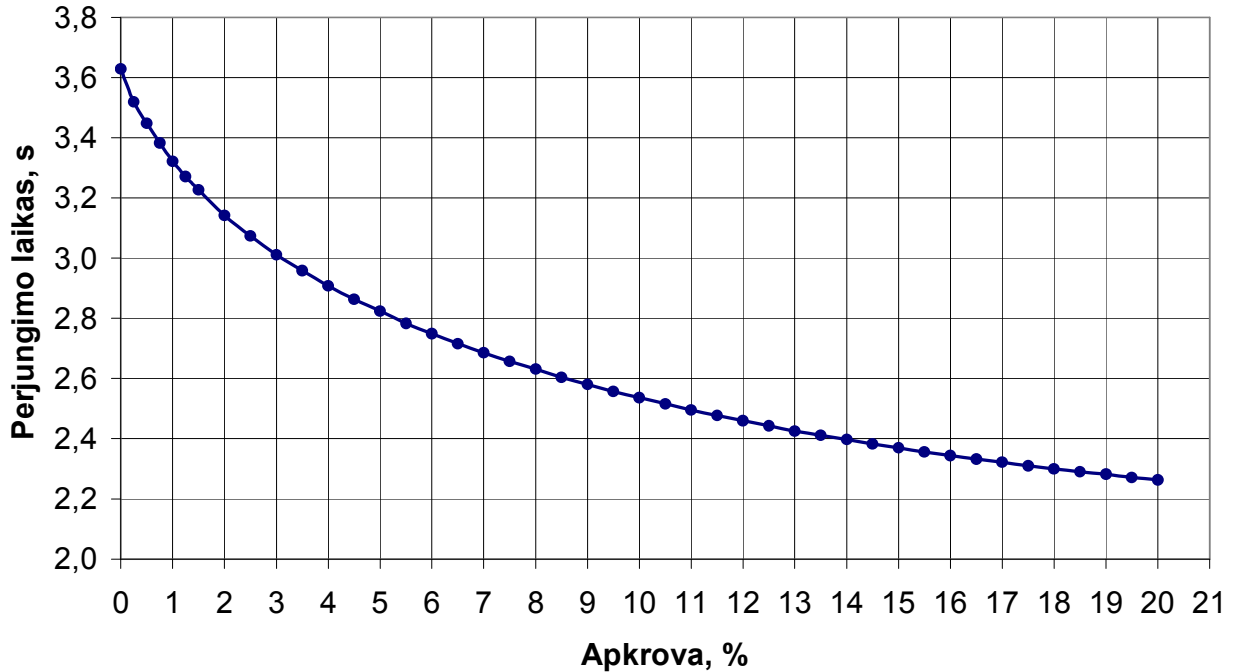


2.4 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi reguliavimo laiko  $t_{reg}$  priklausomybė nuo statinės apkrovos



2.5 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi ITAE integralinio rodiklio priklausomybė nuo statinės apkrovos





2.6 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi P valdymo dėsnio veikimo trukmės  $t_{perj.l.}$  priklausomybė nuo statinės apkrovos

2.1 lentelės duomenys grafiškai pateikti 2.4, 2.5, 2.6 paveiksluose. Iš 2.4 pav. ir 2.5 pav. matyti, kad didėjant statinei apkrovai reguliavimo ir ITAE integralinio rodiklio reikšmės didėja. Iš 2.6 pav. matome, kad didėjant statinei apkrovai P valdymo dėsnio veikimo trukmė mažėja.

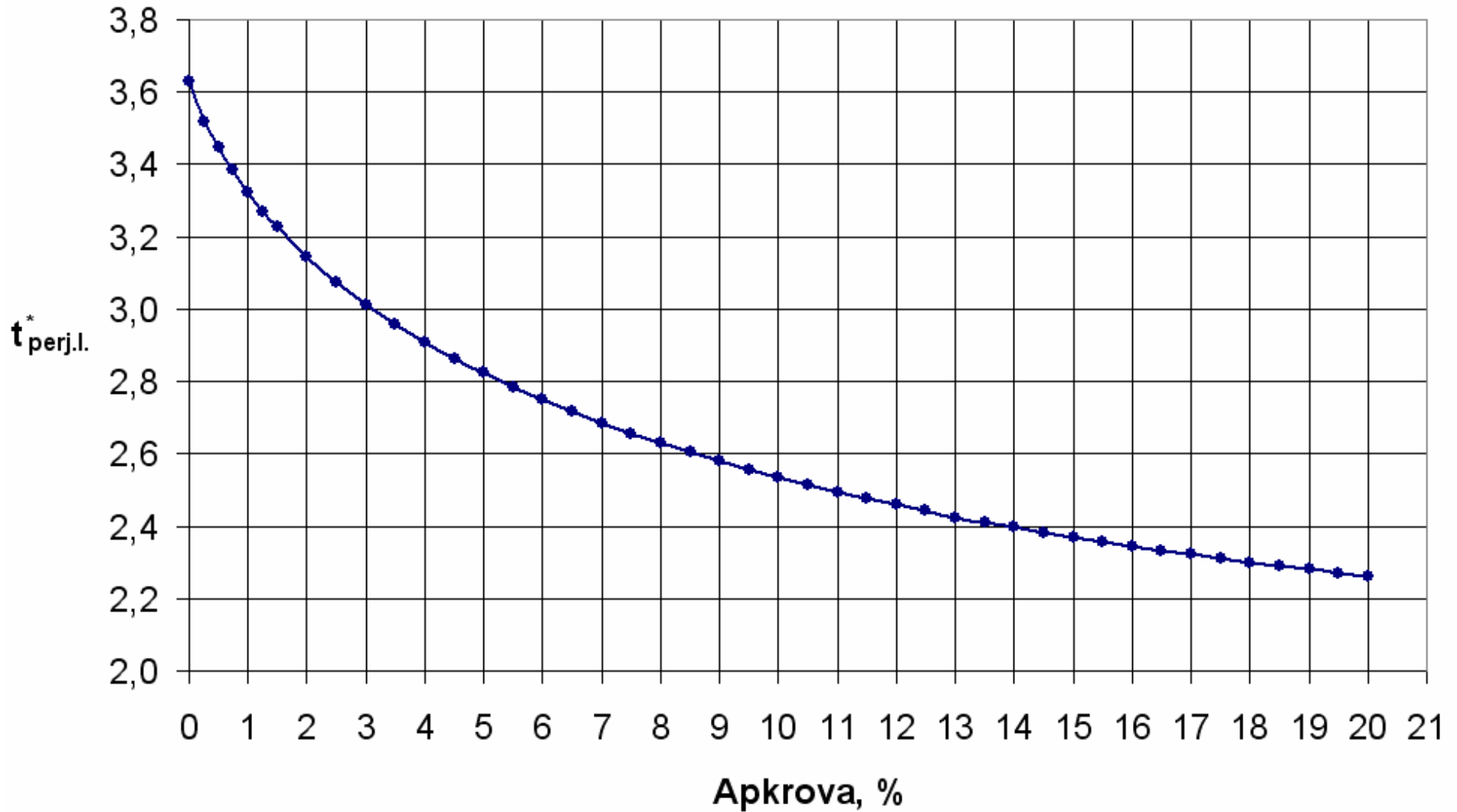
Atrinkus geriausias reguliatoriaus perjungimo laiko vertes iš 2.1 lentelės prie skirtingų apkrovos verčių, buvo sudaryta universalė, pritaikoma įvairioms sistemoms, P valdymo dėsnio veikimo trukmės priklausomybė nuo statinės apkrovos:

$$t_{perj.l.}^* = \frac{t_{perj.l.}}{T_{srov.kont.}}; \quad (2.2)$$

čia  $t_{perj.l.}$  – P valdymo dėsnio veikimo trukmė, s;

$T_{srov.kont.}$  – srovės kontūro laiko pastovioji, s;

Naudojant (2.2) formulę ir 2.7 pav. kreivę galima rasti elektromechaninės vykdyimo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi P valdymo dėsnio veikimo trukmę, žinant sistemos  $T_{srov.kont.}$  srovės kontūro laiko pastoviąją, tai yra, galima P-PI kintamos struktūros reguliatorių pritaikyti įvairioms elektromechaninėms vykdyimo sistemoms.

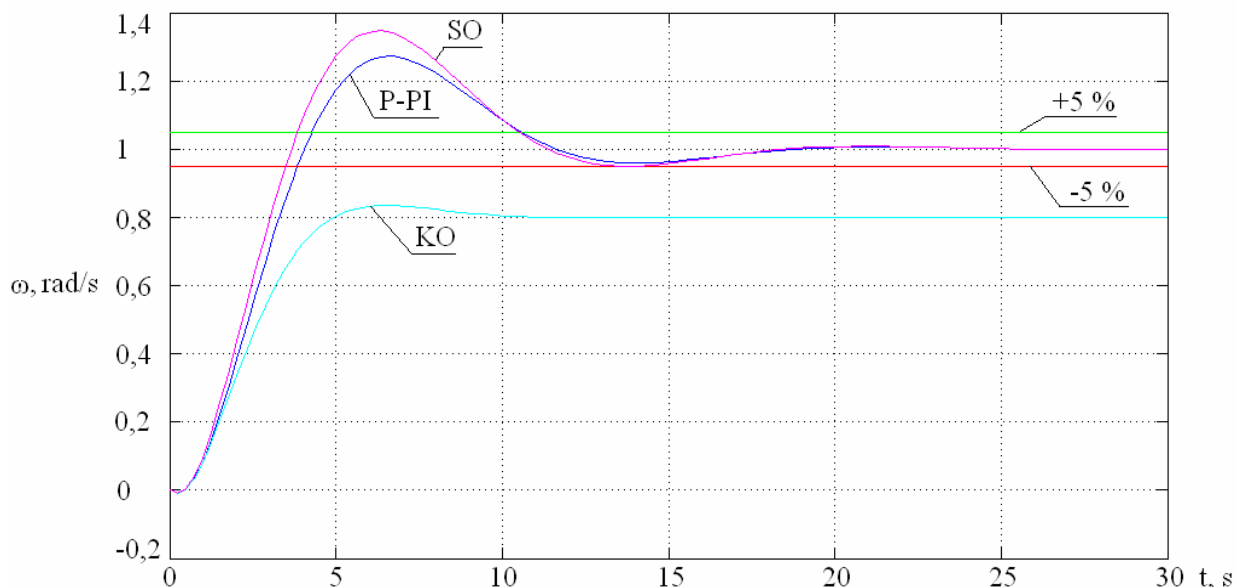


2.7 pav. Elektromechaninės vykdomo sistemos su P-PI kintamos struktūros regulatoriumi universali P valdymo dėsnio veikimo trukmės

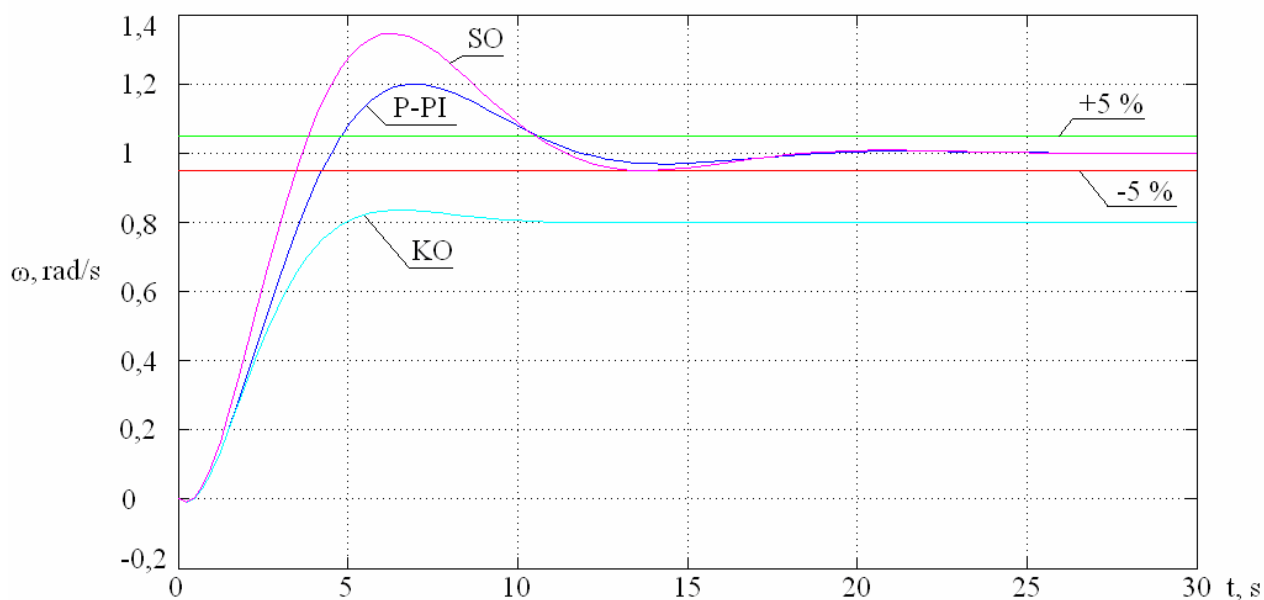
$t_{perj.l.}^*$  priklausomybė nuo statinės apkrovos

### 2.3 Elektromechaninės vykdyto sistemos greičio pereinamųjų procesų kreivės

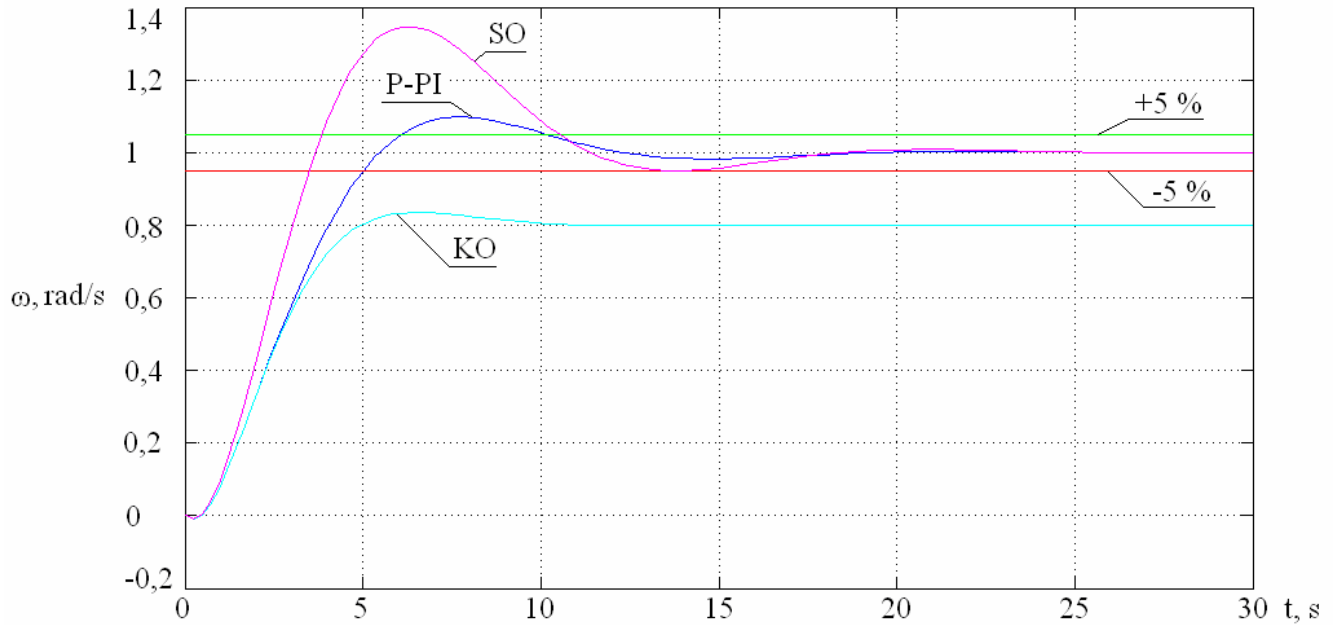
Pateikiama keletas elektromechaninės vykdyto sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi pereinamųjų procesų kreives esant pastoviai statinei 20 % apkrovai, bet keičiat P valdymo dėsnio veikimo trukmę, nuo 2.7 iki 2.13 pav.



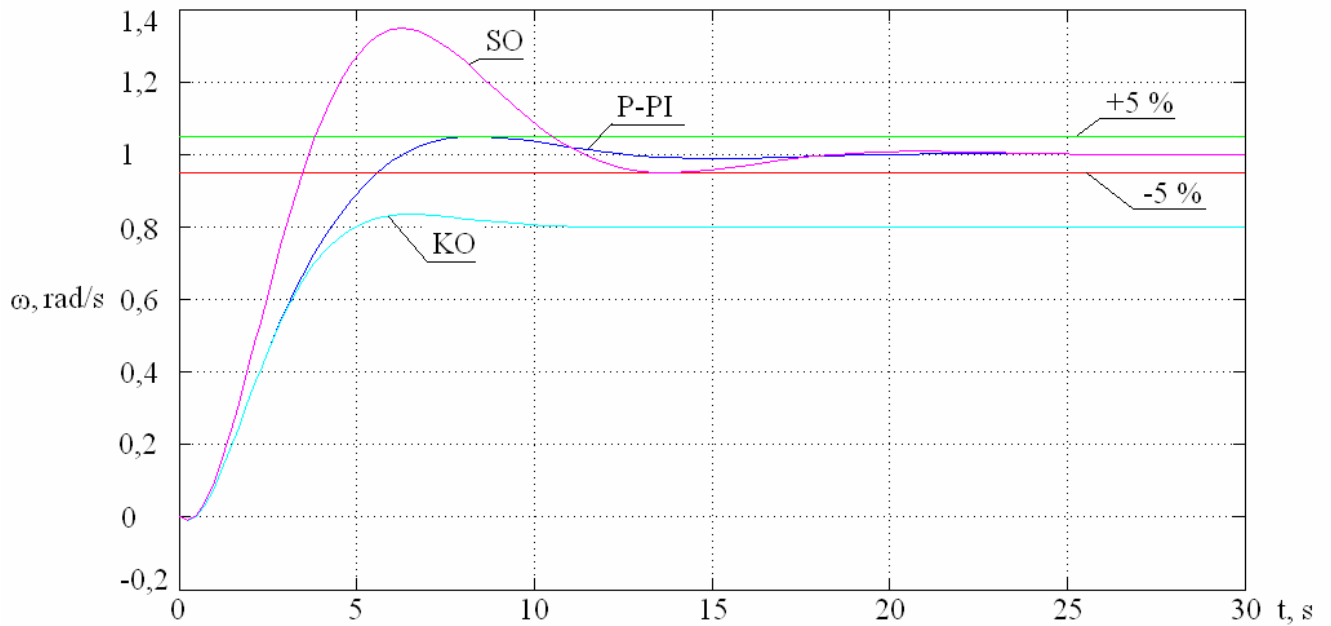
2.8 pav. Elektromechaninės vykdyto sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi pereinamojo proceso kreives esant pastoviai statinei 20 % apkrovai, P valdymo dėsnio veikimo trukmė yra 0,5 s



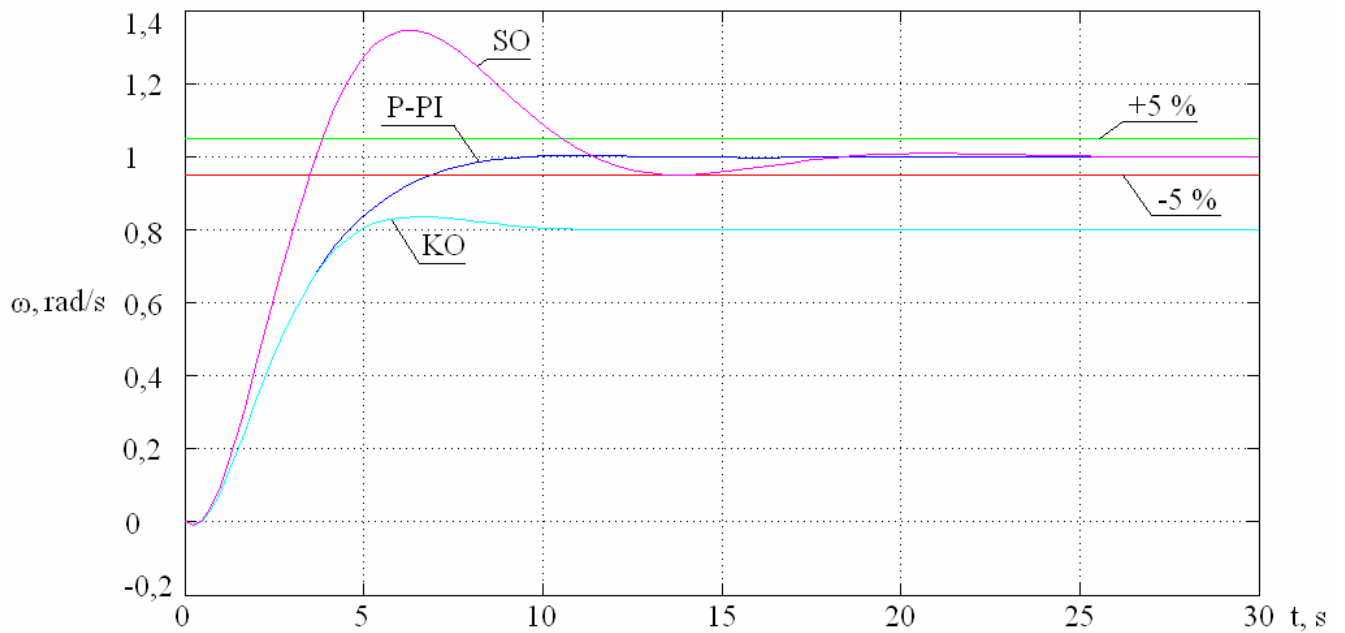
2.9 pav. Elektromechaninės vykdyto sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi pereinamojo proceso kreives esant pastoviai statinei 20 % apkrovai, P valdymo dėsnio veikimo trukmė yra 1 s



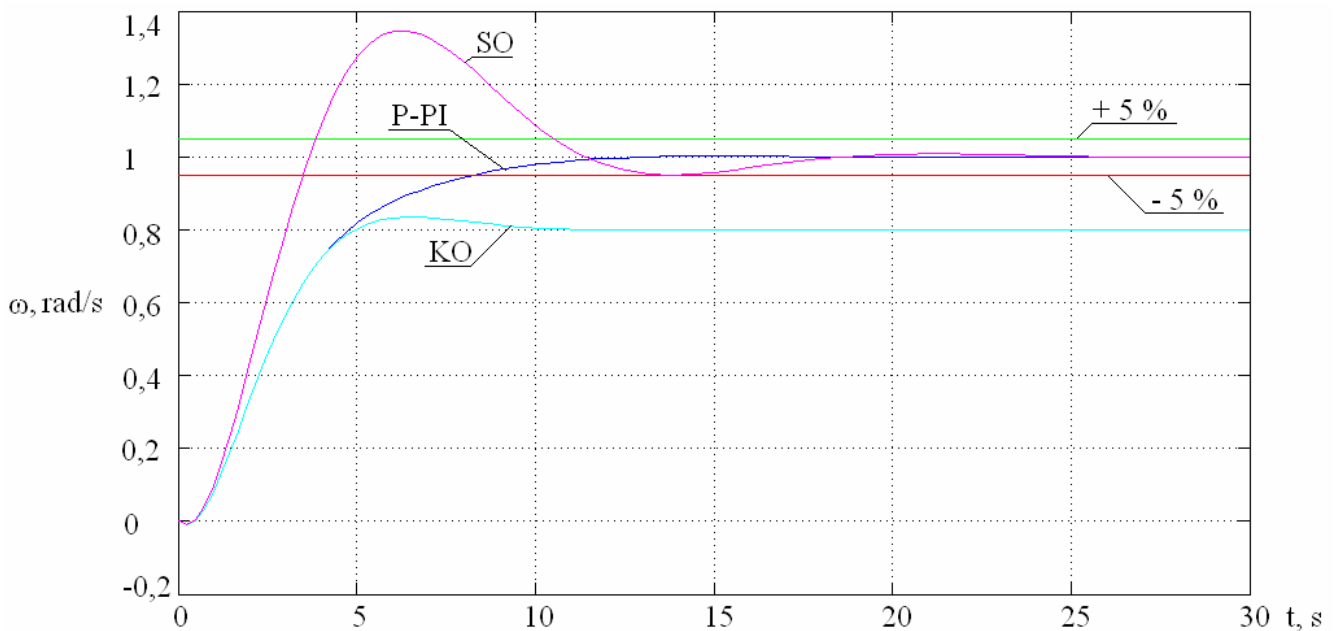
2.10 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi pereinamojo proceso kreivės esant pastoviai statinei 20 % apkrovai, P valdymo dėsnio veikimo trukmė yra 1,8 s



2.11 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi pereinamojo proceso kreivės esant pastoviai statinei 20 % apkrovai, P valdymo dėsnio veikimo trukmė yra 2,2629 s



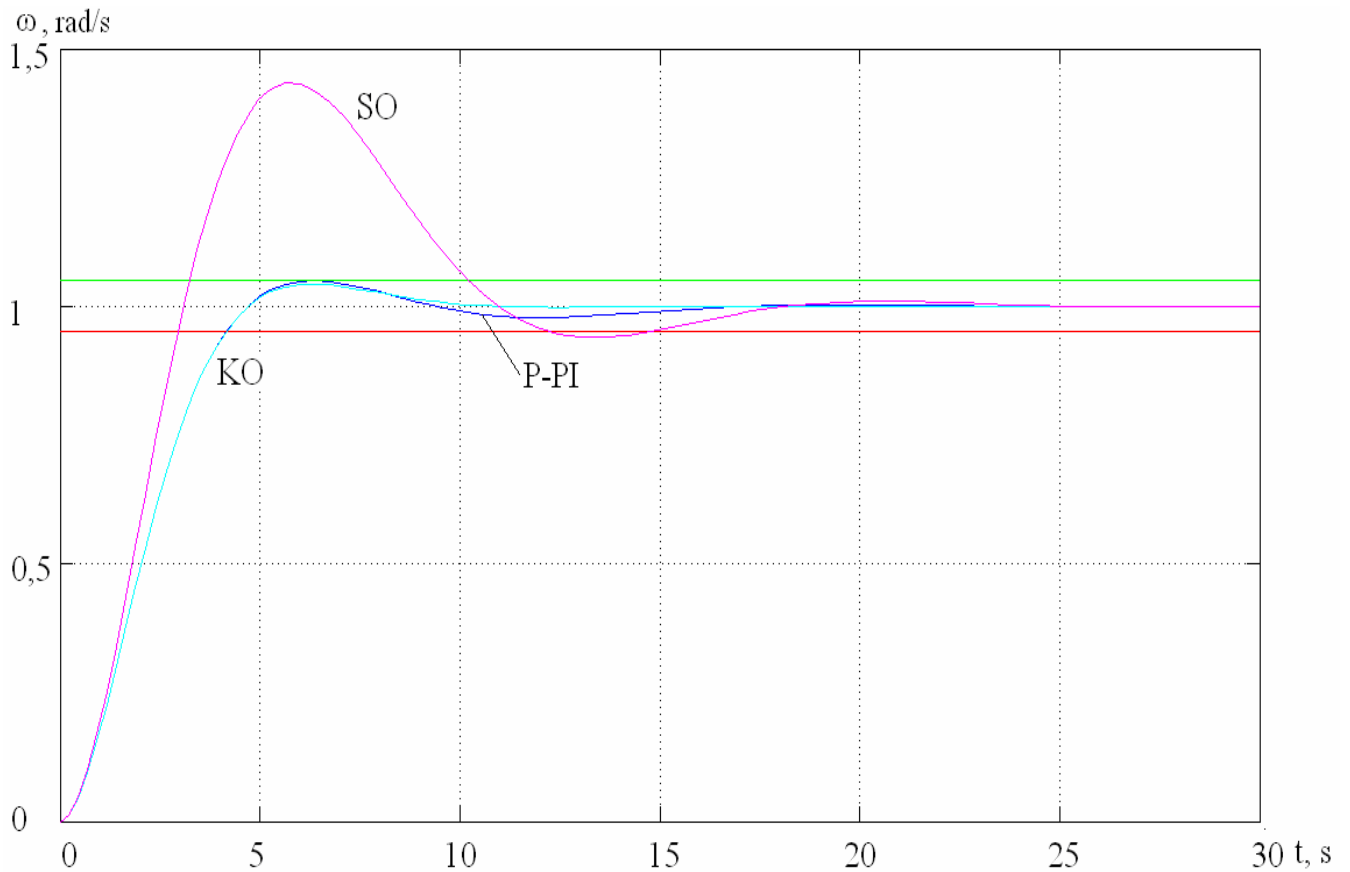
2.12 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi pereinamojo proceso kreivės esant pastoviai statinei 20 % apkrovai, P valdymo dėsnio veikimo trukmė yra 3 s



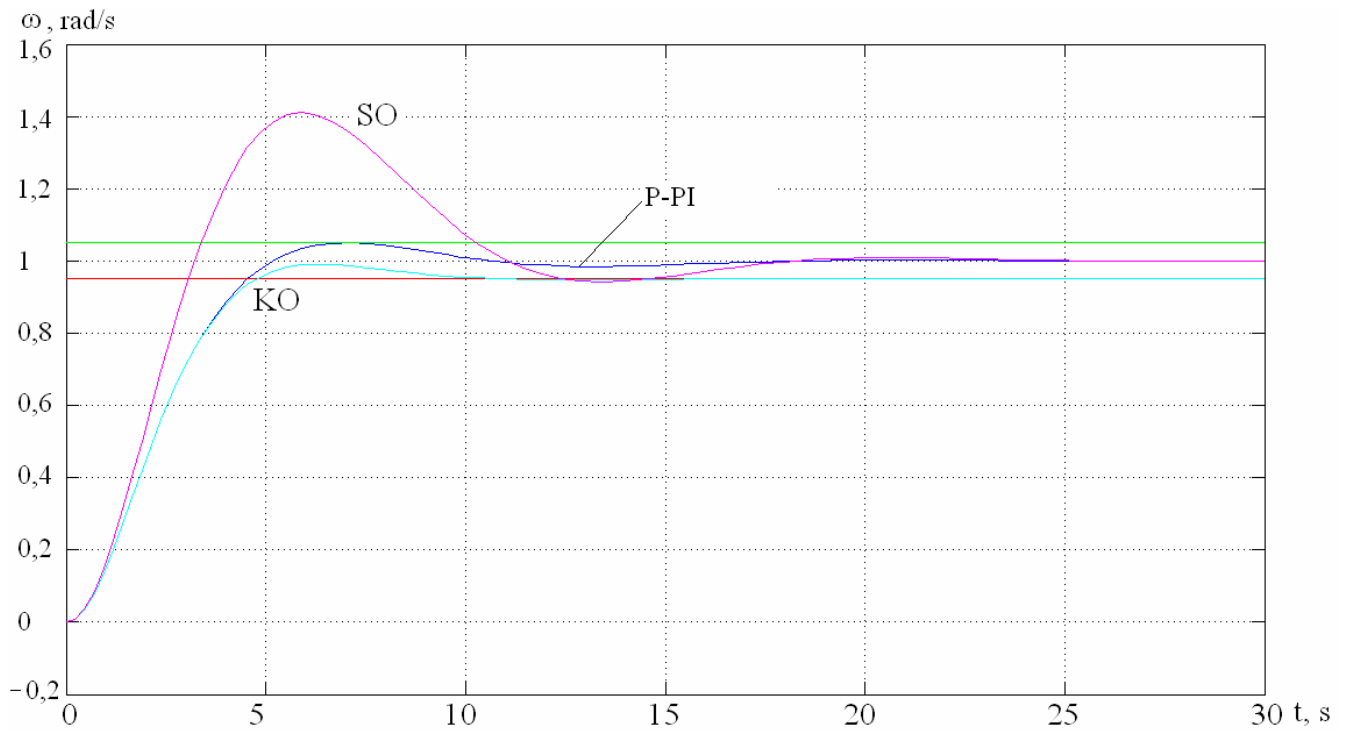
2.13 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi pereinamojo proceso kreivės esant pastoviai statinei 20 % apkrovai, P valdymo dėsnio veikimo trukmė yra 3,5 s

Iš pereinamųjų procesų kreivių matosi, kad esant minimaliam ITAE integraliniam rodikliui gauname geriausias pereinamojo proceso kreives 2.11 pav.

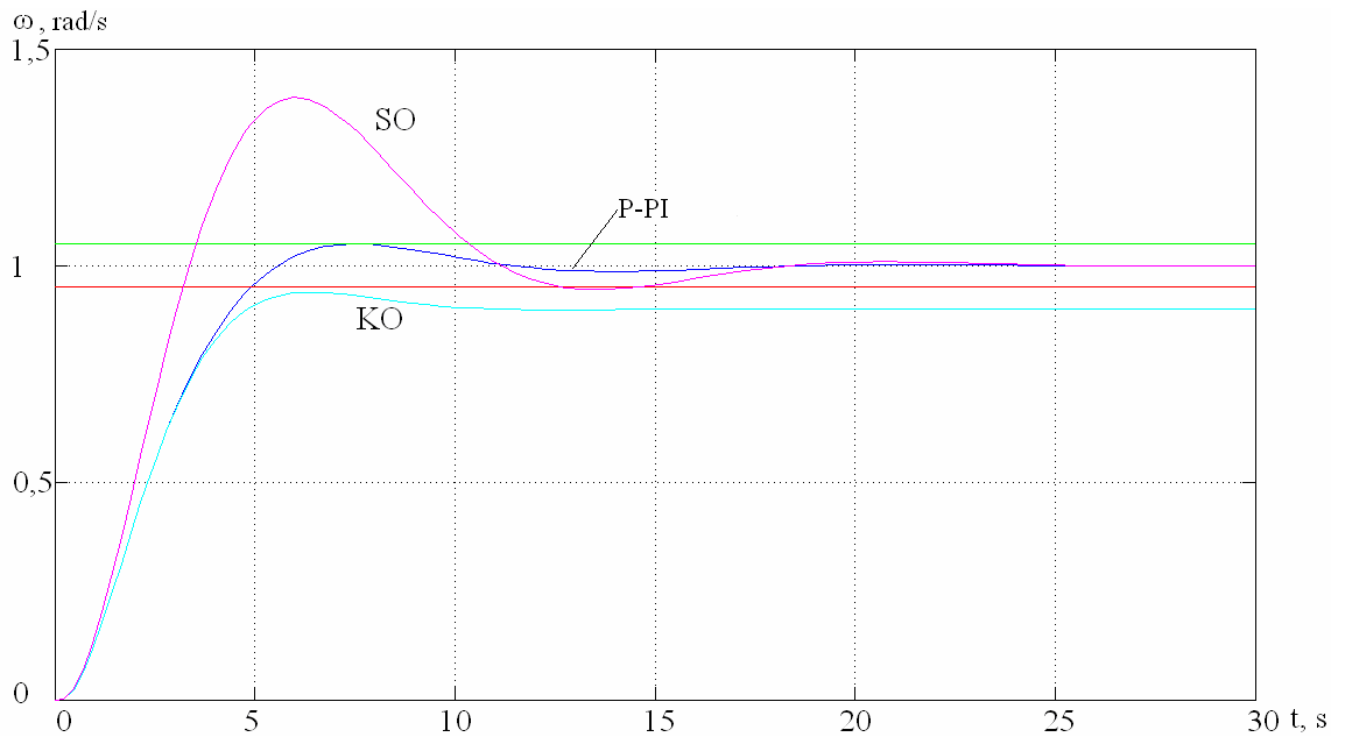
Nuo 2.14 iki 2.18 pav. pateikiama elektromechaninės vykdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi pereinamųjų procesų geriausios kreivės. Šios kreivės gaunamos esant geriausiai P valdymo dėsnio veikimo trukmei (2.1 lentelė), kai minimali ITAE integralinio rodiklio reikšmė, prie 0, 5, 10, 15, 20 % statinių apkrovų.



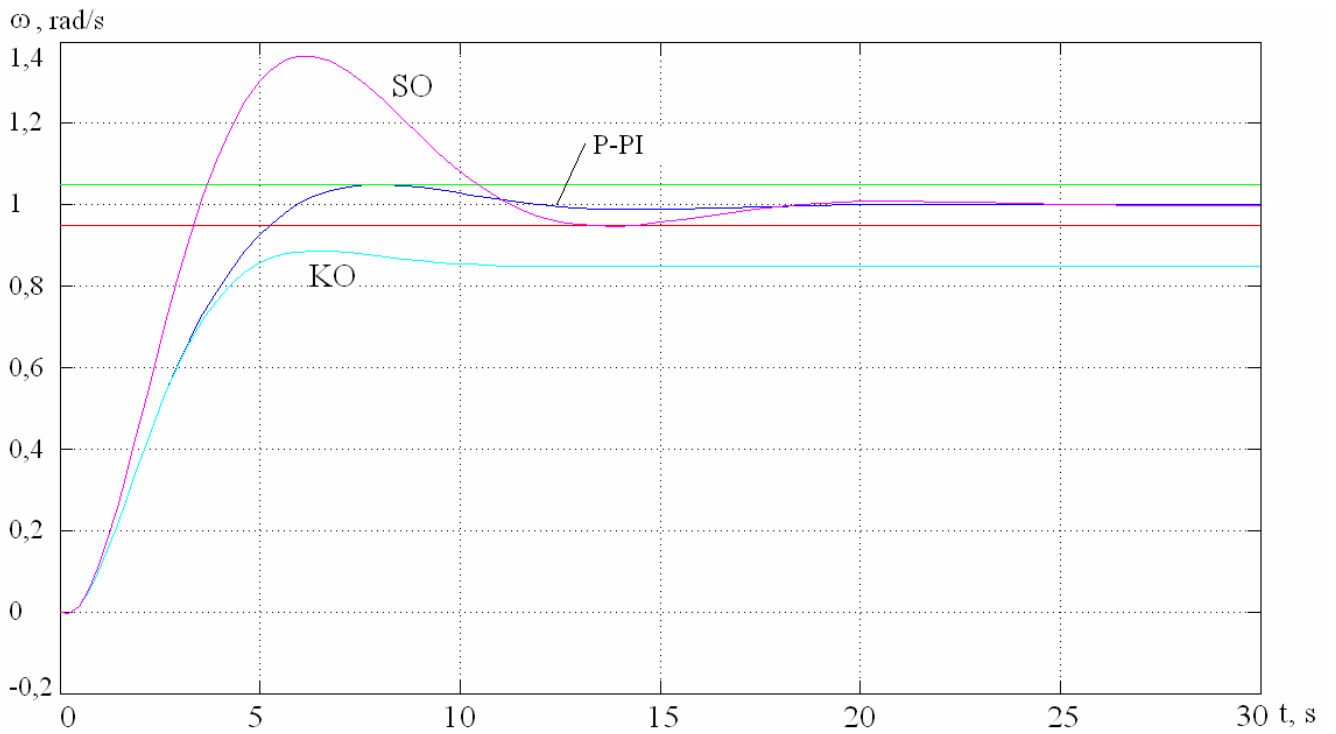
2.14 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai apkrova 0 %



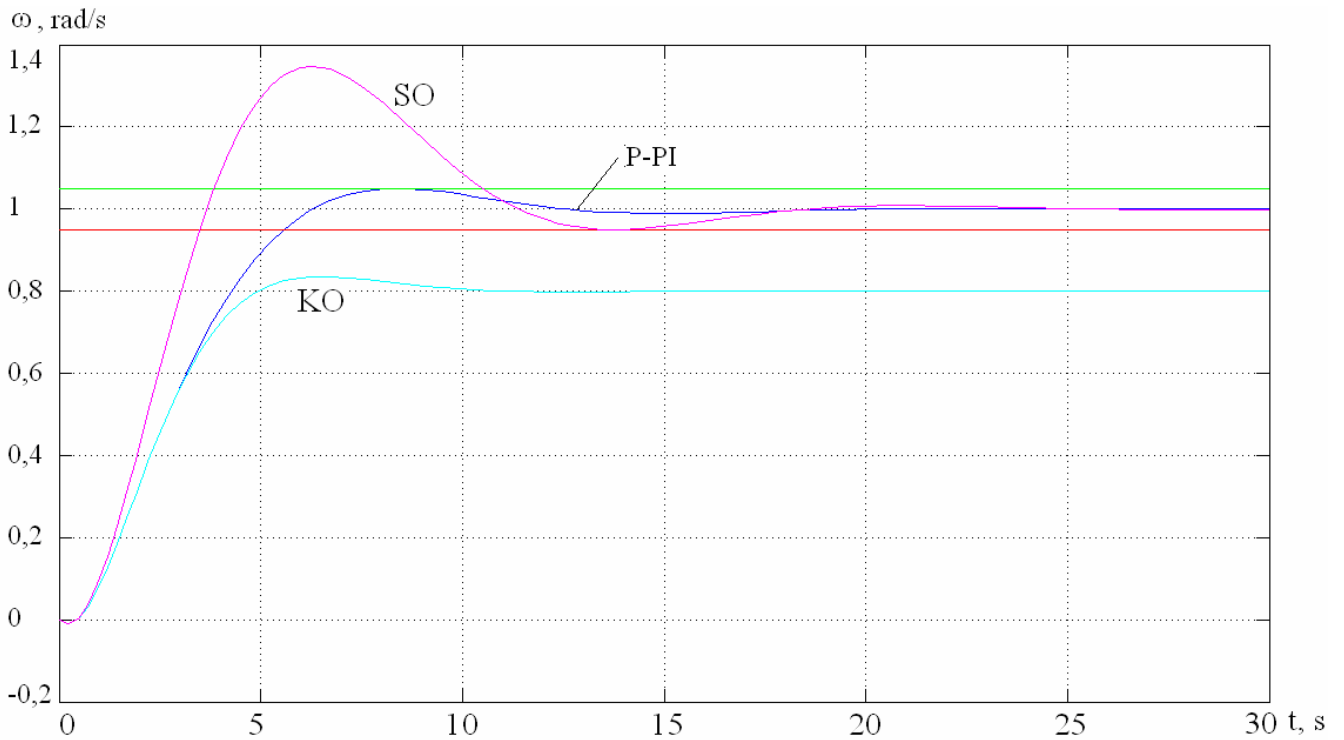
2.15 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai apkrova 5 %



2.16 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai apkrova 10 %



2.17 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai apkrova 15 %



2.18 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai apkrova 20 %



Greičio pereinamojo proceso kreivės nuo 2.14 iki 2.18 pav. rodo, kad naudojant P-PI kintamos struktūros reguliatorių, suderinami simetrinio (SO) ir kiekybinio (KO) optimumų teikiami privalumai ir pašalinami trūkumai. Užtikrinamas nedidelis greičio dinaminis nuokrypis, neviršijantis 5 %, kas nėra būdinga simetriniam optimumui, ir garantuojamas nulinis greičio statinis nuokrypis, kas nėra būdinga kiekybiniam optimumui.

Gauti rezultatai yra universalūs ir gali būti pritaikyti įvairioms elektromechaninėms greičio valdymo sistemoms – tiek su nuolatinės, tiek ir su kintamosios srovės elektros varikliais.

### 3. GAUTŲ DUOMENŲ PRITAIKYMAS NUOLATINĖS SROVĖS ELEKTROS PAVARAI

#### 3.1 Modeliuojamos nuolatinės srovės elektros pavaros parametrai

Dėl greičio valdymo paprastumo kintamos struktūros greičio reguliatoriaus realizavimas modeliuojamas greičio valdymo sistemoje su nuolatinės srovės nepriklausomo žadinimo varikliu – nuolatinės srovės elektros pavaroje [3].

Kintamos struktūros greičio reguliatorius gali būti taikomas elektromechaninėse vykdomose – nuolatinės srovės elektros pavarose, kai šuolinio įėjimo signalo pokytis yra tokios vertės, kad inkaro srovė pereinamojo proceso metu nėra ribojama [3].

Kad būtų galima palyginti kintamos struktūros reguliatorių efektyvumą, buvo pasirinkta ta pati elektromechaninė sistema, kaip ir iširtos [3] PI-P-PI sistemos. Nuolatinės srovės elektros pavaros modeliui sudaryti MATLAB/Simulink programa pasirenkamas nuolatinės srovės nepriklausomo žadinimo elektros variklis tokių parametru:  $P_n = 0,28$  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>. Priimama, kad galios keitiklio laiko pastovioji  $T_k = 0,005$  s. Siekiant išvengti inkaro srovės ribojimo, elektros pavaros greičio nustatymo signalo vertė priimama 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 [3].

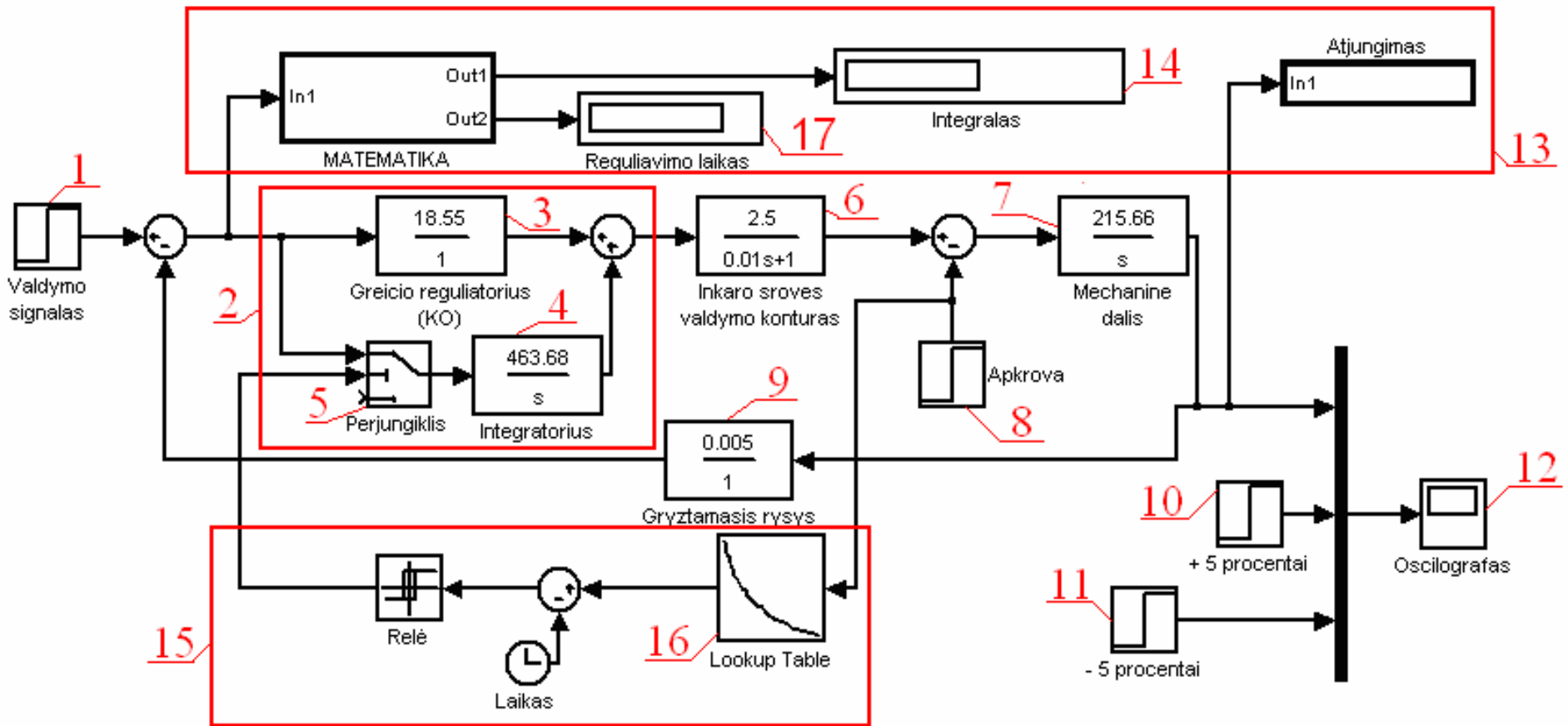
#### 3.2 Nuolatinės srovės elektros pavaros modelis su realizuotu kintamos struktūros reguliatoriumi MATLAB/Simulink programa

Modelio parametru vertės:

Greičio nustatymo signalo vertė: 0.785395/4. Proporcinio reguliatoriaus, atitinkančio kiekybinį optimumą, stiprinimo koeficientas: 18.55. PI reguliatoriaus, atitinkančio simetrinį optimumą, integruojanti dalis:  $\frac{463.68}{s}$ . Pavaldis inkaro srovės valdymo kontūras suderintas pagal kiekybinį

optimumą ir aproksimuotas perdavimo funkcija:  $\frac{2.5}{0.01s+1}$ . Variklio mechaninė dalis apibūdinama

perdavimo funkcija:  $\frac{215.66}{s}$ . Grįžtamojo ryšio koeficientas: 0.005.



3.1 pav. Nuolatinės srovės elektros pavaros modelis su realizuotu kintamos struktūros reguliatoriumi (Sistemą sudaro: valdymo signalo grandis (1); kintamos struktūros reguliatorius (2) su atskirtomis proporcinė (3) ir integruojančia (4) dalimis, reguliatoriaus valdymo dėsnio perjungiklis (5); pavaldus srovės valdymo kontūras (6); variklio mechaninė grandis (7); apkrovos grandis(8); grįžtamojo ryšio grandis (9); leistino nuokrypio 5 % grandys (10, 11); oscilografas, pereinamiesiems procesams stebėti (12); matematinis modelis (13) ITAE integralinio kokybės rodiklio vertei stebėti (14)); P valdymo dėsnio veikimo trukmės valdymo grandis (15); P valdymo dėsnio veikimo trukmės nuo apkrovos priklausomybės duomenų masyvas (16); (17) grandis reguliavimo laikui stebėti )

Turėdami P-PI kintamos struktūros reguliatoriaus P valdymo dėsnio veikimo trukmės (perjungimo laiko) priklausomybę nuo apkrovos 2.7 pav., galime sudaryti modelį, kuris automatiškai keistų greičio reguliatoriaus struktūrą iš P dėsnio į PI dėsnį. Šiam veiksmui atlikti naudojame iš SIMULINK posistemės bloką LOOKUP TABLE, tai duomenų masyvo blokas, į jį yra suvedami jau žinomi duomenys, suvedę į šį bloką P valdymo dėsnio veikimo trukmės (perjungimo laiko) priklausomybę nuo apkrovos 2.7 pav., gauname tikslų perjungimo laiką veikiant įvestai (nustatytai tyrimo eigoje) statinės apkrovos vertei, tarpinės reikšmės šis blokas tiesiškai interpoliuoja.

### 3.3 Geriausią dinamikos kokybę užtikrinančio greičio reguliatoriaus perjungimo parametro priklausomybė nuo statinės apkrovos

Pritaikant P valdymo dėsnio veikimo trukmės  $t_{per.l.}^*$  priklausomybę nuo apkrovos šiam konkrečiam atvejui, reikia vadovautis formule:

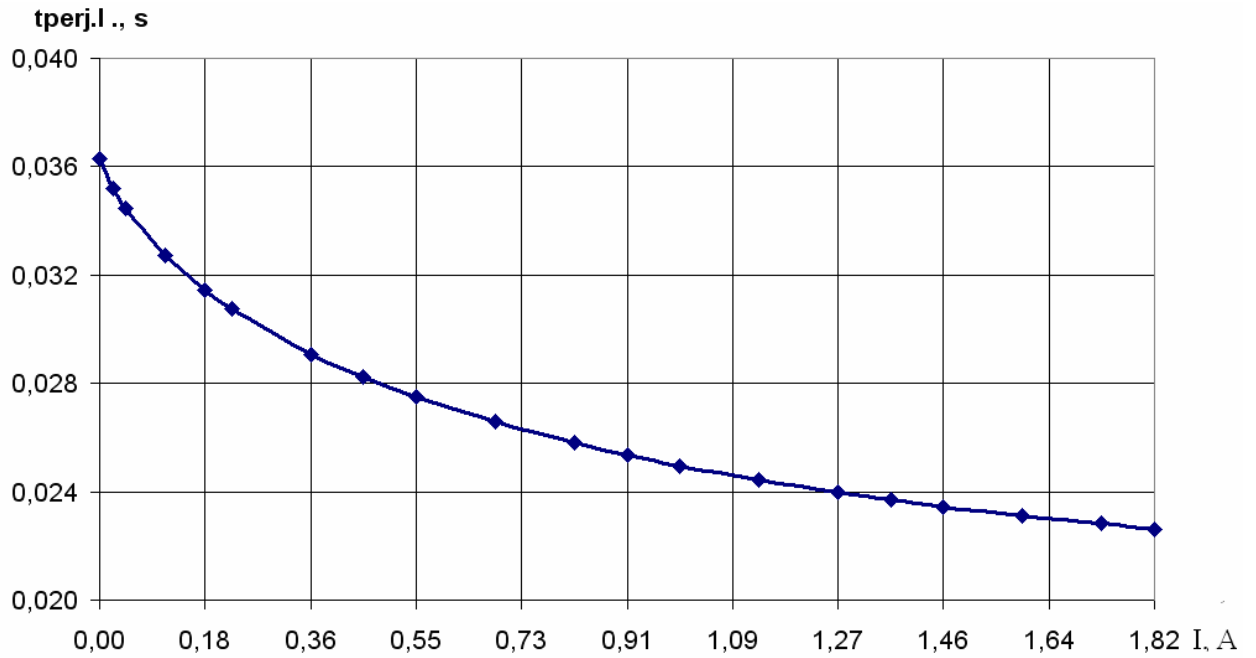
$$t_{per.l.} = t_{per.l.}^* \cdot T_{srov.kont.} \quad (3.1)$$

čia  $t_{per.l.}^*$  – universali P valdymo dėsnio veikimo trukmė, 2.7 pav.;

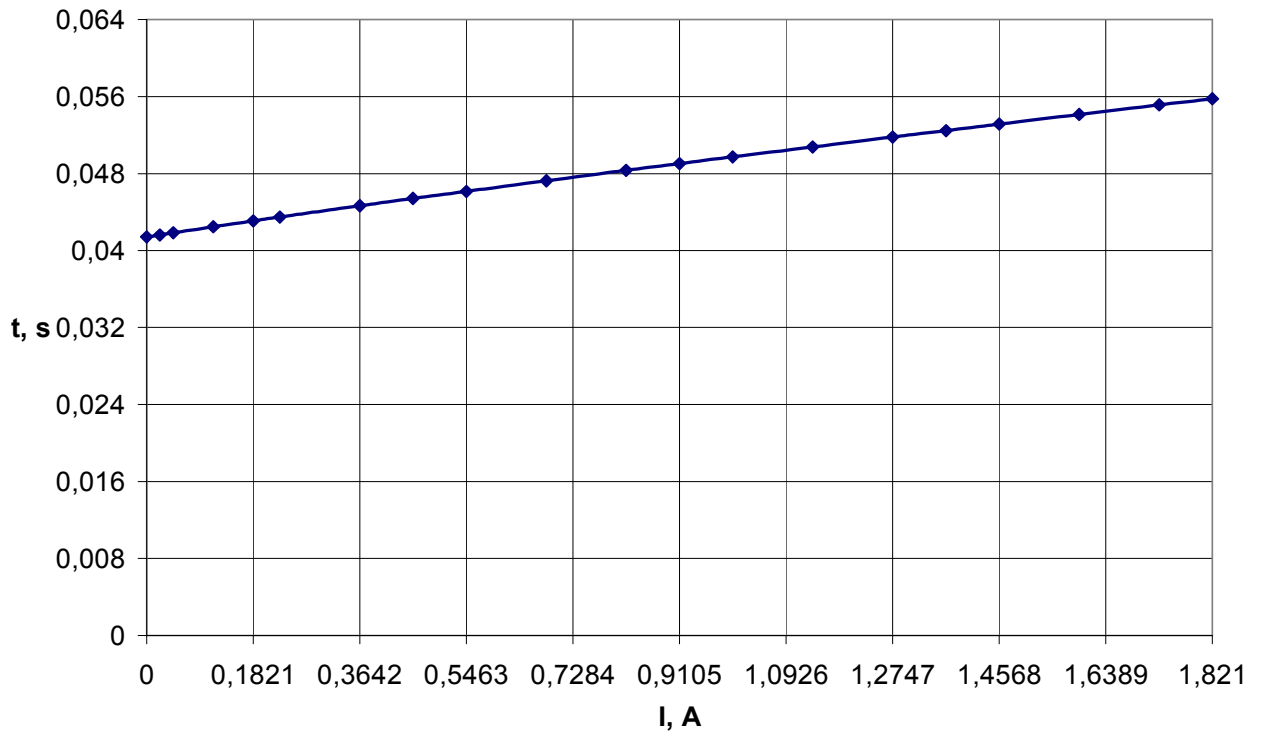
$T_{srov.kont.}$  – nagrinėjamos sistemos srovės kontūro laiko pastovioji, s;

Naudojant (3.1) formulę ir 2.7 pav. kreivę galima rasti elektromechaninės vykdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi P valdymo dėsnio veikimo trukmę, žinant sistemos  $T_{srov.kont.}$  srovės kontūro laiko pastoviąją, šiuo konkrečiu atveju, srovės kontūro laiko pastovioji yra 0,01 s.

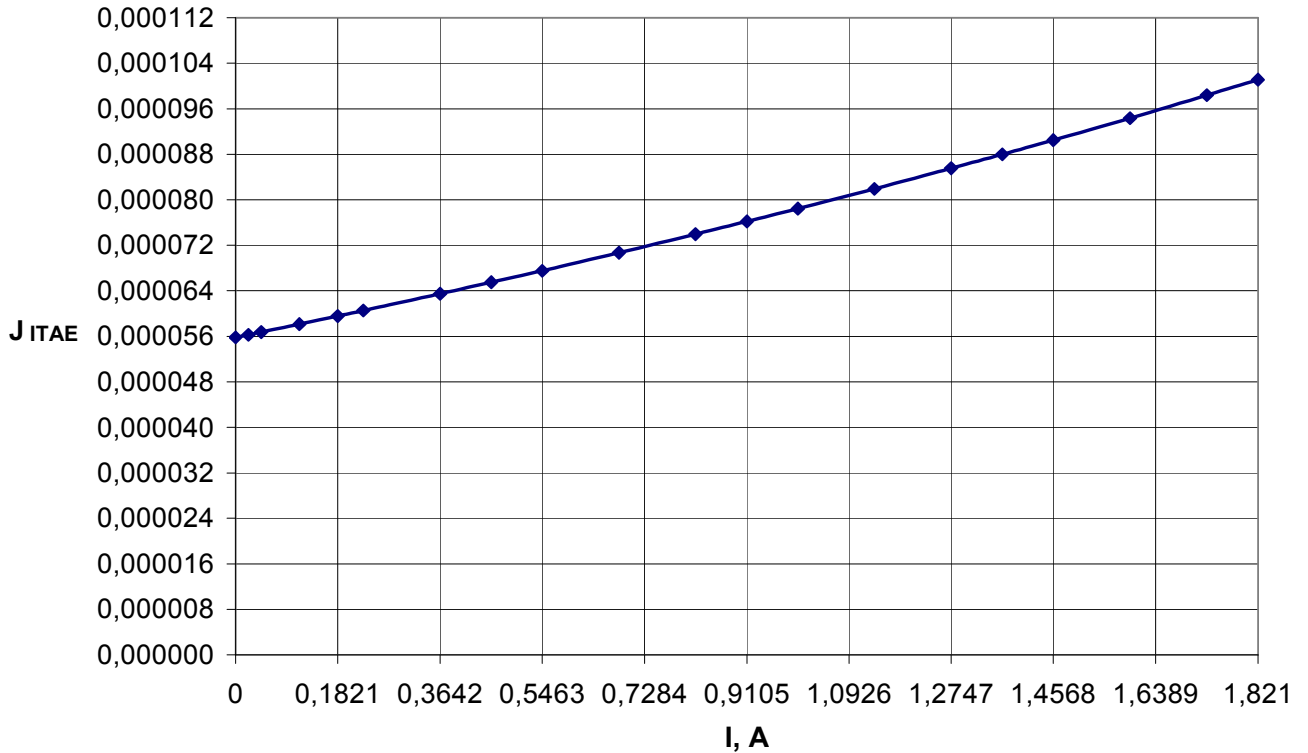
3.2 pav. pateikiama apskaičiuota nuolatinės srovės elektros pavaros P valdymo dėsnio veikimo trukmės priklausomybė nuo statinės apkrovos, šios priklausomybės kitimo pobūdis yra analogiškas 2.7 pav. priklausomybės kitimui.



3.2 pav. Elektros pavaros greičio valdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi P valdymo dėsnio veikimo trukmės priklausomybė nuo statinės apkrovos



3.3 pav. Elektros pavaros greičio valdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi reguliavimo laiko priklausomybė nuo statinės apkrovos



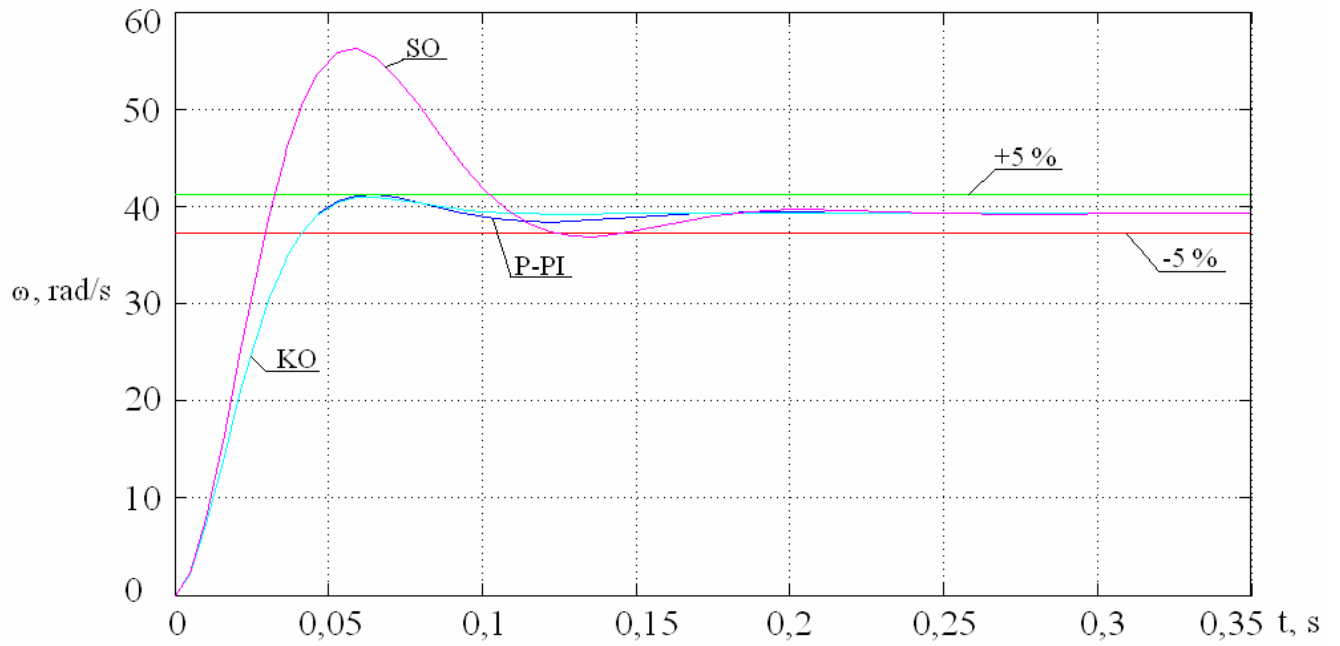
3.4 pav. Elektros pavaros greičio valdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi ITAE integralinio rodiklio priklausomybė nuo statinės apkrovos

Gaunamų elektros pavaros dinamikos kokybės rodiklių kreivių 3.3, 3.4 pav. kitimo pobūdis yra analogiškas gaunamoms apibendrintoje sistemoje 2.4, 2.5 pav. kokybės kitimo kreivėms.

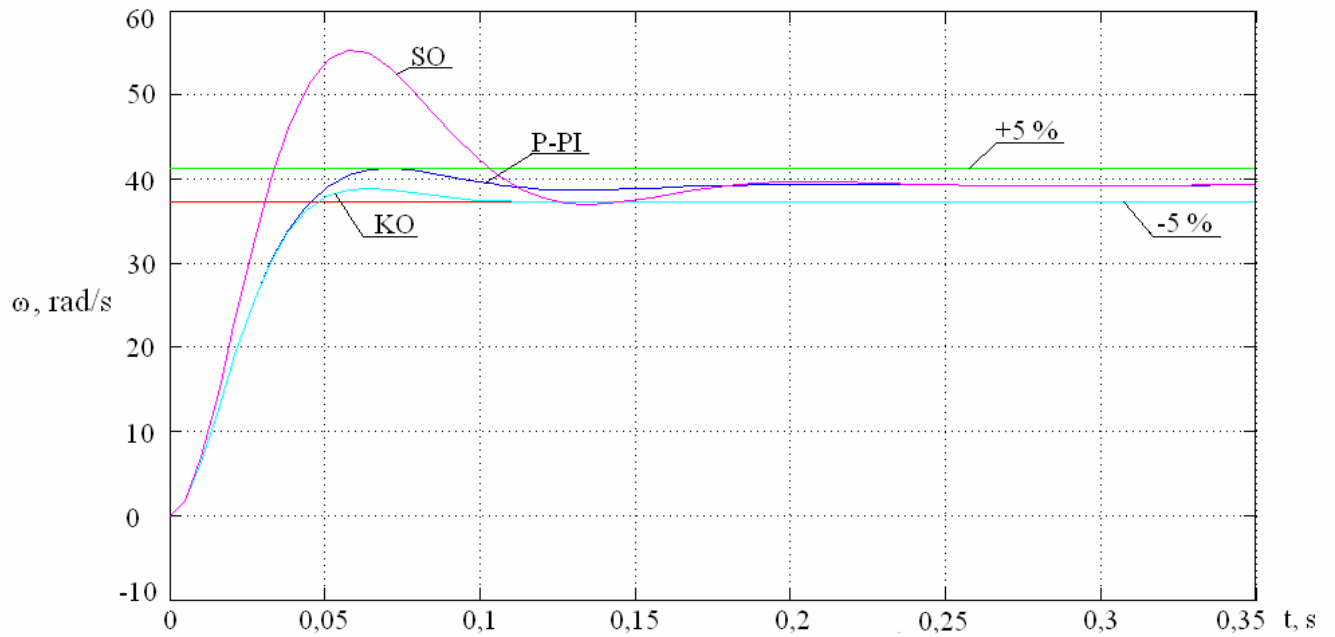
### 3.4 Nuolatinės srovės elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės

Nuo 3.5 iki 3.9 pav. pateikiama nuolatinės srovės elektros pavaros su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi pereinamųjų procesų geriausios kreivės. Šios kreivės gaunamos esant apskaičiuotai pagal (3.1) formulę geriausiai P valdymo dėsnio veikimo trukmei, prie 0, 5, 10, 15, 20 % statinių apkrovų.

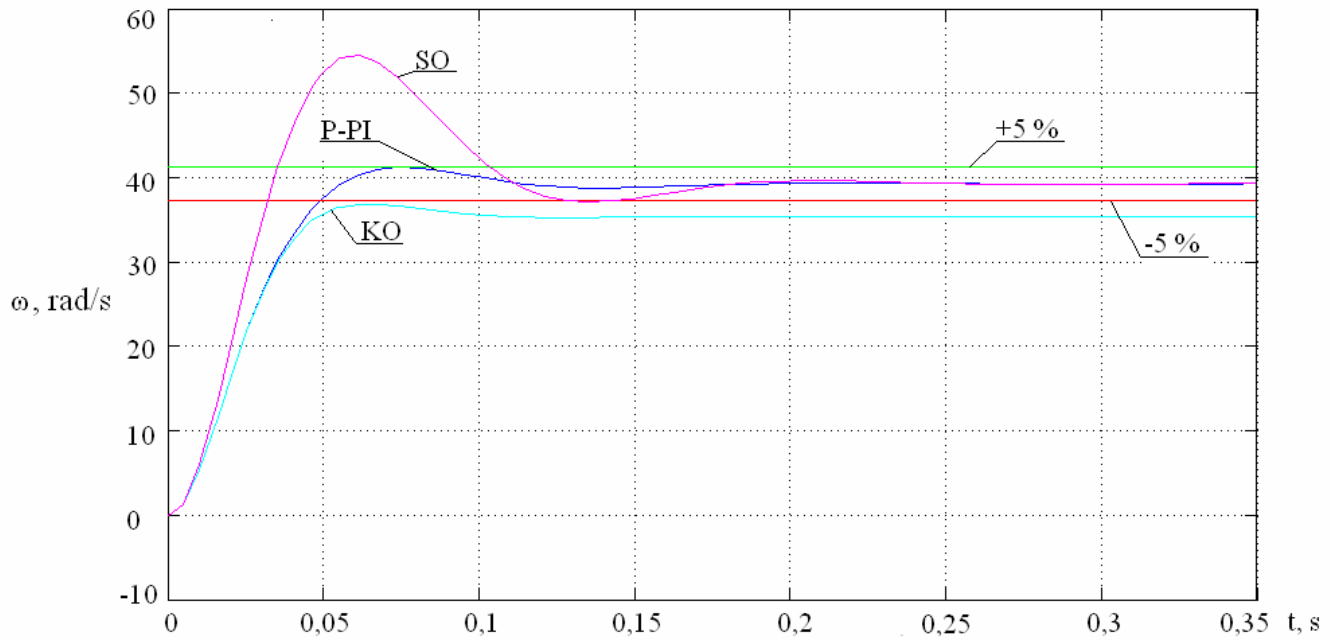
Greičio pereinamojo proceso kreivės nuo 3.5 iki 3.9 pav. rodo, kad naudojant P-PI kintamos struktūros reguliatorių, suderinami simetrinio (SO) ir kiekybinio (KO) optimumų teikiami privalumai ir pašalinami trūkumai. Užtikrinamas nedidelis greičio dinaminis nuokrypis, neviršijantis 5 %, kas nėra būdinga simetriniam optimumui, ir garantuojamas nulinis greičio statinis nuokrypis, kas nėra būdinga kiekybiniam optimumui.



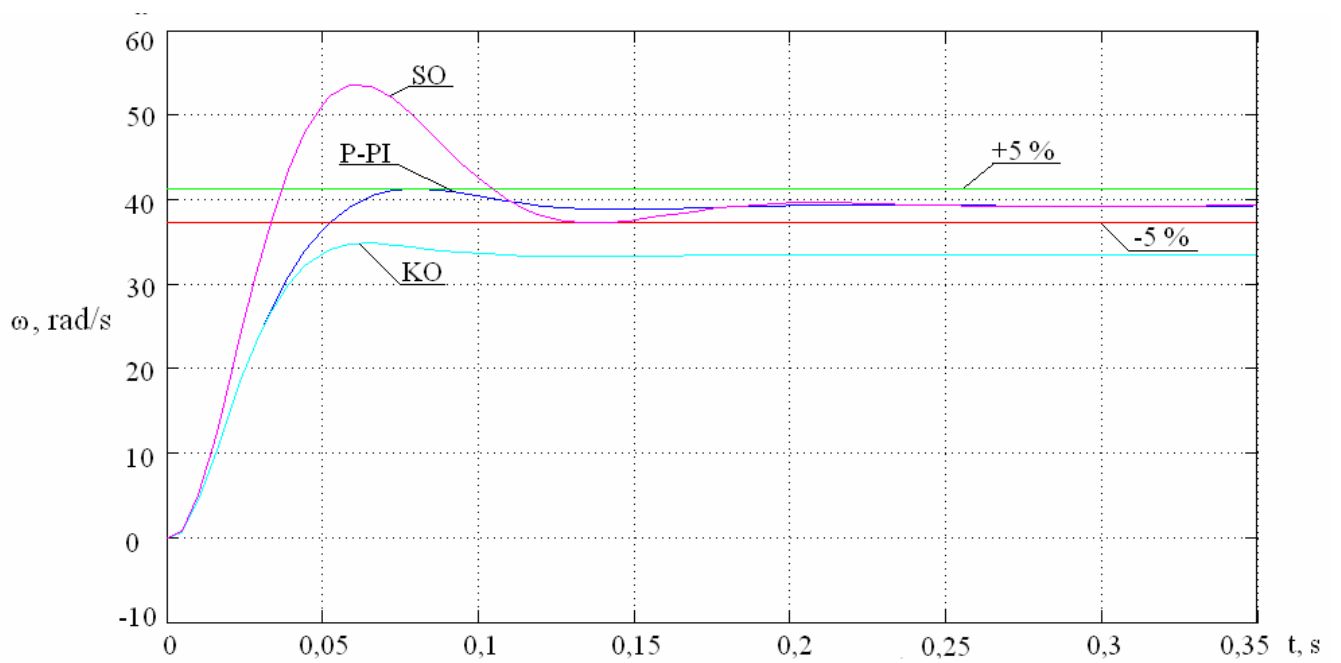
3.5 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai statinė apkrova 0 %



3.6 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai statinė apkrova 5 %

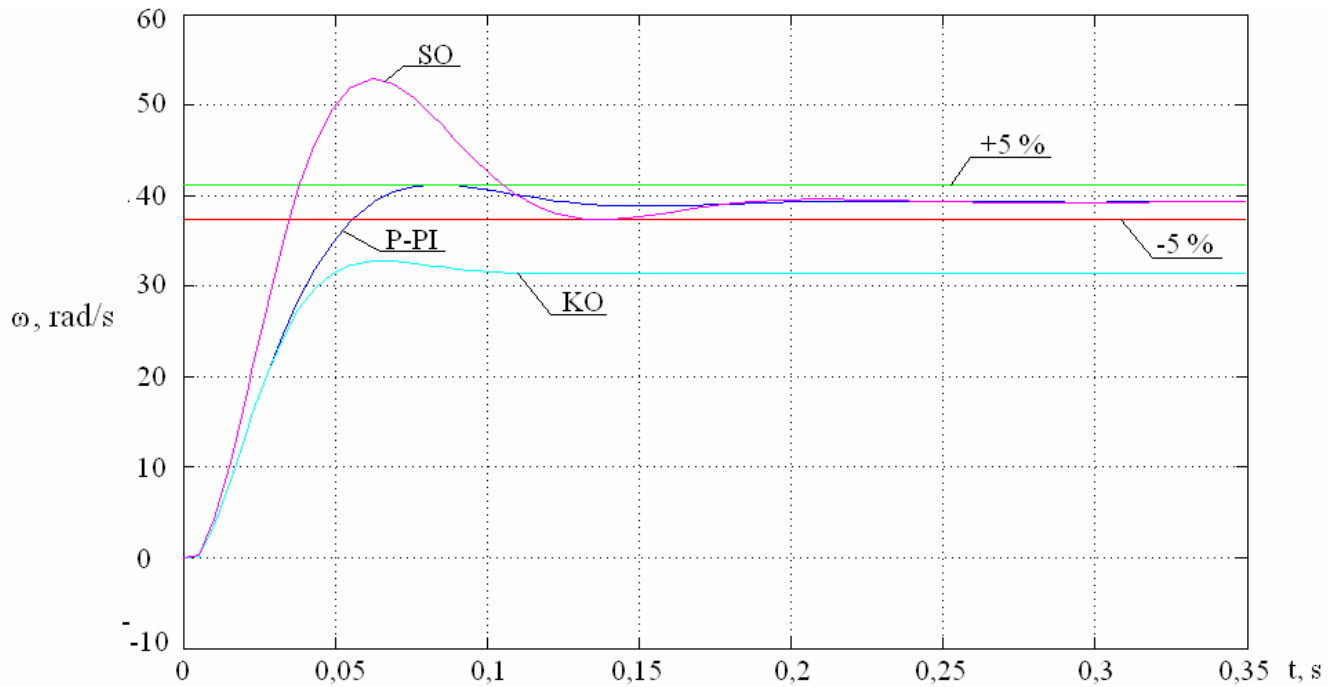


3.7 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai statinė apkrova 10 %



3.8 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai statinė apkrova 15 %





3.9 pav. Elektros pavaros greičio pereinamųjų procesų kreivės, kai statinė apkrova 20 %

Elektros pavaros greičio pereinamojo proceso kreivių nuo 3.5 iki 3.9 pav. kitimo pobūdis yra analogiškas greičio pereinamojo proceso kreivėms gaunamoms apibendrintos sistemos atveju (nuo 2.14 iki 2.18 pav.). Tas parodo gautų rezultatų universalumą ir pritaikomumą.

## 4. ELEKTROMECHANINĖS VYKDYMO SISTEMOS SU PASTOVIOS IR KINTAMOS STRUKTŪROS REGULIATORIAIS DINAMIKOS KOKYBĖS PALYGINIMAS

### 4.1 Apibendrintos elektromechaninės vykdymo sistemos su pastovios ir kintamos struktūros regulatoriais dinamikos kokybės palyginimas

Turėdami apibendrintų elektromechaninių vykdymo sistemų su pastovios struktūros regulatoriumi (SO) ir (P-PI), (PI-P-PI) [3] kintamos struktūros regulatoriais dinamikos kokybės (ITAE rodiklio) kitimo duomenis 4.1 pav., galime juos tarpusavyje palyginti. Palyginama yra su sistemos su pastovios struktūros regulatoriaus (SO) integraliniu dinamikos kokybės rodikliu ITAE. Palyginimas atliekamas pagal (4.1) (4.2) formules:

$$\Delta 1 = \frac{J_{ITAE_{KSR(P-PI)}} - J_{ITAE_{SO}}}{J_{ITAE_{SO}}} \cdot 100\%; \quad (4.1)$$

čia  $J_{ITAE_{KSR(P-PI)}}$  – elektromechaninės vykdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros regulatoriumi ITAE integralinis rodiklis;

$J_{ITAE_{KSR(SO)}}$  – elektromechaninės vykdymo sistemos su (SO) pastovios struktūros regulatoriumi ITAE integralinis rodiklis;

$$\Delta 2 = \frac{J_{ITAE_{KSR(PI-P-PI)}} - J_{ITAE_{KSR(P-PI)}}}{J_{ITAE_{SO}}} \cdot 100\%; \quad (4.2)$$

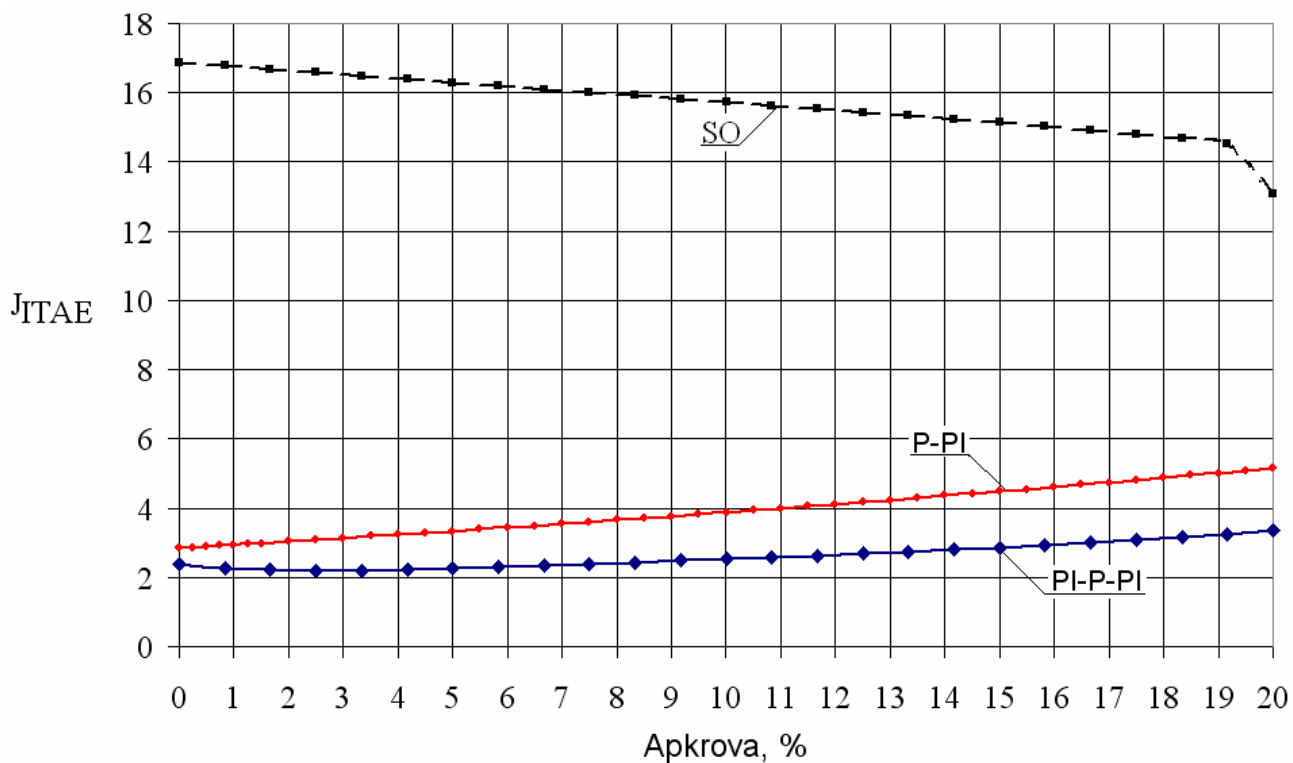
čia  $J_{ITAE_{KSR(PI-P-PI)}}$  – elektromechaninės vykdymo sistemos su PI-P-PI kintamos struktūros regulatoriumi ITAE integralinis rodiklis;

Skaičiavimo rezultatai pateikiami 4.1 lentelėje:

4.1 lentelė

**Elektromechaninės vykdymo sistemos dinamikos kokybės palyginimas**

Apkrova %	JITAE SO (PI)	JITAE KSR (PI-P-PI)	JITAE KSR (P-PI)	$\Delta 1$ %	$\Delta 2$ %
0	16,88	2,38	2,84	-83,15	-2,76
2,5	16,59	2,20	3,08	-81,41	-5,33
5	16,30	2,27	3,34	-79,53	-6,52
7,5	16,01	2,40	3,60	-77,51	-7,51
10	15,72	2,52	3,88	-75,32	-8,65
12,5	15,44	2,68	4,17	-72,96	-9,67
15	15,14	2,87	4,48	-70,39	-10,67
17,5	14,81	3,08	4,81	-67,56	-11,62
20	13,10	3,36	5,15	-60,70	-13,67



4.1 pav. Elektromechaninės vykdymo sistemos su pastovios ir kintamos struktūros reguliatoriais dinamikos kokybės kitimas

Elektromechaninės vykdymo sistemos su pastovios ir kintamos struktūros reguliatoriais ITAE rodiklio priklausomybės nuo apkrovos rodo, kad naudojant P-PI kintamos struktūros reguliatorių gaunamas elektromechaninės vykdymo sistemos dinamikos kokybės pagerėjimas atžvilgiu sistemos su pastovios struktūros reguliatoriumi yra nuo 60,7 iki 83,15 %. Tačiau atžvilgiu sistemos su PI-P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi gaunamas kokybės pablogėjimas yra nuo 2,76 iki 13,67 %.

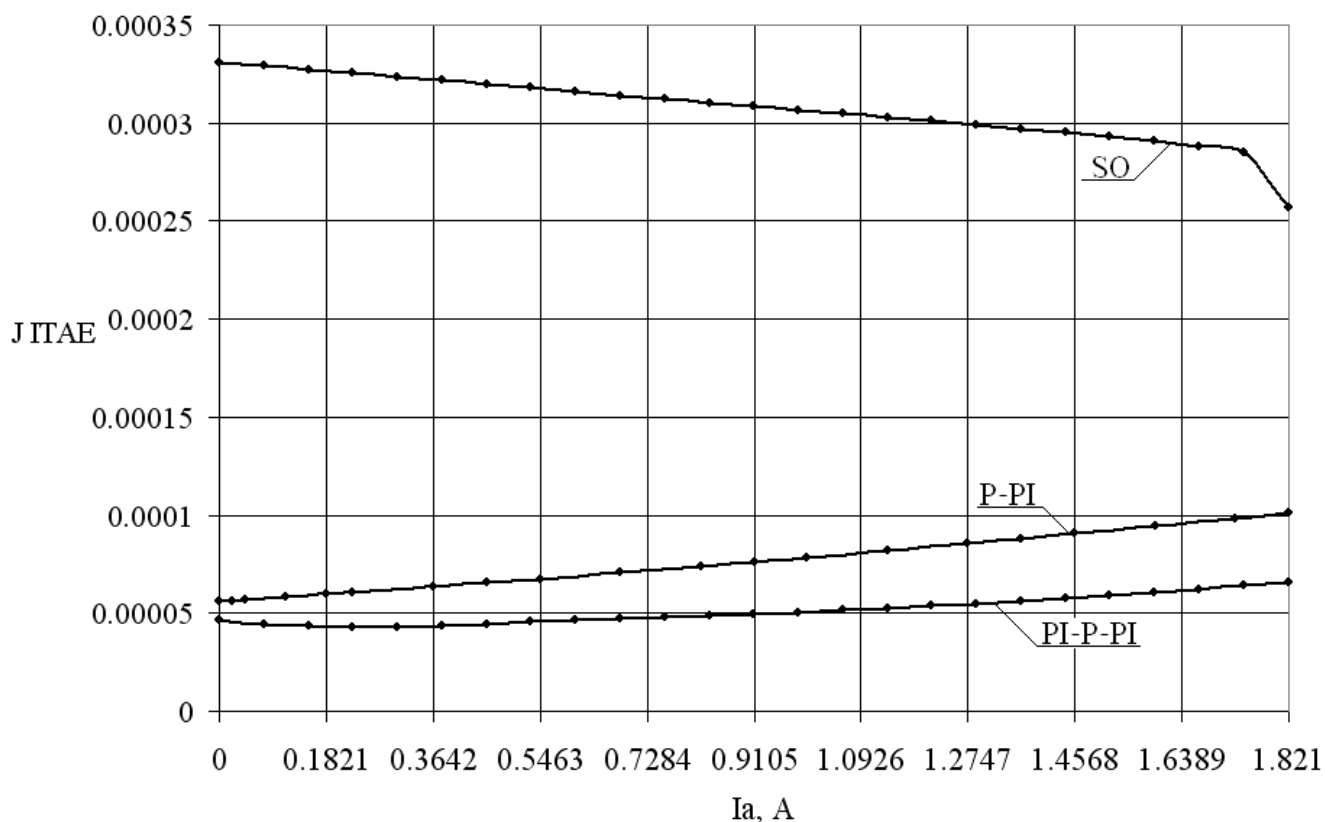
#### **4.2 Nuolatinės srovės elektros pavaros su pastovios ir kintamos struktūros reguliatoriais dinamikos kokybės palyginimas**

Turėdami nuolatinės srovės elektros pavaros (parametrai aprašyti 3.1 poskyryje) su pastovios struktūros reguliatoriumi (SO) ir (P-PI), (PI-P-PI) [3] kintamos struktūros reguliatoriais dinamikos kokybės (ITAE rodiklio) kitimo duomenis 4.2 pav., galime juos tarpusavyje palyginti. Palyginama yra sistemos su pastovios struktūros reguliatoriaus (SO) integraliniu dinamikos kokybės rodikliu ITAE. Palyginimas atliekamas pagal (4.1) (4.2) formules. Skaičiavimo duomenys pateikiami 4.2 lentelėje.

4.2 lentelė

#### **Nuolatinės srovės elektros pavaros dinamikos kokybės palyginimas**

<b>Apkrova I, A</b>	<b>JITAE SO (PI)</b>	<b>JITAE KSR (PI-P-PI)</b>	<b>JITAE KSR (P-PI)</b>	<b><math>\Delta 1</math> %</b>	<b><math>\Delta 2</math> %</b>
<b>0.00</b>	<b>0.00033115</b>	<b>0.00004664</b>	<b>0.0000558</b>	<b>-83.15</b>	<b>-2.77</b>
<b>0.23</b>	<b>0.00032544</b>	<b>0.00004314</b>	<b>0.0000605</b>	<b>-81.40</b>	<b>-5.35</b>
<b>0.46</b>	<b>0.00031977</b>	<b>0.00004461</b>	<b>0.0000655</b>	<b>-79.52</b>	<b>-6.53</b>
<b>0.68</b>	<b>0.00031414</b>	<b>0.00004707</b>	<b>0.0000707</b>	<b>-77.49</b>	<b>-7.52</b>
<b>0.91</b>	<b>0.00030851</b>	<b>0.00004942</b>	<b>0.0000762</b>	<b>-75.30</b>	<b>-8.68</b>
<b>1.14</b>	<b>0.00030288</b>	<b>0.00005263</b>	<b>0.0000819</b>	<b>-72.95</b>	<b>-9.67</b>
<b>1.37</b>	<b>0.00029705</b>	<b>0.00005626</b>	<b>0.0000880</b>	<b>-70.38</b>	<b>-10.69</b>
<b>1.59</b>	<b>0.00029067</b>	<b>0.00006052</b>	<b>0.0000943</b>	<b>-67.54</b>	<b>-11.64</b>
<b>1.82</b>	<b>0.00025697</b>	<b>0.00006587</b>	<b>0.0001011</b>	<b>-60.66</b>	<b>-13.71</b>



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

Elektromechaninės vykdymo sistemos su pastovios ir kintamos struktūros reguliatoriais ITAE rodiklio priklausomybės nuo apkrovos rodo, kad naudojant P-PI kintamos struktūros reguliatorių gaunamas elektromechaninės vykdymo sistemos dinamikos kokybės pagerėjimas atžvilgiu sistemos su pastovios struktūros reguliatoriumi yra nuo 60,66 iki 83,15 %. Tačiau atžvilgiu sistemos su PI-P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi gaunamas kokybės pablogėjimas yra nuo 2,77 iki 13,71 %. Gaunami procentai yra analogiški kaip ir apibendrintos sistemos.

## IŠVADOS

1. Proporcinio (P) – proporcinio integruojančio (PI) valdymo dėsnio kintamos struktūros reguliatorius suderina simetrinio ir kiekybinio optimumų privalumus bei pašalina jų trūkumus, užtikrindamas elektromechaninės vykdyto sistemos greičio dinaminį nuokrypį neviršijantį  $\pm 5\%$  ir nulinį greičio statinį nuokrypį.
2. Remiantis ITAE integraliniu kokybės rodikliu nustatyta geriausią elektromechaninės vykdyto sistemos dinamikos kokybę užtikrinanti greičio reguliatoriaus valdymo dėsnio perjungimo parametro priklausomybė nuo statinės apkrovos. Nustatyta, kad didėjant statinei apkrovai P valdymo dėsnio trukmė turi mažėti.
3. Atlikti nuolatinės srovės elektros pavaros su kintamos struktūros greičio reguliatoriumi veikimo imitacijos tyrimai MATLAB/Simulink aplinkoje patvirtina P-PI kintamos struktūros reguliatoriaus tinkamumą kartu užtikrinant sistemos pereinamojo proceso greitaveiką ir nusistovėjusiojo režimo tikslumą.
4. P-PI kintamos struktūros reguliatorius užtikrina nuo 60,7 % iki 83,15 % geresnę elektromechaninės vykdyto sistemos dinamikos kokybę nei pastovios struktūros simetrinio optimumo reguliatorius (PI). Tačiau naudojant P-PI kintamos struktūros reguliatorių gaunama nuo 2,76 % iki 13,67 % blogesnė sistemos dinamikos kokybė nei PI-P-PI kintamos struktūros reguliatoriaus atveju.

**LITERATŪRA**

1. V. Geleževičius, K. Kriščiūnas, V. Kubilius. Elektros pavarų valdymo sistemos. – Vilnius: Mokslas, 1990. – 360 p.
2. В. И. Ключев. Теория электропривода. 2-е издание. Москва: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.
3. N. Šulčius. Mechatroninių vykdomo sistemų valdymas kintamos struktūros reguliatoriais. Daktaro disertacija. Kauno technologijos universitetas, Kaunas, 2008, p. 98.
4. C. Kessler. Über die Vorausberechnung optimal abgestimmter Regelkreise. Teil III: Die optimale Einstellung des Reglers nach dem Betragsoptimum. Regelungstechnik, vol. 3, no. 2, 1955, p. 40-49.
5. C. Kessler. Das symmetrische optimum. Teil 1, 2. Regelungstechnik, vol. 6, 1958, no. 11, p. 395-400, no. 12, p. 432-436.
6. V. A. Geleževičius. Dvikoordinatės vykdomo sistemos. Habilitacinis darbas. Kaunas, Technologija, 1997, p. 86.
7. N. Šulčius, V. A. Geleževičius. Kintamos struktūros reguliatorių taikymas elektros pavarų greitaveikai didinti // Tarpt. konf. Automatika ir valdymo technologijos 2004 pranešimų medžiaga. – Kaunas: Technologija, 2004. – P. 114-118.
8. N. Šulčius, V. A. Geleževičius. Elektromechaninių vykdomo sistemų su kintamos struktūros reguliatoriais dinamikos kokybės tyrimas // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2005. – Nr.7 (63). – P. 40-43.
9. N. Šulčius, V. A. Geleževičius. Investigation of Dynamical Quality of Mechatronic Drive with Variable Structure Velocity Controller // Acta Technica Napocensis, Series: Applied Mathematics and Mechanics, 2006, 49, Vol.III, P.543-548.
10. N. Šulčius, V. A. Geleževičius. Implementation of the Control Algorithm of the Variable Structure Controller in the Electromechanical Servo System // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2006. – No. 7(71). – P. 51-54.
11. N. Šulčius, V. A. Geleževičius. Investigation of Velocity Control System with Programmable Variable Structure Controller // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2007. – No. 5(77). – P. 53-56.

12. V. A. Geleževičius, N. Šulčius. Dynamical Quality Improvement of Mechatronic Servo System Using Variable Structure Velocity Controller // Information Technology and Control. – Kaunas: Technologija, 2009, Vol. 38, No. 1. – P. 38-42.
13. Algis Ivanauskas. Automatinio valdymo teoriniai pagrindai. Kaunas, Technologija, 2005, 484 p.
14. Vytis Svajūnas Januševičius. Automatinis valdymas: teorija, uždaviniai, sprendimai. Kaunas, Technologija, 2003, 556 p.
15. Palm W.J. Modeling, analysis, and control of dynamic systems. 2nd ed. – New York: John Wiley & Sons, 2000. – 854 p.