

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS  
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS  
ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA

Giedrius Malinauskas

ELEKTROMECHANINĖS GREIČIO STABILIZAVIMO SISTEMOS  
SU KEIČIAMOS STRUKTŪROS REGULIATORIUMI TYRIMAS

Magistro darbas

**Vadovas**

doc. dr. N. Šulčius

ŠIAULIAI, 2011

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS  
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS  
ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA

**TVIRTINU**

Katedros vedėjas

lekt. dr. G. Valiulis

2011 06

**ELEKTROMECHANINĖS GREIČIO STABILIZAVIMO SISTEMOS  
SU KEIČIAMOS STRUKTŪROS REGULIATORIUMI TYRIMAS**

Magistro darbas

**Vadovas**

doc. dr. N. Šulčius

2011 06

**Recenzentas**

lekt. dr. A. Grigaitis

2011 06

**Atliko**

EM-9 gr. stud.

G. Malinauskas

2011 05 31

ŠIAULIAI, 2011

## SUMMARY

Malinauskas G. Investigation of Electromechanical Speed Stabilization System with Variable Structure Controller: Master thesis of energetic engineer/research advisor Assoc. Prof. Dr. N.Šulčius; Šiauliai University, Technological Faculty, Electrical Engineering Department. – Šiauliai, 2011. – 57 p.

Currently in the majority of automatic control systems are the devices that improve the qualitative characteristics of these systems. These devices – controllers. Controllers form the object's control law, so using controllers is possible quality parameters of the original control system to place closer to the desired characteristics of the system.

The aim of this work is the investigation of the dynamical quality improvement method of the electromechanical velocity stabilization system based on the variable structure velocity controller.

The MATLAB/SIMULINK model of the electromechanical speed stabilization system with variable structure controller has been created. According to the quality indicator – settling time, it has been determined the control law switching parameter dependence on the static load and the command input ensuring the best dynamical quality of the electromechanical speed stabilization system. The Luenberger observer has been applied for the static load estimation during the transient regime of the electromechanical speed stabilization system. The obtained results are universal and have been successfully applied for the DC electric drive model simulaiting the automatic control law change from the proportional (P) to the proportional integral (PI) using Lookup Table.

## SANTRAUKA

G.Malinauskas. Elektromechaninės greičio stabilizavimo sistemos su keičiamos struktūros reguliatoriumi tyrimas: Energetikos inžinerijos magistro darbas/mokslinis vadovas doc. dr. N.Šulčius; Šiaulių universitetas, Technologijos fakultetas, Elektros inžinerijos katedra. – Šiauliai, 2011. – 57p.

Šiuo metu daugumoje automatinio valdymo sistemų struktūrų yra įtaisų kurie pagerina šių sistemų kokybines charakteristikas. Šie įtaisai yra vadinami reguliatoriais. Regulatoriai formuoja objekto valdymo dėsnį, todėl panaudojant reguliatorius galima originalios sistemos valdymo kokybinius parametrus nustatyti tikslumu priartinti prie norimos sistemos charakteristikų.

Šio darbo tikslas ištirti elektromechaninės greičio stabilizavimo sistemos dinamikos kokybės pagerinimo metodą pagrįstą keičiamos struktūros greičio reguliatoriumi.

Šiame darbe buvo sudarytas elektromechaninės greičio stabilizavimo sistemos su keičiamos struktūros reguliatoriumi imitacinis modelis MATLAB/SIMULINK programa. Pagal tiesioginį kokybės rodiklį – reguliavimo trukmę, buvo nustatyta geriausioji greičio reguliatoriaus valdymo dėsnio perjungimo momento priklausomybė nuo greičio nustatymo signalo bei statinės apkrovos, tuo užtikrinant geriausią elektromechaninės greičio stabilizavimo sistemos dinamikos kokybę.

Tiriamos sistemos statinės apkrovos nustatymui pereinamajame režime pritaikytas Luenbergerio stebiklis. Gauti rezultatai yra universalūs ir buvo sėkmingai pritaikyti nuolatinės srovės elektros pavarai, panaudojant programuojamą duomenų lentelę *Lookup Table*, imituojant automatinį reguliatoriaus valdymo dėsnio keitimą iš proporcinio (P) į proporcinį integruojantį (PI).

## TURINYS

LENTELĖS .....	5
PAVEIKSLAI.....	6
IŽANGA.....	8
1. ELEKTROMECHANINĖS VALDYMO SISTEMOS SU KEIČIAMOS STRUKTŪROS REGULIATORIAIS .....	9
1.1. Elektromechaninė sistema su PI-P-PI greičio reguliatoriumi.....	9
1.2. Elektromechaninė sistema su P-PI greičio reguliatoriumi .....	14
1.3. Elektromechaninių sistemų sintezė naudojant simpleksinės paieškos metodus.....	22
2. ELEKTROMECHANINĖS SISTEMOS SU KEIČIAMOS STRUKTŪROS REGULIATORIUMI MODELIO SUDARYMAS .....	25
2.1. Elektromechaninių vykdymo sistemų dinamikos optimizavimas taikant kiekybinio ir simetrinio optimumų metodus .....	25
2.2. Elektromechaninės vykdymo sistemos hierarchinio valdymo struktūra.....	27
2.2.1. Srovės reguliavimo kontūro optimizavimas taikant kiekybinio optimumo kriterijų .....	29
2.2.2. Greičio reguliavimo kontūro optimizavimas taikant kiekybinio optimumo kriterijų .....	30
2.2.3. Greičio reguliavimo kontūro optimizavimas taikant simetrinio optimumo kriterijų .....	32
2.3. Elektromechaninė sistema su keičiamos struktūros reguliatoriumi.....	33
3. GERIAUSIŲ REGULIATORIAUS PERJUNGIMO PARAMETRO VERČIŲ NUSTATYMAS .....	36
3.1. Perjungimo parametro verčių nustatymo metodika .....	36
3.2. Tyrimo rezultatai.....	37
4. KEIČIAMOS STRUKTŪROS GREIČIO REGULIATORIAUS REALIZAVIMAS .....	46
4.1. Nuolatinės srovės elektros pavaros parametrų apskaičiavimas .....	46
4.2. Elektromechaninės realizuotos sistemos su keičiamos struktūros reguliatoriumi ir Luenbergerio stebikliu modelio sudarymas.....	49
4.3. Elektromechaninės sistemos modeliavimo rezultatai .....	53
IŠVADOS.....	55
LITERATŪRA .....	56

## LENTELĖS

3.1 lentelė. Reguliavimo trukmės priklausomybė nuo perjungimo laiko kai $X_{in}=0,7$ . Apkrova 10%.	37
3.2 lentelė. Reguliavimo trukmės priklausomybė nuo perjungimo laiko kai $X_{in}=2$ . Apkrova 5%	39
3.3 lentelė. Reguliavimo trukmės priklausomybė nuo perjungimo laiko kai $X_{in}=6$ . Apkrova 20%	40
3.4 lentelė. Reguliavimo trukmės priklausomybė nuo perjungimo laiko kai $X_{in}=10$ . Apkrova 15%.	42
3.5 lentelė. Visi tyrimo rezultatai	43
4.1 lentelė. Nuolatinės srovės elektros variklio parametrai	46
4.2 lentelė. Perskaičiuotos perjungimo laiko vertės	46

## PAVEIKSLAI

1.1 pav. Greičio reguliavimo kontūro su keičiamos struktūros reguliatoriumi, struktūrinė schema ..	9
1.2 pav. Greičio reguliavimo kontūro su keičiamos struktūros reguliatoriumi, funkcinė schema ...	11
1.3 pav. Paleidimo tuščiaja veika ir reakcijos į šuolinį apkrovos momento pokytį dinaminės charakteristikos .....	12
1.4 pav. Paleidimo su apkrova ir reakcijos į šuolinį apkrovos momento pokytį dinaminės charakteristikos .....	13
1.5 pav. Greičio reguliavimo kontūro suderinto <i>Fuzzy</i> logika su keičiamos struktūros reguliatoriumi FLVSC blokų diagrama .....	14
1.6 pav. Apibendrintos elektromechaninės vykdymo sistemos modelis MATLAB / Simulink programa .....	15
1.7 pav. Elektromechaninės vykdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi ITAE kokybės rodiklio priklausomybė nuo santykinio perjungimo laiko ir santykinės statinės apkrovos srovės .....	17
1.8 pav. Geriausio santykinio laiko priklausomybė nuo santykinės statinės apkrovos srovės .....	17
1.9 pav. Minimalaus ITAE kokybės rodiklio priklausomybė nuo santykinės statinės apkrovos srovės .....	18
1.10 pav. Elektromechaninės vykdymo sistemos greičio pereinamojo proceso kreivės, kai $I_A = 0.5$ .....	18
1.11 pav. Elektromechaninės vykdymo sistemos greičio pereinamojo proceso kreivės, kai $I_A = 1$ .....	19
1.12 pav. Nuolatinės srovės elektros pavaros modelis, sudarytas MATLAB / Simulink programa .....	20
1.13 pav. Kintamos struktūros automatinio valdymo sistema su nuolatinės srovės riboto pagreičio dvimase mechanine grandimi .....	22
1.14 pav. Neoptimizuotos sistemos pereinamasis procesas .....	23
1.15 pav. Optimizuotos sistemos pereinamasis procesas .....	23
1.16 pav. Sinchroninio generatoriaus AŽR sistemos struktūrinė schema .....	24
1.17 pav. Sinchroninio generatoriaus AŽR sistemos pereinamasis procesas .....	24
1.18 pav. Pereinamasis AVS su kintamais parametrais procesas .....	24
2.1 pav. Automatinio valdymo sistemos reguliavimo kontūro struktūrinė schema .....	25
2.2 pav. Reguliavimo kontūro vienetinės šuolinės reakcijos .....	26
2.3 pav. Nuolatinės srovės elektros pavaros hierarchinio valdymo sistemos struktūrinė schema ...	29
2.4 pav. Srovės reguliavimo kontūro struktūrinė schema .....	29

2.5 pav. Nuolatinės srovės elektros pavaros greičio reguliavimo kontūro struktūrinė schema .....	31
2.6 pav. Nuolatinės srovės elektromechaninės greičio stabilizavimo sistemos su keičiamos struktūros reguliatoriumi struktūrinė schema .....	33
2.7 pav. Elektromechaninės sistemos su keičiamos struktūros reguliatoriumi modelis MATLAB/SIMULINK programa .....	35
3.1 pav. Pereinamoji charakteristika .....	36
3.2 pav. Svorinė funkcija .....	36
3.3 pav. Greičio pereinamojo proceso kreivės, kai nuostato signalas $x_{in}=0,7$ . Statinė apkrova 10% .....	38
3.4 pav. Reguliavimo trukmės priklausomybė nuo perjungimo laiko, kai $x_{in}=0,7$ . Statinė apkrova 10% .....	38
3.5 pav. Reguliavimo trukmės priklausomybė nuo perjungimo laiko, kai $x_{in}=2$ . Statinė apkrova 5% .....	39
3.6 pav. Geriausia greičio pereinamojo proceso kreivė, kai $x_{in}=2$ . Statinė apkrova 5% .....	40
3.7 pav. Reguliavimo trukmės priklausomybė nuo perjungimo laiko, kai $x_{in}=6$ . Statinė apkrova 20% .....	41
3.8 pav. Geriausia greičio pereinamojo proceso kreivė, kai $x_{in}=6$ . Statinė apkrova 20% .....	41
3.9 pav. Reguliavimo trukmės priklausomybė nuo perjungimo laiko, kai $x_{in}=10$ . Statinė apkrova 15% .....	42
3.10 pav. Geriausia greičio pereinamojo proceso kreivė, kai $x_{in}=10$ . Statinė apkrova 15% .....	43
3.11 pav. Geriausio perjungimo laiko priklausomybė nuo nuostato signalo ir apkrovos .....	45
4.1 pav. Perskaičiuota geriausio perjungimo laiko priklausomybė nuo nuostato signalo ir apkrovos .....	47
4.2 pav. Nuolatinės srovės realizuotos elektromechaninės greičio stabilizavimo sistemos su keičiamos struktūros reguliatoriumi ir Luenbergerio stebikliu struktūrinė schema .....	49
4.3 pav. Statinės apkrovos srovės kreivė gaunama Luenbergerio stebikliu .....	51
4.4 pav. Elektromechaninės realizuotos sistemos su keičiamos struktūros reguliatoriumi ir Luenbergerio stebikliu modelis MATLAB/SIMULINK programa .....	52
4.5 pav. Greičio pereinamojo proceso kreivės, kai $U_{in}=3V$ . Statinė apkrova 2A. ....	53
4.6 pav. Greičio pereinamojo proceso kreivės, kai $U_{in}=5V$ . Statinė apkrova 4A. ....	53
4.7 pav. Greičio pereinamojo proceso kreivės, kai $U_{in}=7V$ . Statinė apkrova 6A. ....	54
4.8 pav. Greičio pereinamojo proceso kreivės, kai $U_{in}=9V$ . Statinė apkrova 8A. ....	54



## IŽANGA

Šiuo metu daugumoje automatinio valdymo sistemų struktūrų yra įtaisų kurie pagerina šių sistemų kokybines charakteristikas. Šie įtaisai yra vadinami reguliatoriais. Reguliatoriai formuoja objekto valdymo dėsnį, todėl panaudojant reguliatorius galima orginalios sistemos valdymo kokybinius parametrus nustatyti tikslumu priartinti prie norimos sistemos charakteristikų [1].

Automatinio valdymo sistemose dažnai kokybės pagerinimui nepakanka tipinių pastovios struktūros reguliatorių, todėl yra naudojami keičiamos struktūros reguliatoriai, kurių valdymo dėsnis yra automatiškai keičiamas pereinamojo proceso metu. Keičiamos struktūros reguliatorių poreikį elektromechaninėse vykdyimo sistemose nulemia trikdžio – apkrovos daromas neigiamas poveikis elektros variklio sukimosi greičiui. Siekiant išvengti elektromechaninėse sistemose greičio statinio nuokrypio ir išlaikyti optimalią pereinamojo proceso dinamiką būtina naudoti keičiamos struktūros reguliatorius.

**Darbo tikslas** – ištirti elektromechaninės greičio stabilizavimo sistemos dinamikos kokybės pagerinimo metodą pagrįstą keičiamos struktūros greičio reguliatoriumi.

Darbo tikslui pasiekti iškelti **uždaviniai**:

1. Sudaryti hierarchinės elektromechaninės greičio stabilizavimo sistemos su keičiamos struktūros reguliatoriumi imitacinį modelį MATLAB/SIMULINK programa;
2. Pagal pasirinktą kokybės rodiklį nustatyti geriausią elektromechaninės greičio stabilizavimo sistemos dinamikos kokybę užtikrinančią reguliatoriaus perjungimo parametro priklausomybę nuo nuostato signalo vertės ir statinės apkrovos;
3. Elektromechaninės sistemos statinės apkrovos nustatymui pereinamojo proceso metu pritaikyti Luenbergerio stebiklį sudarant jo modelį MATLAB/SIMULINK programa;
4. Imituoti keičiamos struktūros greičio reguliatoriaus realizavimą MATLAB/SIMULINK programa.

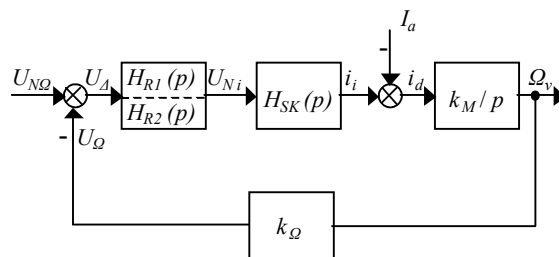
# 1. ELEKTROMECHANINĖS VALDYMO SISTEMOS SU KEIČIAMOS STRUKTŪROS REGULIATORIAIS

## 1.1. Elektromechaninė sistema su PI-P-PI greičio reguliatoriumi

Nagrinėjama [1] nusistovėjusi elektros pavarų greičio reguliavimo sistemų derinimo praktika grindžiama greičio reguliatorių sinteze remiantis kiekybinio arba simetrinio optimumo kriterijais. Tenkinant kiekybinio optimumo principą garantuojama optimali greičio reguliavimo kontūro reakcija į šuolinį valdymo poveikį, tačiau esant statiniam greičio reguliatoriui, atsiranda apkrovos sąlygojamas statinis greičio nuokrypis, kuris neigiamai veikia visą sistemą [2]. [2–4] nustatyta, kad kiekybinis optimumas realizuojamas naudojant proporcinį greičio reguliatorių (P), o simetrinis optimumas pasiekiamas naudojant proporcinį – integruojantį greičio reguliatorių (PI) ir garantuoja nulinę statinės neapibrėžties vertę, tačiau tai iššaukia dinaminės pavaros kokybės pablogėjimą (išauga dinaminiai nuokrypiai, padidėja reguliavimo trukmė).

Todėl norint suderinti kiekybinio ir simetrinio optimumo sąlygų teikiamus privalumus ir eliminuoti jų trūkumus buvo panaudotas kintamos struktūros greičio reguliatorius, įgalinantis tikslingai pereiti iš proporcinio valdymo dėsnio į proporcinį –integruojantį ir atvirkščiai [2, 3, 4].

Ištirtą [2] nuolatinės srovės elektros pavaros greičio reguliavimo sistemą (1.1 pav.) sudaro : srovės (momento) reguliavimo sistemos funkcijas vykdantis srovės reguliavimo kontūras  $H_{SK}(p)$ , greičio reguliatorius galintis keisti savo struktūrą ir formuoti perdavimo funkcijomis  $H_{R1}(p)$  ir  $H_{R2}(p)$  apibrėžtą valdymo dėsnį, variklis, kurio mechaninės dalies perdavimo funkcija:  $k_M/p$  ir greičio grįžtamasis ryšys  $k_Q$ .



1.1 pav. Greičio reguliavimo kontūro su keičiamos struktūros reguliatoriumi, struktūrinė schema [2].

Nustatyta [2], kad srovės reguliavimo kontūras – aperiodinis su perdavimo funkcija:

$$H_{SK}(p) = \frac{k_I}{2T_k p + 1}; \quad (1.1)$$

čia  $k_I$  – srovės kontūro perdavimo koeficientas;  
 $T_k$  – galios keitiklio laiko pastovioji.

Reguliatorių perdavimo funkcijos:

$$H_{R1}(p) = k_{R\Omega}; \quad (1.2) \quad H_{R2}(p) = k_{R\Omega} \left(1 + \frac{1}{8T_k p}\right); \quad (1.3)$$

Greičio regulatoriaus reguliavimo dėsnis keičiamas atsižvelgiant į variklio inkaro srovės dydį [2], ir ištirtas [5] toks greičio regulatoriaus reguliavimo dėsnio keitimo algoritmas: paveikus valdymo signalui  $U_{N\Omega}$ , reguliatorius jungiamas  $PI$  reguliavimo dėsniai, variklis forsuotai greitėja. Greičiui artėjant prie nustatytosios jo reikšmės (apie tai sprendžiama iš variklio inkaro srovės dydžio), siekiant išvengti didelio dinaminio greičio nuokrypio, regulatoriaus integruojantis valdymo kanalas išjungiamas (integratorius iškraunamas) ir jis tampa  $P$  reguliatoriumi. Pereinamajam procesui baigiantis (apie tai liudija sumažėjusi variklio inkaro grandinės srovė), vėl įjungiamas integruojantis valdymo kanalas, reguliatorius vėl tampa  $PI$  reguliatoriumi, eliminuojančiu statinį greičio reguliavimo nuokrypį. Taigi [2] aprašoma tokia regulatoriaus dėsnio kitimo seka:  $PI$ - $P$ - $PI$ . Pereinamiesiems procesams skaičiuoti sudarytos operatorinių lygčių sistemos dviem greičio regulatoriaus reguliavimo dėsniais [2]:

1) Kai naudojamas  $P$  greičio reguliatorius:

$$\begin{cases} U_{N\Omega}(p) - U_{\Omega}(p) = U_{\Delta}(p), \\ U_{Ni}(p) = k_{R\Omega} U_{\Delta}(p), \\ i_i(p)(2T_k p + 1) = U_{Ni}(p)k_I + 2T_k i_i(0), \\ i_d(p) = i_i(p) - I_a(p), \\ \Omega_v(p)p = i_d(p)k_M + \Omega_v(0), \\ U_{\Omega}(p) = \Omega_v(p)k_{\Omega}; \end{cases} \quad (1.4)$$

2) Kai naudojamas  $PI$  greičio reguliatorius:

$$\begin{cases} U_{N\Omega}(p) - U_{\Omega}(p) = U_{\Delta}(p), \\ U_{Ni}(p)8T_k p = 8T_k k_{R\Omega} p U_{\Delta}(p) + k_{R\Omega} U_{\Delta}(p) + \\ + 8T_k U_{Ni}(0) - 8T_k k_{R\Omega} U_{\Delta}(0), \\ i_i(p)(2T_k p + 1) = U_{Ni}(p)k_I + 2T_k i_i(0), \\ i_d(p) = i_i(p) - I_a(p), \\ \Omega_v(p)p = i_d(p)k_M + \Omega_v(0), \\ U_{\Omega}(p) = \Omega_v(p)k_{\Omega}; \end{cases} \quad (1.5)$$

Šiose lygtyse figūruoja sistemos būsenos koordinačių pradinės reikšmės  $U_{Ni}(0)$ ,  $U_{\Delta}(0)$ ,  $i_i(0)$ ,  $\Omega_v(0)$  susiejančios vieno valdymo intervalo pradinės būsenų koordinačių reikšmės su ankstesnio valdymo intervalo galinėmis būsenų koordinačių reikšmėmis. Išsprendus (1.4) ir (1.5) lygčių sistemas dominančių būsenos koordinačių atžvilgiu ir pritaikius gautiesiems sprendiniams atvirkštinę Laplaso transformaciją, galima gauti stebimųjų koordinačių išraiškas kaip laiko funkcijas. Nagrinėjamu atveju buvo modeliuojama pasitelkus “Centaurus” programų paketą [2].

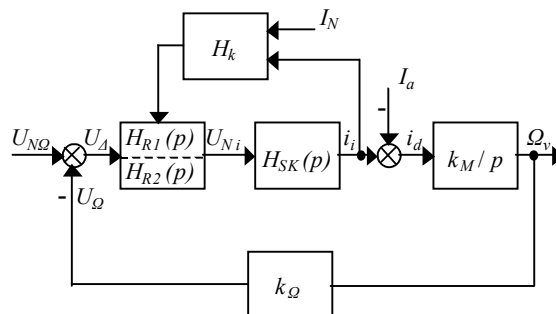
Funkcinė greičio reguliavimo sistemos su automatiškai perjungiamu regulatoriaus struktūra schema pavaizduota 1.2 pav. Regulatoriaus struktūrai keisti sudarytas valdymo kanalas  $H_k$ , formuojantis komutavimo funkciją ir valdomas signalu, proporcingu variklio inkaro grandinės srovei. Komutavimo funkcija realizuojama pagal sąlygą:

$$F_k = \begin{cases} 1 \forall \Delta = \dot{i}_i(t) - I_N \geq 0; \\ 0 \forall \Delta = \dot{i}_i(t) - I_N < 0. \end{cases} \quad (1.6)$$

čia  $I_N$  – derinimo parametras (perjungimo srovės dydis).

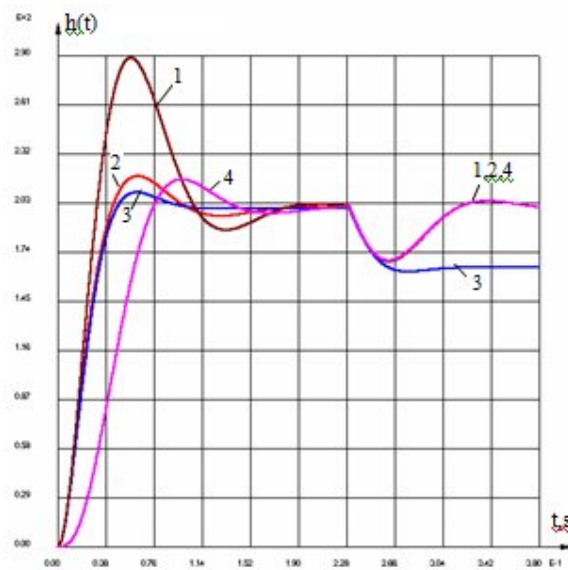
Keičiant  $I_N$  dydį, keičiamas antrosios zonos, kai veikia  $P$  regulatorius, plotis.

Elektros pavaros greičio reguliavimo kontūro dinaminės (pereinamosios) charakteristikos, gautos modeliuojant sistemą, pateiktos 1.3, 1.4 pav.



1.2 pav. Greičio reguliavimo kontūro su keičiamos struktūros regulatoriumi, funkcinė schema [2].

Juose: 1 – greičio reguliavimo kontūro su  $PI$  greičio reguliatoriumi, suderintu simetriniam optimumui, dinaminė (pereinamoji) charakteristika; 2 – kontūro su kintama reguliatoriaus struktūra dinaminė charakteristika; 3 – kontūro su  $P$  greičio reguliatoriumi, suderintu kiekybiniam optimumui, dinaminė charakteristika; 4 – kontūro su  $PI$  greičio reguliatoriumi ir švytavimus slopinančiu filtru įėjime dinaminė charakteristika.

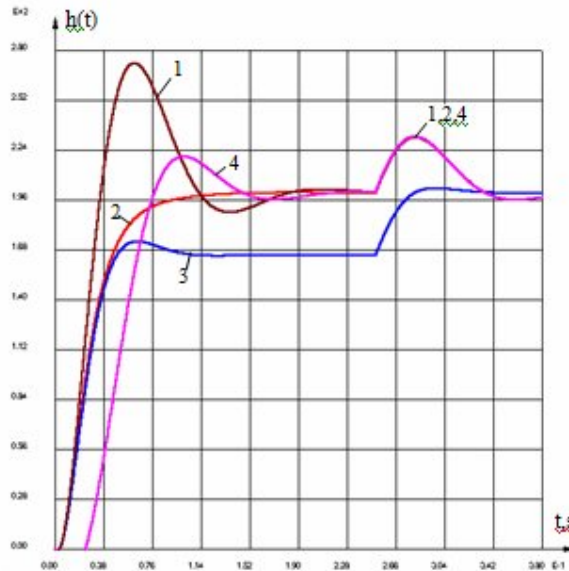


1.3 pav. Paleidimo tuščiaja veika ir reakcijos į šuolinį apkrovos momento pokytį dinaminės charakteristikos [2].

Kaip matyti iš 1.3 pav., elektros pavaros su kintama reguliatoriaus struktūra, greičio dinaminė nuokrypa paleidimo tuščiaja veika metu šiek tiek didesnė nei pavaros, suderintos pagal kiekybinio optimumo sąlygą ir žymiai mažesnė nei pavaros suderintos pagal simetrinio optimumo sąlygą. Pavaros su kintama reguliatoriaus struktūra reguliavimo laikas pastebimai trumpesnis nei reguliavimo kontūro su  $PI$  greičio reguliatoriumi ir švytavimus slopinančiu filtru įėjime. Reakcijos į šuolinį apkrovos momento pokytį požiūriu, pavara su kintama reguliatoriaus struktūra yra ekvivalentiška simetriniam optimumui suderintai greičio reguliavimo sistemai: nusistovėjusi statinė paklaida yra lygi nuliui [2].

Iš 1.4 pav. pateiktų modeliavimo kreivių matoma, kad paleidžiant apkrautą elektros pavarą su kintama reguliatoriaus struktūra, išvengiama greičio dinaminio nuokrypio, būdingo pavarai suderintai pagal simetrinį optimumą. Pavaros su kintama reguliatoriaus struktūra reguliavimo laikas ir šiuo atveju gerokai trumpesnis nei pavaros suderintos pagal simetrinio optimumo sąlygą bei pavaros su  $PI$  greičio reguliatoriumi ir švytavimus slopinančiu filtru įėjime. Akivaizdžiai matyti

pavaros suderintos pagal kiekybinio optimumo sąlygą pagrindinis trūkumas: veikiant apkrovai gaunama statinė greičio paklaida. Naudojant kintamos struktūros reguliatorių eliminuojamas ir šis trūkumas [2].



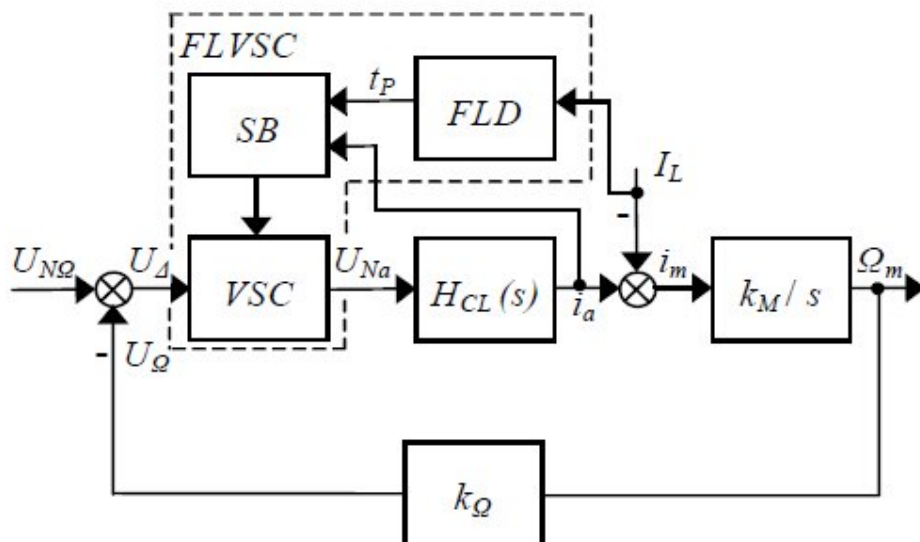
1.4 pav. Paleidimo su apkrova ir reakcijos į šuolinį apkrovos momento pokytį dinaminės charakteristikos [2].

Taigi 1.3 ir 1.4 pav. pavaizduotos dinaminės charakteristikos patvirtina, kad naudojant kintamos struktūros reguliatorių suderinami du priešaringi reikalavimai-optimali įsibėgėjimo sparta, būdinga kiekybiniam optimumui suderintai pavarai, su nuline statine greičio neapibrėžtimi, būdinga simetriniam optimumui suderintai pavarai [3]. Visi šie kintamos struktūros reguliatorių tyrimai atlikti naudojant apibendrintas elektromechanines vykdymo sistemas, todėl buvo atliktas kintamos struktūros greičio reguliatorių realizavimo elektromechaninėje vykdymo sistemoje tyrimas.

Kintamos struktūros reguliatorių priklausomybei realizuoti gali būti naudojamas miglotosios (fuzzy) logikos įtaisas arba programuojamosios lentelės (Lookup Table) pavidalo įtaisas [6].

PI-P-PI keičiamos struktūros reguliatorius realizavimas buvo ištirtas abiem atvejais. Čia pateikiamas PI-P-PI reguliatoriaus realizavimas panaudojant *Fuzzy* logika pagrįstu valdymo dėsnio perjungimu. *Fuzzy* logikos įtaisas naudojamas proporcinio (P) valdymo dėsnio palaikymo trukmei nustatyti priklausomai nuo elektros pavaros statinės apkrovos dydžio [7, 8]. Naudojant šį tyrimo metodą nuolatinės srovės elektros pavaros greičio reguliavimo sistema sudaryta kaip ir apibendrintos sistemos reguliavimo sistema (naudojant anksčiau paminėtą metodiką). 1.5

paveikslėlyje vaizduojama nuolatinės srovės elektros pavaros greičio reguliavimo sistema, suderinta *Fuzzy* logikos metodu [7, 8].



1.5 pav. Greičio reguliavimo kontūro suderinto *Fuzzy* logika su keičiamos struktūros reguliatoriumi FLVSC bloką diagrama [8].

Pagrindinė FLVSC dalis yra keičiamos struktūros reguliatorius – VSC, kuriame keičiamas valdymo dėsnis iš proporcinio į proporcinį integruojantį valdymo dėsnį ir atvirkščiai. Valdymo dėsnio perjungimą atlieka SB blokas [8]. Perjungimo laiko parinkimas ir visos valdymo operacijos atliekamos kaip ir anksčiau minėtu atveju.

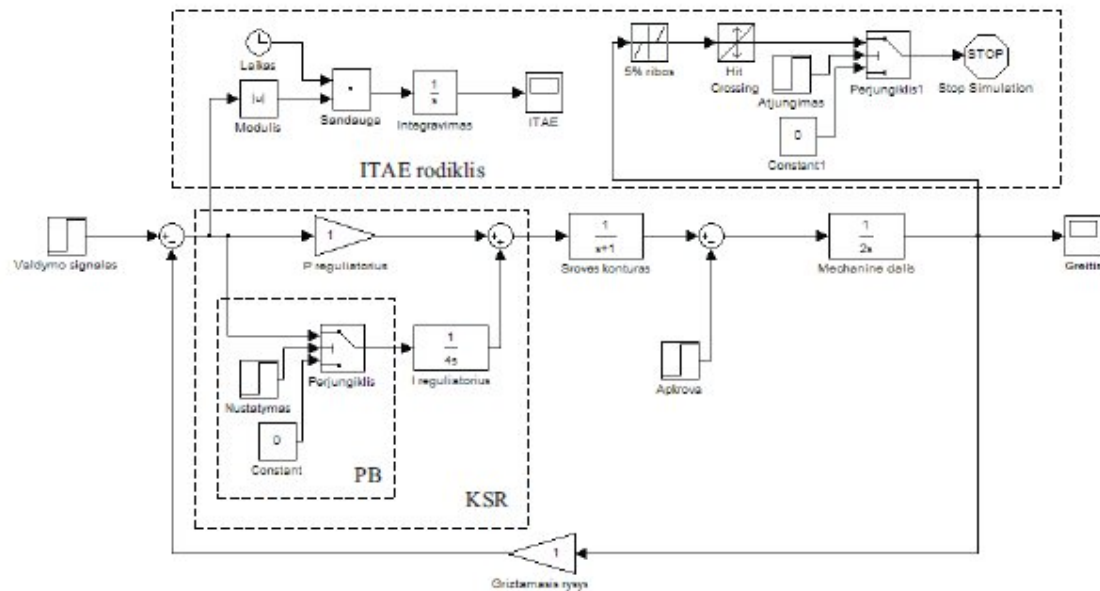
Buvo sukonstruoti bei ištirti dviejų tipų – Mamdani tipo ir Sugeno tipo *Fuzzy* logikos įtaisai [8]. Ištirtas – taikomas *Fuzzy* logika pagrįstas valdymo metodas užtikrina optimalią sistemos dinamikos kokybę (remiantis *ITAE* kokybės kriterijumi) nepriklausomai nuo pavaros statinės apkrovos dydžio. Pateikti elektromechaninės vykdomo sistemos modeliavimo rezultatai patvirtina pasiūlyto valdymo metodo tinkamumą [8].

## 1.2. Elektromechaninė sistema su P-PI greičio reguliatoriumi

Ištirtas [9] PI-P-PI kintamos struktūros greičio reguliatorius, kuriame du kartus keičiamas reguliatoriaus valdymo dėsnis. Tačiau suderinti kiekybinio ir simetrinio optimumų teikiamus privalumus bei pašalinti jų trūkumus galima atliekant tik vieną greičio reguliatoriaus valdymo dėsnio keitimą [10]. Todėl buvo dalinai ištirtas P-PI [11] kintamos struktūros greičio reguliatoriaus tinkamumas simetrinio ir kiekybinio optimumų privalumų suderinimui bei trūkumų pašalinimui.

Siekiant rezultatų universalumo ir pritaikomumo įvairiose sistemose, buvo sudarytas apibendrintas (vienetinių verčių) hierarchinės struktūros elektromechaninės vykdymo sistemos modelis MATLAB / Simulink programa (1.6 pav.) [10].

Apibendrintos elektromechaninės vykdymo sistemos modelį (1.6 pav.) sudaro kintamos struktūros greičio reguliatorius (KSR), formuojantis P valdymo dėsnį (kiekybinį optimumą) ir PI valdymo dėsnį (simetrinį optimumą) [11].



1.6 pav. Apibendrintos elektromechaninės vykdymo sistemos modelis MATLAB / Simulink programa [10].

Nagrinėjamas [10] sistemos veikimas: paveikus vienetiniam šuliniam sistemos valdymo signalui, greičio reguliatorius jungiamas P valdymo dėsniai, suderintam pagal kiekybinį optimumą. Praėjus tam tikram laikui - P valdymo dėsnio trukmei, siekiant išvengti pernelyg didelio greičio dinaminio nuokrypio ir kartu greičio statinio nuokrypio pasibaigus pereinamajam procesui, sudarytuju greičio reguliatoriaus valdymo dėsnio perjungimo bloku (PB) įjungiamas integruojantis kanalas ir greičio reguliatorius tuomet įjungiamas PI valdymo dėsniai, suderintam pagal simetrinį optimumą.

Tyrimas atliktas keičiant greičio reguliatoriaus perjungimo iš P valdymo dėsnio į PI momenta ir stebint ITAE integralinio kokybės rodiklio vertę:

$$J_{ITAE} = \int_0^{t_{reg}} t \cdot |\Delta x(t)| dt; \quad (1.7)$$



čia  $|x_{\Delta}(t)|$  - reguliuojamo parametro nuokrypio modulis;

$t$  - reguliavimo trukmė, tai laikas, per kuri greičio dinaminis nuokrypis pasiekia 5% ribą ir vėliau nebeviršija jos.

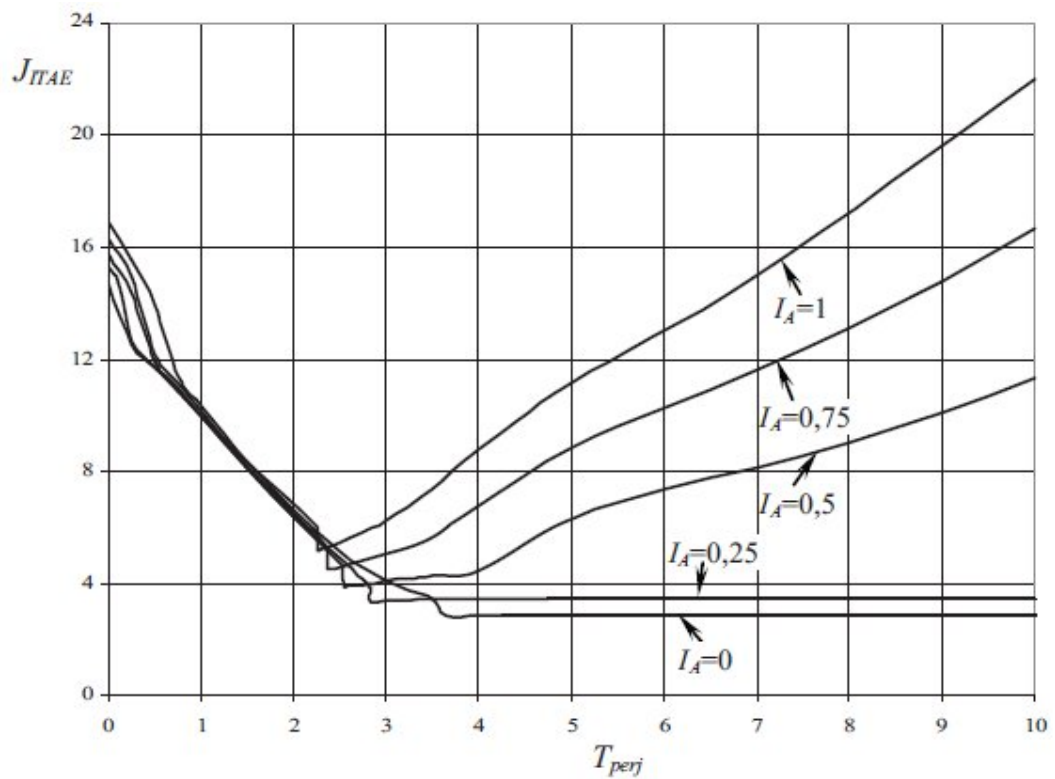
Kuo mažesnė rodiklio vertė, tuo sistemos pereinamasis procesas yra geresnės kokybės. Minimali ITAE rodiklio vertė rodo greičio regulatoriaus perjungimo laiką, laiduojantį geriausią elektromechaninės vykdymo sistemos dinamikos kokybę. Tai matyti 1.7 pav. pateiktose elektromechaninės vykdymo sistemos su P-PI kintamos struktūros regulatoriumi ITAE kokybės rodiklio priklausomybėse nuo santykinio perjungimo laiko (1.8) ir santykinės statinės apkrovos srovės (1.9) [10].

$$T_{perj} = \frac{t_{perj}}{T_{SK}}; \quad (1.8)$$

čia  $t_{perj}$  - greičio regulatoriaus struktūros perjungimo laikas (P valdymo dėsnio trukmė), garantuojantis geriausią konkrečios elektromechaninės vykdymo sistemos dinamikos kokybę.

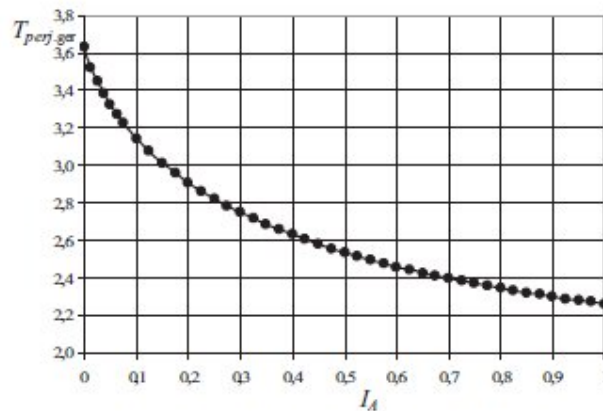
$$I_A = \frac{I_a}{I_{a \max}}; \quad (1.9)$$

čia  $I_{a \max}$  - maksimali statinės apkrovos srovės vertė, sukelianti 20% greičio statinį nuokrypį, kai sistema suderinta pagal kiekybinį optimumą.



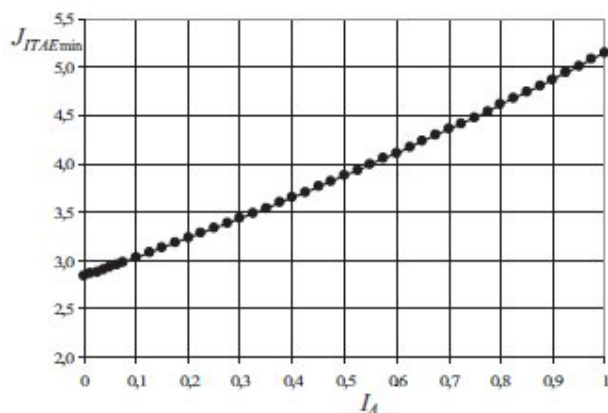
1.7 pav. Elektromechaninės vykdyto sistemos su P-PI kintamos struktūros reguliatoriumi ITAE kokybės rodiklio priklausomybė nuo santykinio perjungimo laiko ir santykinės statinės apkrovos srovės [10].

Buvo nustatyta geriausio santykinio perjungimo laiko, užtikrinančio geriausią elektromechaninės vykdyto sistemos dinamikos kokybę, priklausomybė nuo santykinės statinės apkrovos srovės, kuri yra universali, pritaikoma įvairioms elektromechaninėms vykdyto sistemoms. Pavaizduota 1.8 pav..



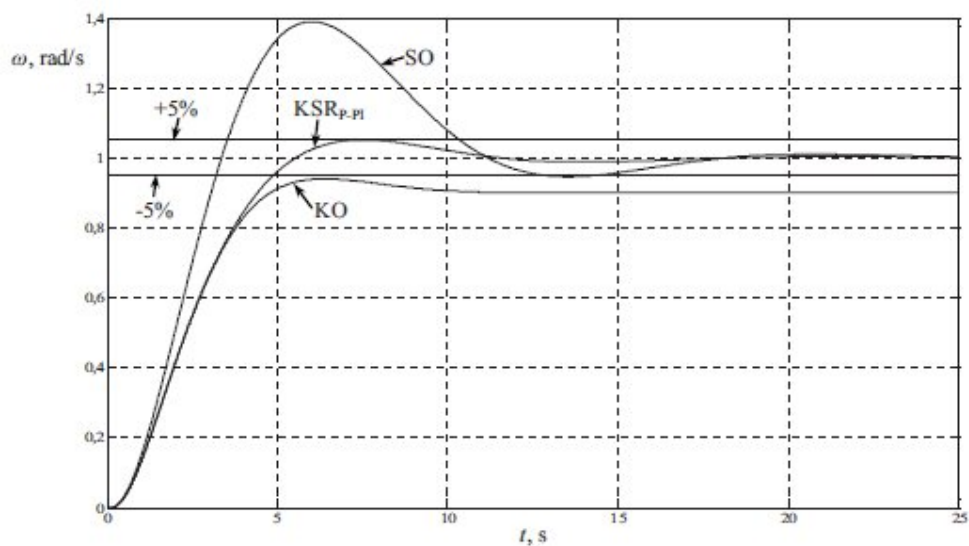
1.8 pav. Geriausio santykinio laiko priklausomybė nuo santykinės statinės apkrovos srovės [10].

Atitinkamai gauta tiesinė ITAE kokybės rodiklio minimalių verčių priklausomybė nuo santykinės statinės apkrovos srovės pateikta 1.9 pav.

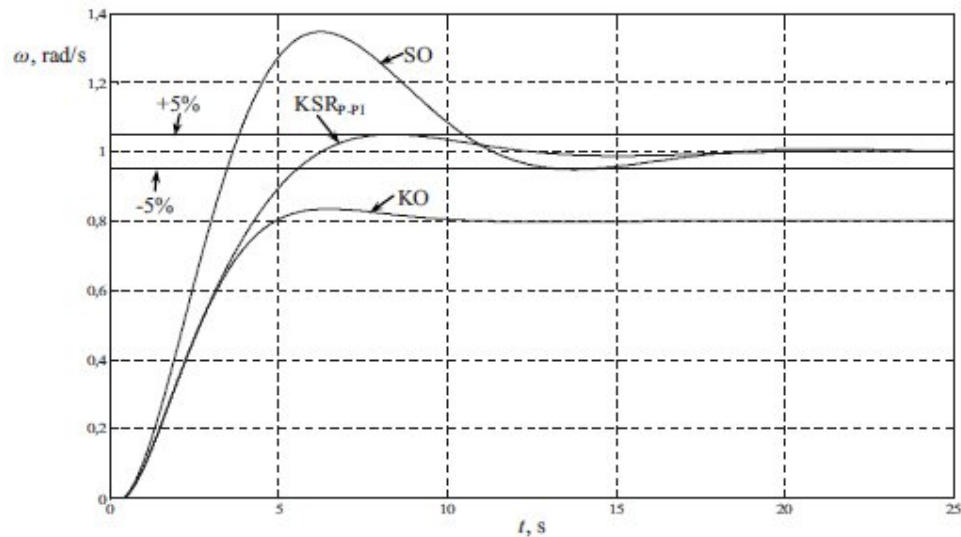


1.9 pav. Minimalaus ITAE kokybės rodiklio priklausomybė nuo santykinės statinės apkrovos srovės [10].

Ištyrus [11] nustatyta, kad naudojant P-PI kintamos struktūros reguliatorių, suderinami simetrinio (SO) ir kiekybinio (KO) optimumų teikiami privalumai ir pašalinami trūkumai. Visame santykinės statinės apkrovos intervale užtikrinamas nedidelis greičio dinaminis nuokrypis, neviršijantis 5%, o tai nebūdinga simetriniam optimumui, ir garantuojamas nulinis greičio statinis nuokrypis, nebūdingas kiekybinio optimumo atveju [10] (1.10, 1.11 pav).



1.10 pav. Elektromechaninės vykdomo sistemos greičio pereinamojo proceso kreivės, kai  $I_A = 0.5$



1.11 pav. Elektromechaninės vykdyimo sistemos greičio pereinamojo proceso kreivės, kai

$$I_A = 1 [11]$$

Kadangi šie gauti P-PI kintamo struktūros regulatoriaus tyrimo rezultatai universalūs, tai jų pritaikomumui realiose sistemose buvo atliktas [6] P-PI kintamos struktūros greičio regulatoriaus geriausios perjungimo laiko priklausomybės nuo statinės apkrovos realizavimas.

Nuolatinės srovės elektros pavaros modeliui sudaryti MATLAB / Simulink programa, pasirenkamas tas pats realių parametrų nuolatinės srovės nepriklausomo žadinimo elektros variklis. Sistema suderinama taip, kad kiekybinio optimumo metu nominali apkrova sukelia 20% statinį greičio nuokrypį [6]. Nuolatinės srovės elektros pavaros modelį (1.12 pav.) sudaro greičio valdymo kontūrai pavaldus srovės valdymo kontūras, aproksimuotas pirmos eilės atstojamąja perdavimo funkcija:



$$H_{GR,SO}(s) = k_p + \frac{k_I}{s}; \quad (1.13)$$

čia  $k_p$  - proporcinio valdymo dėsnio koeficientas;  
 $k_I$  – integruojančio valdymo dėsnio koeficientas.

Nagrinėjamas [6,8] greičio regulatoriaus valdymo dėsnio keitimas iš P į PI, kurį atlieka programuojamasis perjungimo blokas (PPB). Programuojamoji lentelė (Lookup Table) nustato tinkamiausią greičio regulatoriaus valdymo dėsnio keitimo momentą, priklausantį nuo statinės apkrovos lygio, tuo užtikrinant geriausią nagrinėjamos elektromechaninės vykdymo sistemos nuolatinės srovės elektros pavaros dinamikos kokybę. Programuojamojoje lentelėje (Lookup Table) surašomos ankstesniaisiais tyrimais [11] nustatytos geriausios ir nagrinėjamai nuolatinės srovės elektros pavarai pritaikytos greičio regulatoriaus valdymo dėsnio perjungimo laiko vertės:

$$t_{per} = T_{per} \cdot T_{SK}. \quad (1.14)$$

čia  $T_{per}$  – santykinis perjungimo laikas priklausantis nuo apkrovos ir nuostato signalo vertės;  
 $T_{SK}$  – elektromechaninės sistemos srovės kontūro laiko pastovioji.

Gauta priklausomybė pateikta 1.8 pav. [10].

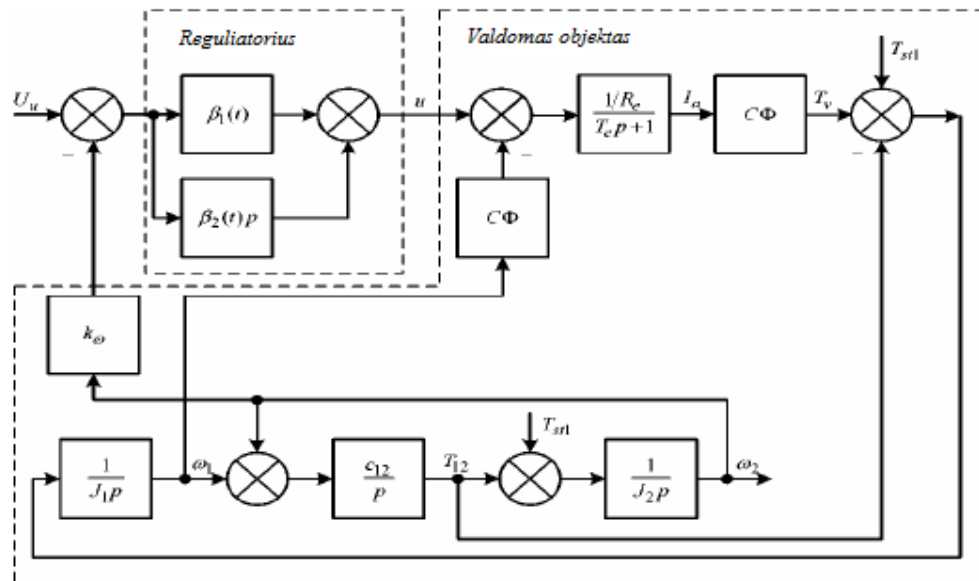
Kai programuojamos lentelės įėjime veikia nenurodytoji statinės apkrovos srovės vertė, tuomet perjungimo laiko vertė gaunama atliekant tiesinę interpoliaciją tarp dviejų artimiausių verčių. Atlikus tyrimą [6] nustatyta, kad P-PI kintamos struktūros greičio regulatorius su programuojama lentele (Lookup Table) užtikrina nedidelį greičio dinaminį nuokrypį, neviršijantį 5%. Tai nebūdinga sistemai, suderintai pagal simetrinį optimumą (SO) ir garantuoja nulinį greičio statinį nuokrypį (tai nebūdinga sistemai, suderintai pagal kiekybinį optimumą (KO)). Taigi, P-PI kintamos struktūros greičio regulatorius, kurio valdymo dėsnio geriausio keitimo momento nustatymas realizuotas programuojama lentele, suderina simetrinio ir kiekybinio optimumų teikiamus privalumus ir pašalina jiems būdingus trūkumus visame statinės apkrovos srovės kitimo intervale [6].

Tačiau [11] darbe nebuvo tirta kokią įtaką greičio regulatoriaus valdymo dėsnio perjungimui turi kitų parametrų kitimas, pvz., greičio nuostato signalo vertė. Taip pat nebuvo aptariama kokiomis priemonėmis bus nustatoma statinės apkrovos vertė pereinamojo proceso metu.

### 1.3. Elektromechaninių sistemų sintezė naudojant simpleksinės paieškos metodus

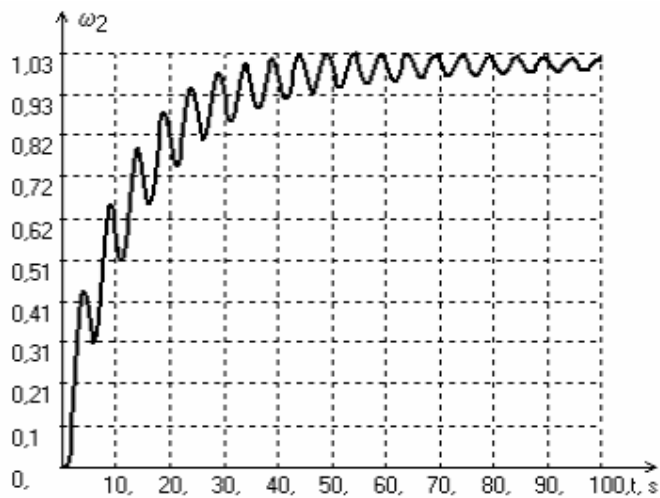
Yra aprašyta [12] kaip sprendžiami įvairūs stochastinių automatinio valdymo sistemų algoritminės sintezės uždaviniai panaudojant kintamos struktūros reguliatorius. Žemiau pateikiami pavyzdžiai realizuotų sistemų, kurių valdymas atliekamas panaudojant sistemų sintezės simpleksinės paieškos metodus.

Nagrinėjamos [13] automatinės valdymo sistemos, turinčios nuolatinės srovės variklius su dvimase mechanine grandimi, sintezės klausimai. Dėl dvimases sistemos tampriojo ryšio antroji masė linkusi labiau švytuoti nei pirmoji. Todėl sistemos su dvimase mechanine grandimi greičio pereimamasis procesas nėra optimalus, o sklandžiam visų pavarų darbui užtikrinti būtina apriboti pagreitį tiek paleidimo, tiek ir stabdymo metu, šiam tikslui įgyvendinti yra panaudojamas kintamos struktūros reguliatorius. Sudaryta automatinio valdymo sistema (1.13 pav.) su kintamos struktūros nuolatinės srovės riboto pagreičio dvimase mechanine grandimi.



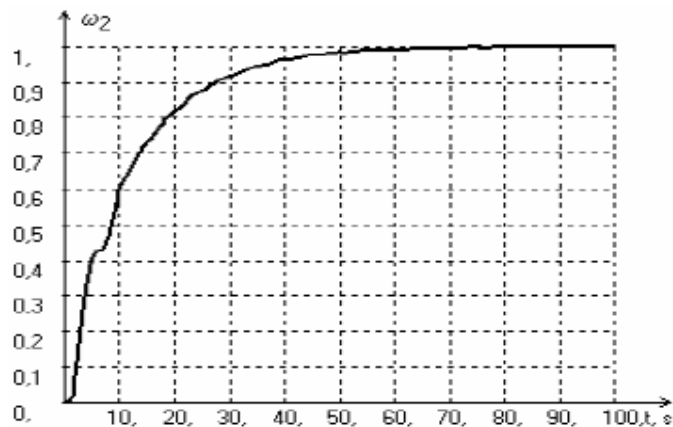
1.13 pav. Kintamos struktūros automatinio valdymo sistema su nuolatinės srovės riboto pagreičio dvimase mechanine grandimi [13]

Sistemai veikiant be kintamos struktūros reguliatoriaus pereinamasis procesas gaunamas labai prastos kokybės, atsiranda nepageidaujami dvimases sistemos švytavimai (1.14 pav.).



1.14 pav. Neoptimizuotos sistemos pereinamasis procesas

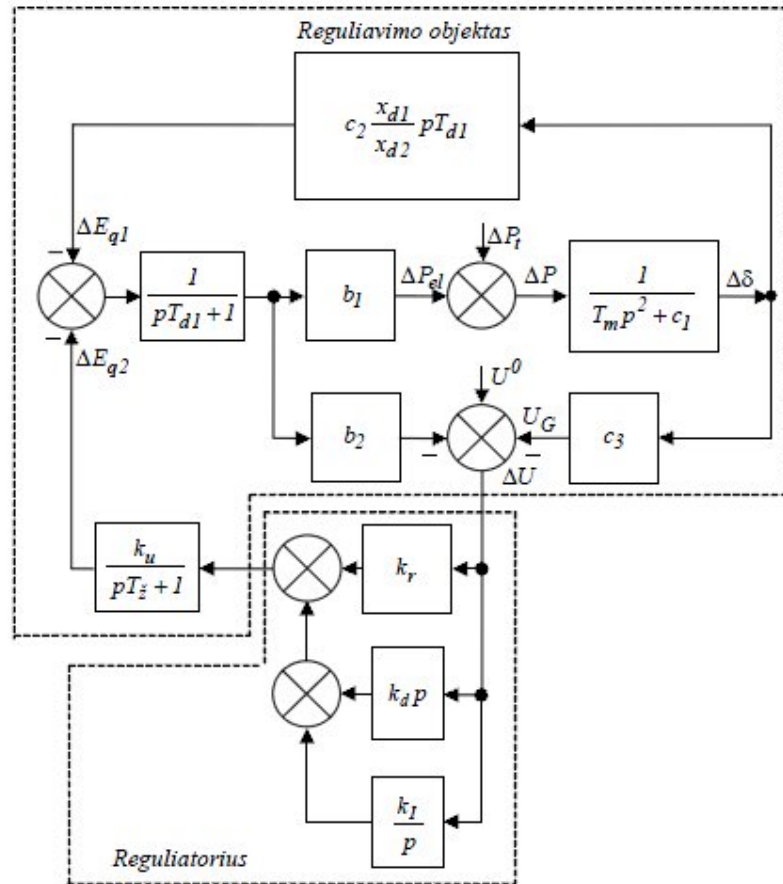
1.15 paveikslėlyje parodyta AVS pereinamojo proceso kokybė panaudojus valdymui kintamos struktūros reguliatorių. Iš kreivės matyti, kad švytavimų sistemoje nelieka, procesas kokybiškas.



1.15 pav. Optimizuotos sistemos pereinamasis procesas [13]

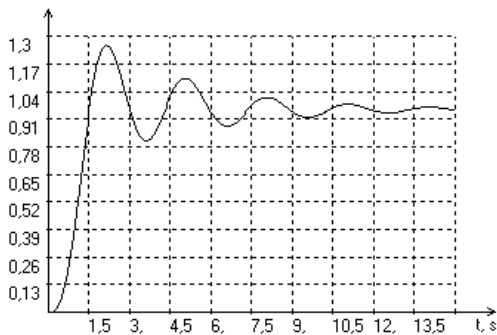
Aprašoma [14] kaip sėkmingai panaudota adaptyvioji stabilizavimo sistema su kintamos struktūros reguliatoriumi, sudarytu iš proporcinės diferencinės ir integruojančios dalių, galingų sinchroninių generatorių žadinimo srovei reguliuoti (1.16 pav.).



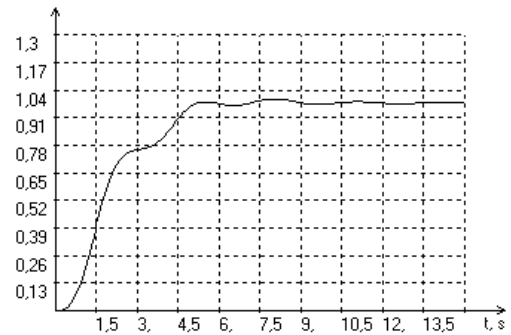


1.16 pav. Synchroninio generatoriaus AŽR sistemos struktūrinė schema [14]

1.17 paveikslėlyje parodyti sistemos pereinamieji procesai stabilizuojant polinkio kampą, o 1.18 paveikslėlis vaizduoja tą patį pereinamąjį procesą tik čia jau panaudotas kintamos struktūros regulatorius. Kaip matyti iš kreivių panaudojant regulatorių pereinamasis procesas yra kokybiškesnis, švytavimų beveik nebelyka.



1.17 pav. Synchroninio generatoriaus AŽR sistemos pereinamasis procesas

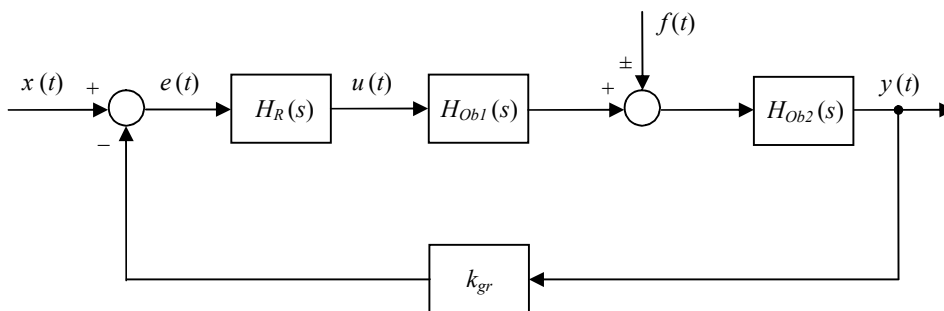


1.18 pav. Pereinamasis AVS su kintamais parametrais procesas

## 2. ELEKTROMECHANINĖS SISTEMOS SU KEIČIAMOS STRUKTŪROS REGULIATORIUMI MODELIO SUDARYMAS

### 2.1. Elektromechaninių vykdymo sistemų dinamikos optimizavimas taikant kiekybinio ir simetrinio optimumų metodus

Automatinio valdymo sistemų dinamikos optimizavimo metodai – kiekybinis (dar vadinamas *techniniu*) ir simetrinis optimumai suformuoti praėjusio amžiaus viduryje. Pasiūlytų dinamikos formavimo principų taikymas ypač paplito elektromechaninėse judesio valdymo sistemose ir yra sėkmingai taikoma iki šiol. Tai yra universalūs sistemos optimizavimo metodai, kurie yra taikomi ir kitose automatinio valdymo sistemose, kaip vieni iš daugelio reguliatorių parinkimo ir derinimo būdų [1].



2.1 pav. Automatinio valdymo sistemos reguliavimo kontūro struktūrinė schema

Priimame, kad automatinio valdymo sistemos reguliavimo kontūro struktūrinė schema yra tokia kaip pateikta 2.1 pav., kurioje  $H_{Ob1}$ ,  $H_{Ob2}$  – valdymo objektą aprašančios perdavimo funkcijos,  $k_{gr}$  – sistemos grįžtamojo ryšio koeficientas. Sistemos valdymo kokybinės charakteristikos netenkina keliamų reikalavimų, todėl norint jas pagerinti 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 (2.1 pav.), atstojamoji perdavimo funkcija igtų tokių pavidalą [1]:

$$H_{KOa}(s) = \frac{1}{2 \cdot T_\mu \cdot s \cdot (T_\mu \cdot s + 1)}; \quad (2.1)$$

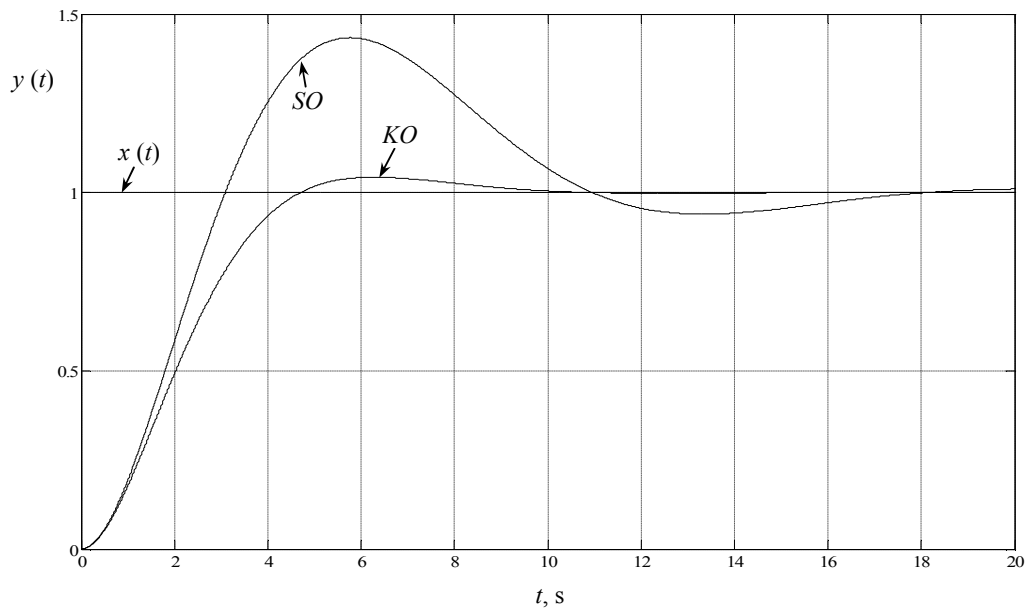
čia  $T_\mu$  – sistemos laiko pastovioji;  
 $s$  – kompleksinis (Laplaso) kintamasis.

Todėl norint, kad reguliavimo kontūras būtų kiekybiškai optimalus, įjungiamo regulatoriaus perdavimo funkcija turi būti:

$$H_R(s) = \frac{H_{KOa}(s)}{H_{aNek}(s)}; \quad (2.2)$$

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

Darant prielaidą, kad sistemos pereinamasis procesas baigiasi, kai reguliuojamasis kintamasis įeina į 5% leistino dinaminio nuokrypio sritį ir joje pasilieka, tuomet reguliavimo trukmė gaunama:  $t_{regKO} = 4,14 \cdot T_\mu$ . Kiekybiškai optimalaus reguliavimo kontūro reakcija į vienetinį šuolinį įėjimo signalą pateikta 2.2 pav. *KO* kreive. Maksimalus dinaminis nuokrypis (maksimalus persvyris) tuomet siekia tik 4,32% [1].



2.2 pav. Reguliavimo kontūro vienetinės šuolinės reakcijos

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 toks reguliavimo kontūras yra astatinis tik tuomet, kai trikdys veikia už integruojančiosios grandies. Tais atvejais, kai integruojanti grandis yra paskutinė ( $H_{Ob2}(s)$  – 2.1 pav.) ir regulatorius pagal kiekybinio optimumo sąlygą gaunamas proporcingasis (P), tuomet trikdys, veikdamas tarp

integrojančiosios grandies ir regulatoriaus 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:

$$H_{SOa}(s) = \frac{1 + 4 \cdot T_\mu \cdot s}{4 \cdot T_\mu \cdot s} \cdot \frac{1}{2 \cdot T_\mu \cdot s \cdot (T_\mu \cdot s + 1)} \quad (2.3)$$

ir kontūras tuomet yra vadinamas simetriškai optimaliu, nes jo Bode amplitudinė diagrama simetriška kirtimo (lūžio) dažnio atžvilgiu. Tačiau tai pablogina reguliavimo kontūro dinamines savybes: maksimalus dinaminis nuokrypis padidėja 10 kartų ir siekia 43,4% (2.2 pav. *SO* kreivė), reguliavimo trukmė pailgėja 3,5 karto ( $t_{regSO} = 14,7 \cdot T_\mu$ ), lyginant su kontūru suderintu pagal kiekybinio optimumo sąlygą [1].

## 2.2. Elektromechaninės vykdymo sistemos hierarchinio valdymo struktūra

Nagrinėjamas [1] hierarchinio (kaskadinio) 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 2.3 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 (2.3 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:

$$H_K(s) = \frac{k_K}{T_K \cdot s + 1}; \quad (2.4)$$

- 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 apibūdinama perdavimo funkcija:

$$H_{ink}(s) = \frac{R_{i\Sigma}^{-1}}{T_{i\Sigma} \cdot s + 1}; \quad (2.5)$$

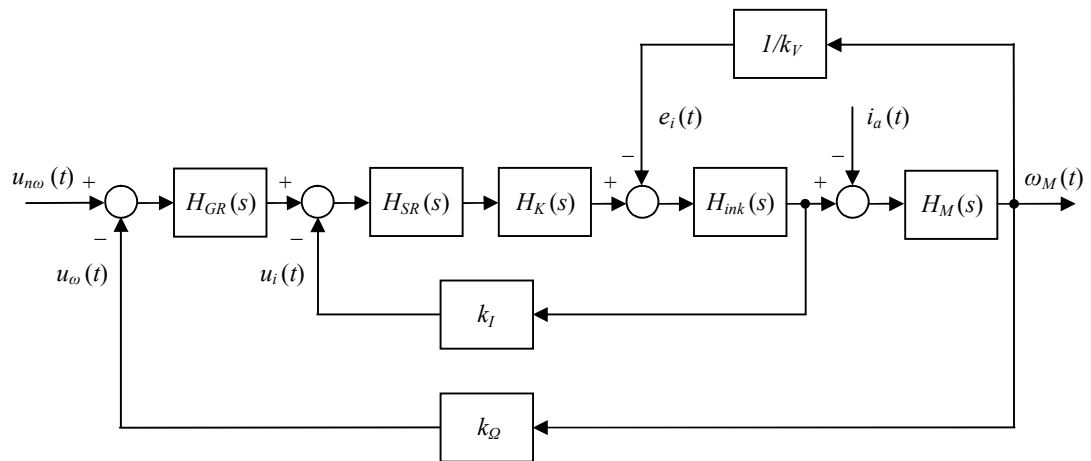
- čia  $R_{i\Sigma} = R_i + R_k$  – bendra inkaro grandinės aktyvioji varža;  
 $T_{i\Sigma} = L_{i\Sigma}/R_{i\Sigma}$  – inkaro grandinės elektromagnetinė laiko pastovioji;  
 $L_{i\Sigma} = L_i + L_k$  – bendra inkaro grandinės induktyvioji varža;  
 $R_i$  – inkaro grandinės aktyvioji varža;  
 $L_i$  – inkaro grandinės induktyvioji varža;  
 $k_I$  – srovės grįžtamojo ryšio 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]:

$$H_M(s) = \frac{R_{i\Sigma} \cdot k_V}{T_{m\Sigma} \cdot s}. \quad (2.6)$$

- čia  $k_V = (C \cdot \Phi)^{-1}$  – variklio stiprinimo koeficientas;  
 $C$  – variklio konstrukcijos koeficientas;  
 $\Phi = \text{const}$  – magnetinis srautas variklio oro tarpe;  
 $T_{m\Sigma} = J_\Sigma R_{i\Sigma} / (C \cdot \Phi)^2$  – 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 (5 pav.). Sistemos įėjimo kintamojo – įtampos  $u_{no}$  dydis lemia sistemos išėjimo kintamojo – greičio  $\omega_M$  reikšmę.



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

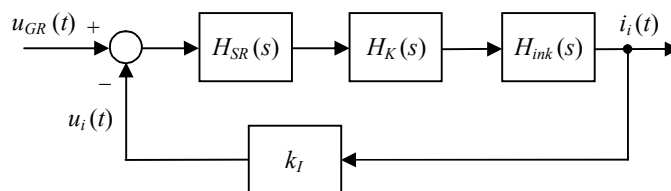
Valdymo kontūrų dinamikos optimizavimas (derinimas) hierarchinio valdymo sistemose pradedamas nuo sparčiau veikiančių vidinių reguliavimo kontūrų, todėl nuolatinės srovės elektros pavaros hierarchinio valdymo sistemoje pirmiausiai yra optimizuojamas srovės reguliavimo kontūras [1].

### 2.2.1. Srovės reguliavimo kontūro optimizavimas taikant kiekybinio optimumo kriterijų

Norint pasiekti sparčiausią pereinamąjį procesą, srovės reguliavimo kontūro optimizavimui taikysime kiekybinio optimumo kriterijų. Hierarchinio valdymo sistemose optimizuojant reguliavimo kontūrus pagal kiekybinio optimumo kriterijų, (2.1) išraiška įgauna pavidalą

$$H_{KOa}(s) = \frac{1}{2^k \cdot T_\mu \cdot s \cdot (2^{k-1} \cdot T_\mu \cdot s + 1)}; \quad (2.7)$$

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



2.4 pav. Srovės reguliavimo kontūro struktūrinė schema

Daroma prielaida, kad srovės reguliavimo kontūre priešinė elektrovaros jėga  $e_i$  (2.3 pav.) pereinamojo proceso metu nekinta. Tuomet galima supaprastinti srovės reguliavimo kontūro struktūrinę schemą, kaip yra parodyta 2.4 pav. Siekiant srovės reguliavimo kontūrą optimizuoti pagal kiekybinio optimumo kriterijų, srovės regulatoriaus perdavimo funkcija apskaičiuojama pagal (2.2) ir (2.7) išraiškas [1]:

$$\begin{aligned}
 H_{SR}(s) &= \frac{H_{KOa}(s)}{H_{aNek}(s)} = \frac{H_{KOa}(s)}{H_K(s) \cdot H_{ink}(s) \cdot k_I} = \frac{1}{\frac{2 \cdot T_K \cdot s \cdot (T_K \cdot s + 1)}{k_K \cdot R_{i\Sigma}^{-1} \cdot k_I}} = \\
 &= \frac{T_{i\Sigma} \cdot s + 1}{2 \cdot k_K \cdot k_I \cdot R_{i\Sigma}^{-1} \cdot T_K \cdot s} = \frac{T_{i\Sigma} \cdot s}{2 \cdot k_K \cdot k_I \cdot R_{i\Sigma}^{-1} \cdot T_K \cdot s} + \frac{1}{2 \cdot k_K \cdot k_I \cdot R_{i\Sigma}^{-1} \cdot T_K \cdot s} = k_{Psr} + \frac{k_{Isr}}{s}.
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

Kaip matyti iš (2.8) 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.

Tuomet atstojamoji uždaro srovės reguliavimo kontūro perdavimo funkcija:

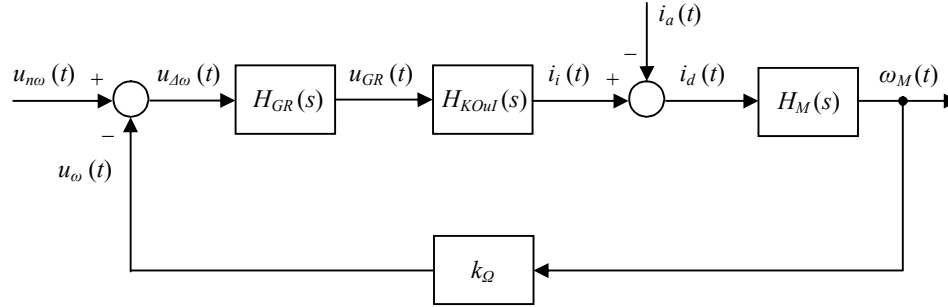
$$H_{KOul}(s) = \frac{H_{KOa}(s) \cdot k_I^{-1}}{H_{KOa}(s) + 1} = \frac{\frac{1}{2 \cdot T_K \cdot s \cdot (T_K \cdot s + 1)} \cdot k_I^{-1}}{\frac{1}{2 \cdot T_K \cdot s \cdot (T_K \cdot s + 1)} + 1} = \frac{k_I^{-1}}{2 \cdot T_K \cdot s \cdot (T_K \cdot s + 1) + 1}. \tag{2.9}$$

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].

### 2.2.2. Greičio reguliavimo kontūro optimizavimas taikant kiekybinio optimumo kriterijų

Nagrinėjamas [1] nuolatinės srovės elektros pavaros greičio reguliavimo kontūras (2.5 pav.) kurį sudaro variklio mechaninė dalis  $H_M$ , greičio grįžtamojo ryšio koeficientas  $k_Q$ , greičio regulatorius  $H_{GR}$ , ir pavaldus inkaro srovės reguliavimo kontūras, apibūdinamas priimtina supaprastinta (2.9) išraiškos forma, kurioje vardiklio narys  $2 \cdot T_K^2 \cdot s^2$  yra neįvertinamas:

$$H_{KOul}(s) = \frac{k_I^{-1}}{2 \cdot T_K \cdot s \cdot (T_K \cdot s + 1) + 1} = \frac{k_I^{-1}}{2 \cdot T_K^2 \cdot s^2 + 2 \cdot T_K \cdot s + 1} \approx \frac{k_I^{-1}}{2 \cdot T_K \cdot s + 1}; \quad (2.10)$$



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

Taikant kiekybinio optimumo kriterijų, greičio regulatoriaus perdavimo funkcija apskaičiuojama pagal (2.2), (2.7) ir (2.10) išraiškas:

$$H_{GR,KO}(s) = \frac{H_{KOa}(s)}{H_{aNek}(s)} = \frac{H_{KOa\Omega}(s)}{H_{KOul}(s) \cdot H_M(s) \cdot k_\Omega} = \frac{1}{\frac{4 \cdot T_K \cdot s \cdot (2 \cdot T_K \cdot s + 1)}{k_I^{-1} \cdot \frac{R_{i\Sigma} \cdot k_V}{T_{m\Sigma} \cdot s} \cdot k_\Omega}} =$$

$$= \frac{k_I}{k_V \cdot k_\Omega \cdot R_{i\Sigma}} \cdot \frac{T_{m\Sigma}}{4 \cdot T_K} = k_{P\Omega}. \quad (2.11)$$

Kaip matyti iš (2.11) išraiškos, kad optimizuoti greičio reguliavimo kontūrą pagal kiekybinio optimumo kriterijų, reikalingas proporcinio (P) valdymo dėsnio greičio regulatorius. Laisvasis judesys greičio reguliavimo kontūre yra du kartus lėtesnis nei srovės reguliavimo kontūre. Tačiau šioje elektromechaninėje sistemoje susidaro situacija, kad veikiant sistemą trikdžiui – apkrovos srovei  $i_a$ , yra gaunamas statinis reguliuojamojo kintamojo nuokrypis – kampinio greičio  $\omega_M$  statinis nuokrypis. Taigi nuolatinės srovės elektros pavaros greičio reguliavimo kontūras, optimizuotas pagal kiekybinio optimumo kriterijų, yra astatinis įėjimo kintamojo – greičio nuostato  $u_{n\omega}(t)$  šuolinio pokyčio atžvilgiu, tačiau statinis trikdžio – apkrovos srovės  $i_d(t)$  šuolinio pokyčio atžvilgiu. 2.1 skyriuje yra pateiktas sistemos dinamikos optimizavimo metodas taikant simetrinio optimumo kriterijų, kuris įgalina išvengti nepageidaujamo statinio reguliuojamojo kintamojo nuokrypio – greičio statinio nuokrypio [1].



### 2.2.3. Greičio reguliavimo kontūro optimizavimas taikant simetrinio optimumo kriterijų

Hierarchinio valdymo sistemose simetrinio optimumo išraiška (2.3) įgauna pavidalą [1]:

$$H_{SOa}(s) = \frac{1 + 2^{k+1} \cdot T_\mu \cdot s}{2^{k+1} \cdot T_\mu \cdot s} \cdot \frac{1}{2^k \cdot T_\mu \cdot s \cdot (2^{k-1} \cdot T_\mu \cdot s + 1)}; \quad (2.12)$$

čia  $k=2$  – greičio reguliavimo kontūro eilės numeris nagrinėjamojoje hierarchinio valdymo elektromechaninėje sistemoje.

Optimizuojant nuolatinės srovės elektros pavaros greičio reguliavimo kontūrą pagal simetrinio optimumo kriterijų, sistemos struktūrinė schema išlieka nepakitusi (2.5 pav.), išskyrus greičio regulatoriaus perdavimo funkciją, kuri tuomet apskaičiuojama pagal (2.2), (2.12) ir (2.10) išraiškas:

$$\begin{aligned} H_{GR.SO}(s) &= \frac{H_{SOa}(s)}{H_{aNek}(s)} = \frac{H_{SOa\Omega}(s)}{H_{KOul}(s) \cdot H_M(s) \cdot k_\Omega} = \frac{1 + 8 \cdot T_K \cdot s}{8 \cdot T_K \cdot s} \cdot \frac{1}{4 \cdot T_K \cdot s \cdot (2 \cdot T_K \cdot s + 1)} = \\ &= \frac{k_I^{-1} \cdot R_{i\Sigma} \cdot k_V \cdot k_\Omega}{2 \cdot T_K \cdot s + 1} \cdot \frac{1}{T_{m\Sigma} \cdot s} \cdot k_\Omega \\ &= \frac{1 + 8 \cdot T_K \cdot s}{8 \cdot T_K \cdot s} \cdot \frac{k_I}{k_V \cdot k_\Omega \cdot R_{i\Sigma}} \cdot \frac{T_{m\Sigma}}{4 \cdot T_K} = k_{P\Omega} \cdot \frac{1 + 8 \cdot T_K \cdot s}{8 \cdot T_K \cdot s} = k_{P\Omega} + \frac{k_{P\Omega}}{8 \cdot T_K \cdot s} = k_{P\Omega} + \frac{k_{I\Omega}}{s}. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Kaip matyti iš (2.13) 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].

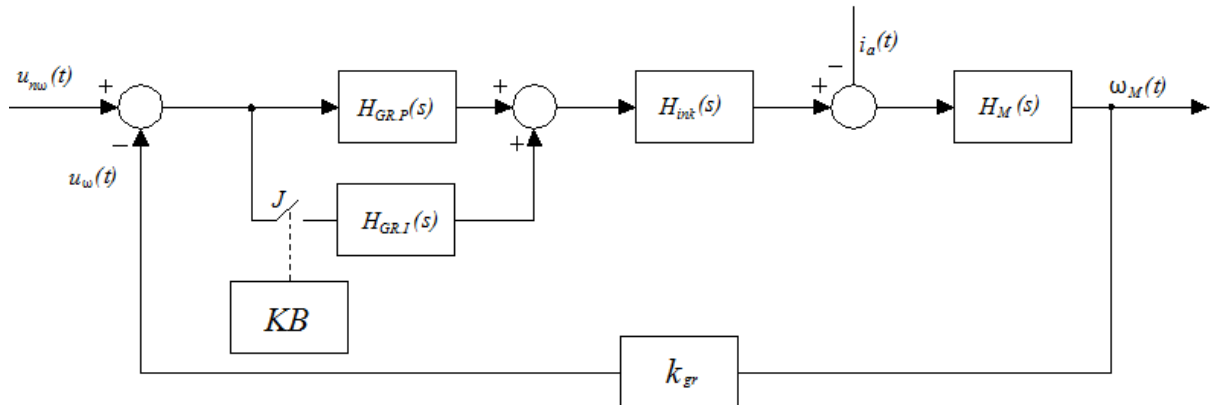
Optimizavus elektromechaninę sistemą pagal simetrinio optimumo kriterijų, sistemos išėjimo kintamojo – kampinio greičio statinis nuokrypis yra pašalinamas, tačiau suprastėja pereinamojo proceso kokybė – padidėja maksimalus dinaminis nuokrypis ir pailgėja reguliavimo trukmė, lyginant su sistema optimizuota pagal kiekybinio optimumo kriterijų.

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). Taigi iškyla dilema – kuri reguliavimo kontūrų optimizavimo metodą taikyti hierarchinio valdymo elektromechaninėje sistemoje. Pasirinkimą nulemia automatinio valdymo sistemai keliami reikalavimai, kuriais dažnai 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 galimas sprendimas: siekiant suderinti kiekybinio ir simetrinio optimumų teikiamus privalumus bei pašalinti jų trūkumus, naudojamas kintamos struktūros greičio reguliatorius, kurio valdymo dėsnis pereinamojo proceso metu yra automatiškai keičiamas iš proporcinio (P), suderinto pagal kiekybinio optimumo kriterijų, į proporcinį integruojantį (PI), suderintą pagal simetrinio optimumo kriterijų.

### 2.3. Elektromechaninė sistema su keičiamos struktūros reguliatoriumi

Pagal 2.1 ir 2.2 skyriuose aprašomą elektromechaninių sistemų dinamikos optimizavimo metodiką sudaryta nuolatinės srovės elektromechaninės greičio stabilizavimo sistemos su keičiamos struktūros reguliatoriumi struktūrinė schema (2.6 pav.).



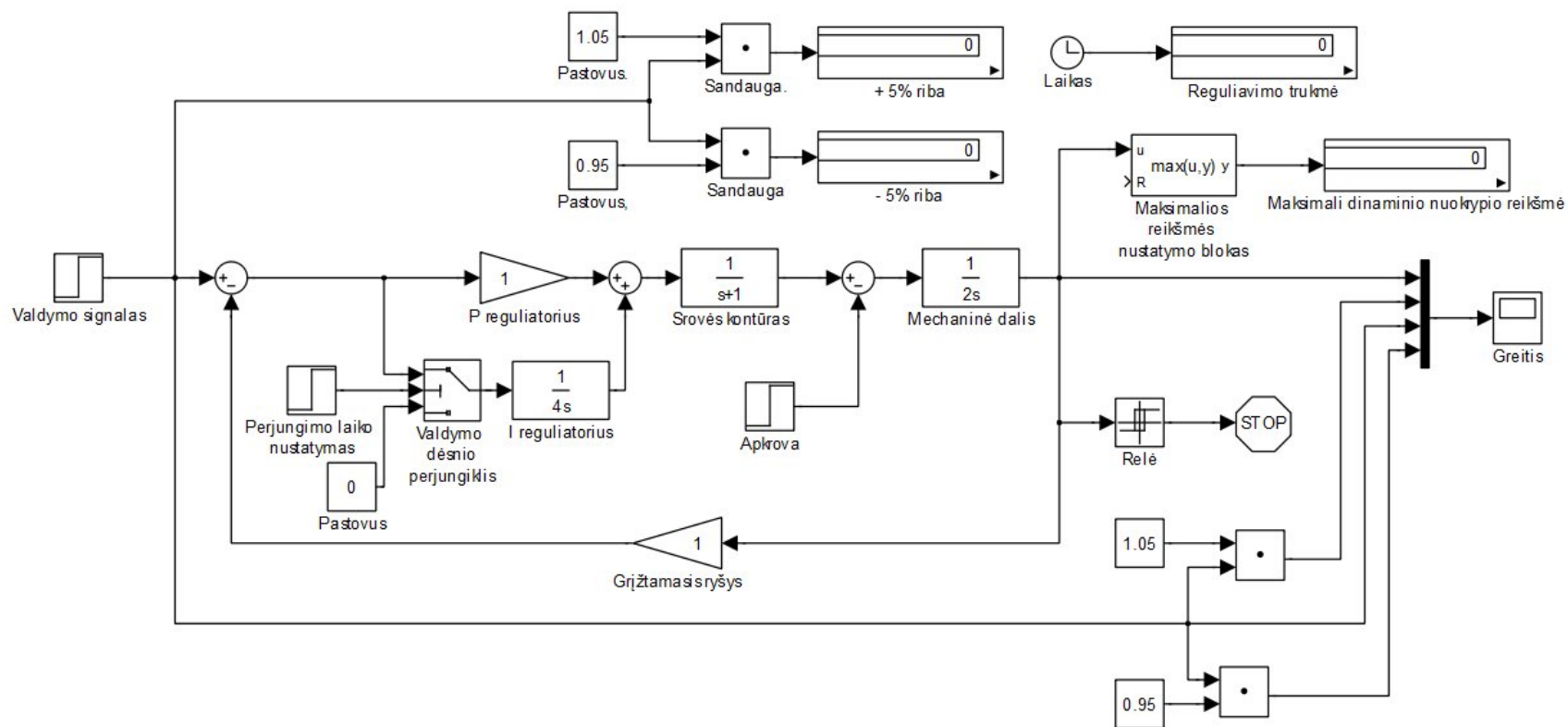
2.6 pav. Nuolatinės srovės elektromechaninės greičio stabilizavimo sistemos su keičiamos struktūros reguliatoriumi struktūrinė schema

Automatinio valdymo sistemą sudaro grįžtamojo ryšio koeficientas –  $k_{gr}$ , kintamos struktūros reguliatorius, galintis formuoti proporcinį –  $H_{GR,P}(s)$  ir integralinį –  $H_{GR,I}(s)$  reguliavimo dėsnius. Valdymo objektą išreiškia inkaro grandinės perdavimo funkcija –  $H_{ink}(s)$  ir

variklio mechaninė dalis –  $H_M(s)$ . Greičio stabilizavimo sistemoje veikiant įėjimo signalui  $u_{n\omega}$  ir esant įjungtam tik proporciniam reguliatoriaus valdymo kanalui bei sistemą veikiant nustatytai statinei apkrovai  $i_a$  gaunamas sistemos išėjimo greičio  $\omega_M$  statinis nuokrypis. Kad pašalinti sistemos statinį nuokrypį, tam tikru laiko  $t$  momentu komutavimo blokas  $KB$  įjungia integralinį reguliatoriaus kanalą, nes pastoviai įjungtas integruojantis reguliatoriaus kanalas sukelia nepageidaujamo dydžio sistemos dinaminį nuokrypį. Taip perjungiant reguliatoriaus kanalus iš proporcinio į proporcinį integruojantį išvengiama sistemos pereinamąjį procesą bloginančių dinaminio ir statinio nuokrypių, kurie neviršija nustatytos 5% ribos.

Pagal šią struktūrinę schemą (2.6 pav.) sudarytas hierarchinės elektromechaninės greičio stabilizavimo sistemos su keičiamos struktūros reguliatoriumi imitacinis modelis kompiuterine MATLAB/SIMULINK programa (2.7 pav).

Imitacinio modelio sistemą sudaro: valdymo signalo grandis. Šioje grandyje nustatoma greičio signalo vertė. Keičiamos struktūros reguliatorius sudarytas iš proporcinės ir integruojančios dalies, valdymo dėsnio perjungiklio ir grandies skirtos perjungimo laikui nustatyti. Variklį sudaro vidinis srovės valdymo kontūras variklio mechaninė dalis ir apkrovos grandis. Modelį taip pat sudaro leistinų ribų nustatymo kontūras, kontūras skirtas reguliavimo trukmės vertėms stebėti, grįžtamojo ryšio grandis, pereinamąjį procesą stabdanti grandis pasiekus geriausią reguliavimo trukmės vertę, greičio kontūras skirtas gaunamoms pereinamojo proceso kreivėms vizualizuoti.



2.7 pav. Elektromechaninės sistemos su keičiamos struktūros reguliatoriumi modelis MATLAB/SIMULINK programa

### 3. GERIAUSIŲ REGULIATORIAUS PERJUNGIMO PARAMETRO VERČIŲ NUSTATYMAS

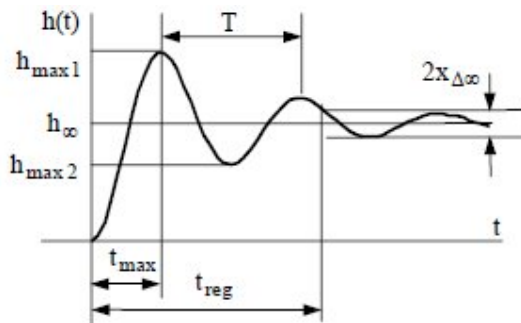
#### 3.1. Perjungimo parametro verčių nustatymo metodika

Geriausių regulatoriaus perjungimo parametro verčių nustatymas atliekamas pagal reguliavimo trukmės rodiklio vertę nustatant geriausią elektromechaninės greičio stabilizavimo sistemos dinamikos kokybę užtikrinančią regulatoriaus perjungimo parametro priklausomybę nuo nuostato signalo vertės ir statinės apkrovos.

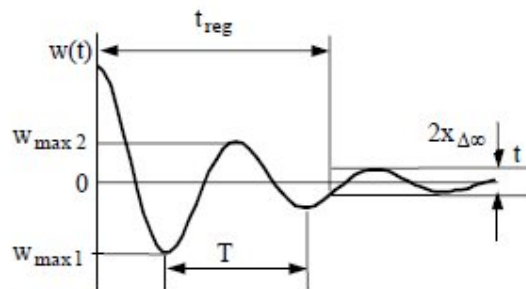
Reguliavimo trukmė – tiesioginis ARS pereinamojo proceso kokybės rodiklis, tai laikas, per kurį reguliuojamo dydžio nuokrypis nuo nusistovėjusios reikšmės pasidaro mažesnis už leistiną paklaidą (3.1, 3.2 pav.) [15].

$$t_{reg} = w(t) \leq x_{\Delta\infty}; \quad (3.1)$$

$$t_{reg} = |h(t) - h_{\infty}| \leq x_{\Delta\infty}; \quad (3.2)$$



3.1 pav. Pereinamoji charakteristika



3.2 pav. Svorinė funkcija [15]

Geriausių regulatoriaus perjungimo parametro verčių nustatymas atliekamas kompiuterinės programos pagalba sudarytu elektromechaninės sistemos su keičiamos struktūros regulatoriumi modeliu (2.7 pav). Tyrimas buvo atliekamas keičiant nuostato signalo vertę, greičio nustatymo grandyje, nuo 0,5 iki 10 ( 15 skirtingų nuostato signalo verčių), ir keičiant statinės apkrovos vertę nuo 0 iki 0,2 – 20% žingsnis buvo 0,05 (5%) tai viso su 4 skirtingom apkrovos vertėmis. (Statinės apkrovos procentinė išraiška čia siejama su jos sukeliamu greičio statiniu nuokrypiu). Taigi nustčius tam tikrą nuostato signalo vertę ir apkrovos dydį buvo keičiamas perjungimo laikas ir stebima reguliavimo trukmė. Mažiausia reguliavimo trukmės vertė nurodo geriausią perjungimo parametro vertę užtikrinančią geriausią elektromechaninės vykdymo sistemos dinamikos kokybę.

### 3.2. Tyrimo rezultatai

Tiesioginio sistemos dinamikos kokybės rodiklio – reguliavimo trukmės priklausomybė nuo perjungimo laiko kai greičio nuostato signalas  $X_{in}=0,7$ , apkrova 10%, pateikta 3.1 lentelėje ir 3.4 pav. 3.1 lentelėje pastorintu šriftu pažymėtos skaitinės vertės žymi trumpiausią reguliavimo trukmę – kartu tai geriausias greičio regulatoriaus perjungimo iš P dėsnio į PI laiko momentas.

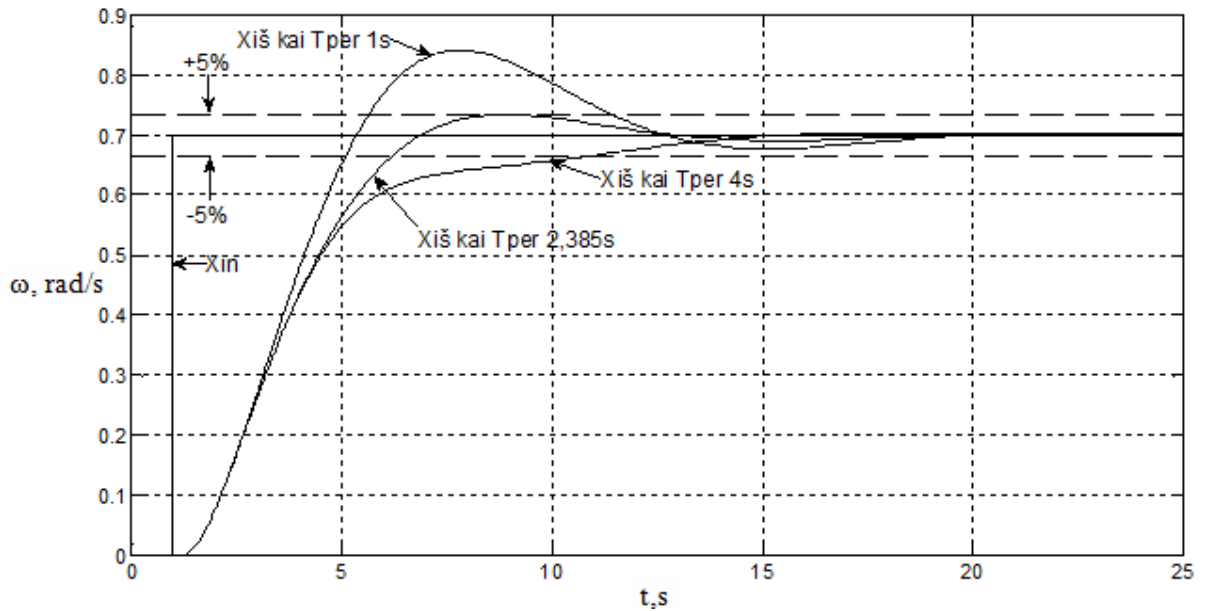
3.1 lentelė

#### **Reguliavimo trukmės priklausomybė nuo perjungimo laiko kai $X_{in}=0,7$ . Apkrova 10%.**

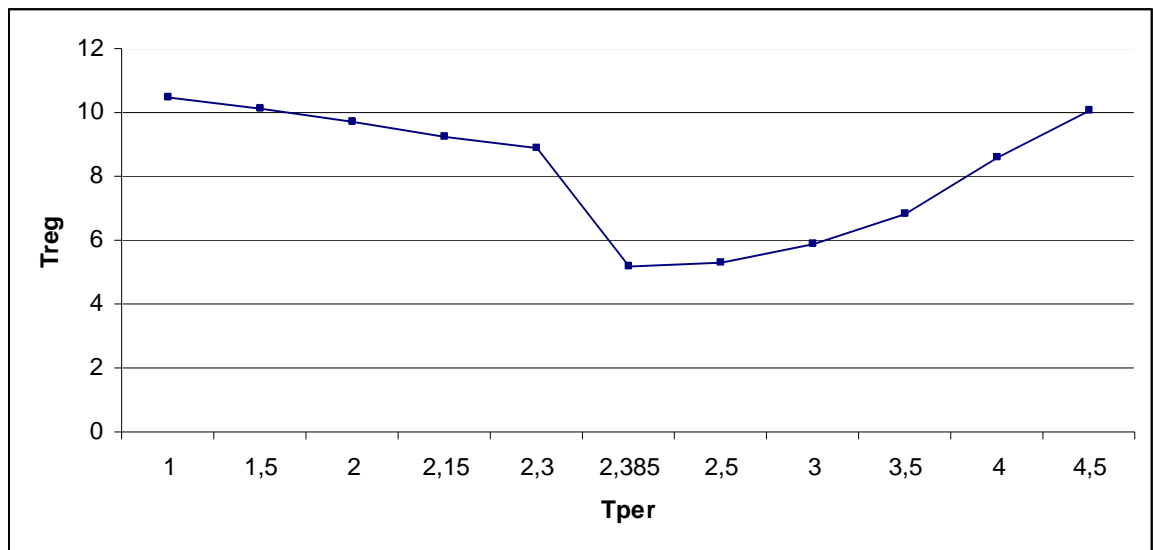
Perjungimo laikas, s	Reguliavimo trukmė, s
1	10,451
1,5	10,132
2	9,721
2,15	9,247
2,3	8,864
<b>2,385</b>	<b>5,2</b>
2,5	5,313
3	5,909
3,5	6,818
4	8,6
4,5	10,049

Greičio pereinamojo proceso kreivės prie įvairių regulatoriaus perjungimo momentų pateiktos 3.3 pav. Kaip matoma iš minėtame paveikslėlyje vaizduojamų greičio kreivių, kai kintamos struktūros greičio regulatoriaus valdymo dėsnis iš proporcinio (P) į proporcinį integruojantį (PI) perjungiamas po vienos sekundės, yra gaunamas didelis dinaminis nuokrypis kuris iššaukia labai didelę reguliavimo trukmę ir kartu prastą dinamikos kokybę. Lygiai toks pat prastos kokybės pereinamasis procesas gaunamas, kai perjungama po 4 s. Nors tuomet dinaminio

nuokrypio visai nėra, tačiau ilgokai užtrunka kol greičio signalo vertė pasiekia 95% nusistovėjusios vertės, t.y. gaunama ilga reguliavimo trukmė. Trumpiausia reguliavimo trukmė – geriausias pereinamasis procesas gaunamas, kai perjungiami po 2,385s, tuomet dinaminis nuokrypis neviršija 5%.



3.3 pav. Greičio pereinamojo proceso kreivės, kai nuostato signalas  $x_{in}=0,7$ . Statinė apkrova 10%



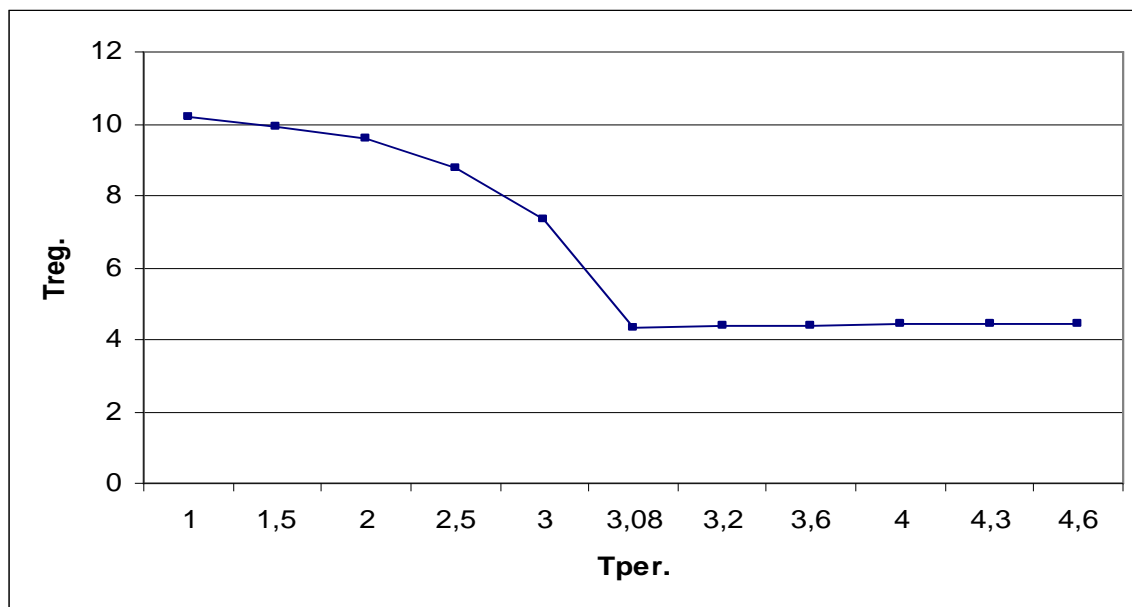
3.4 pav. Reguliavimo trukmės priklausomybė nuo perjungimo laiko, kai  $x_{in}=0,7$ . Statinė apkrova 10%

Reguliavimo trukmės priklausomybė nuo perjungimo laiko, kai greičio nuostato signalas  $x_{in}=2$ , statinė apkrova 5%, pateikta 3.2 lentelėje ir 3.5 pav. Geriausia greičio pereinamojo proceso kreivė pateikta 3.6 pav., iš kurio matyti, kad greičio dinaminis nuokrypis neviršija 5%.

3.2 lentelė

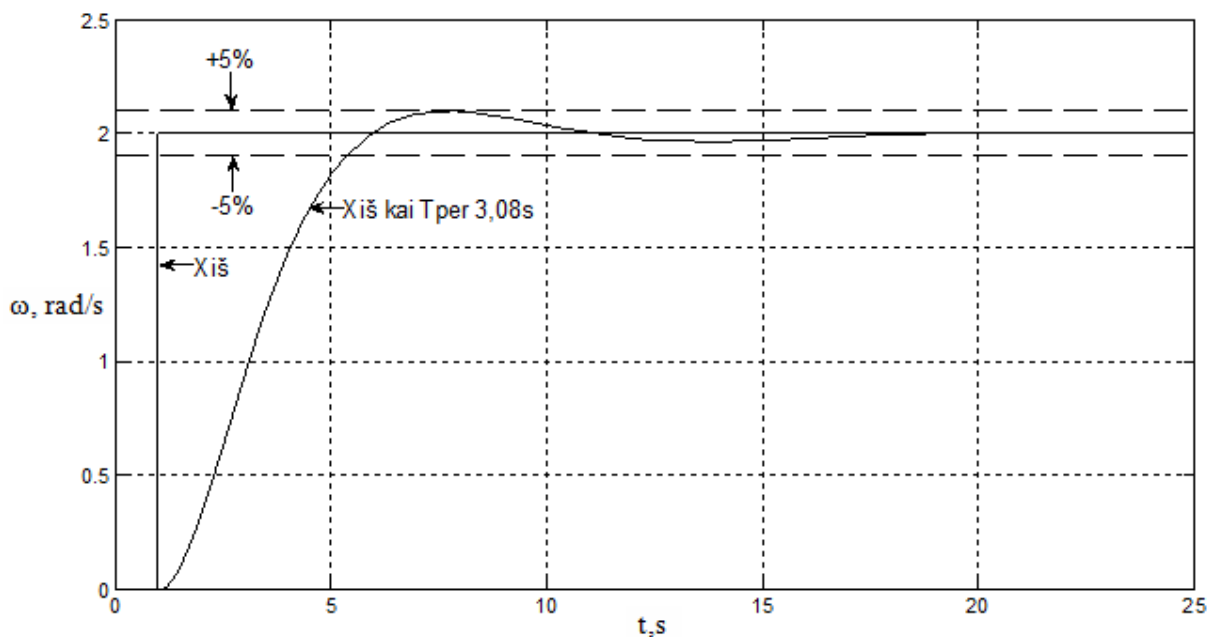
**Reguliavimo trukmės priklausomybė nuo perjungimo laiko kai  $X_{in}=2$ . Apkrova 5%**

Perjungimo laikas, s	Reguliavimo trukmė, s
1	10,215
1,5	9,902
2	9,578
2,5	8,79
3	7,366
<b>3,08</b>	<b>4,35</b>
3,2	4,367
3,6	4,4
4	4,411
4,3	4,411
4,6	4,412



3.5 pav. Reguliavimo trukmės priklausomybė nuo perjungimo laiko, kai  $x_{in}=2$ . Statinė apkrova 5%





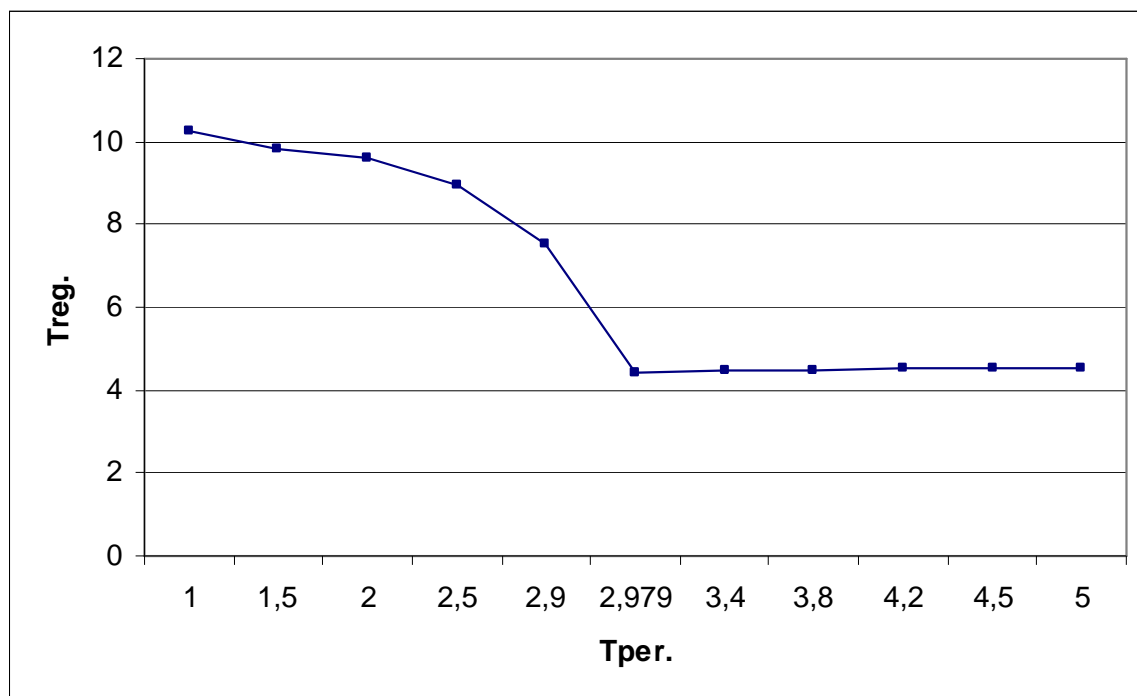
3.6 pav. Geriausia greičio pereinamojo proceso kreivė, kai  $x_{in}=2$ . Statinė apkrova 5%

Reguliavimo trukmės priklausomybė nuo perjungimo laiko, kai greičio nuostato signalas  $x_{in}=6$ , statinė apkrova 20%, pateikta 3.3 lentelėje ir 3.7 pav. Geriausia greičio pereinamojo proceso kreivė pateikta 3.8 pav., iš kurio matyti, kad greičio dinaminis nuokrypis neviršija 5%.

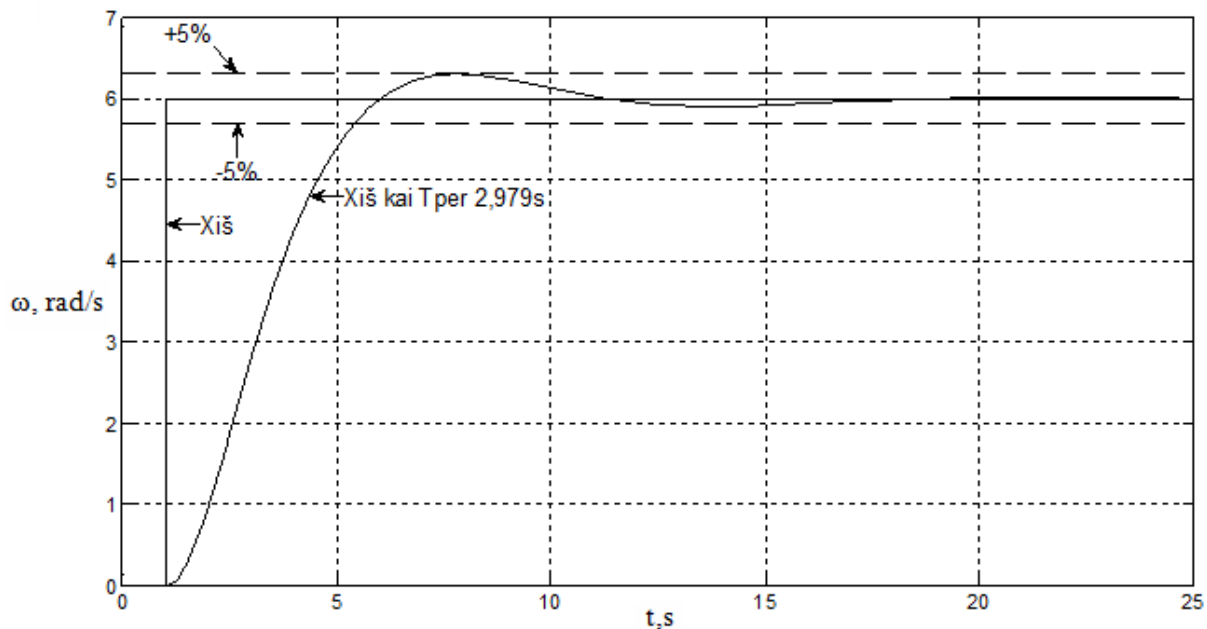
3.3 lentelė

**Reguliavimo trukmės priklausomybė nuo perjungimo laiko kai  $X_{in}=6$ . Apkrova 20%.**

Perjungimo laikas, s	Reguliavimo trukmė, s
1	10,230
1,5	9,843
2	9,585
2,5	8,962
2,9	7,522
<b>2,979</b>	<b>4,415</b>
3,4	4,490
3,8	4,499
4,2	4,515
4,5	4,517
5	4,517



3.7 pav. Reguliavimo trukmės priklausomybė nuo perjungimo laiko, kai  $x_{in}=6$ . Statinė apkrova 20%



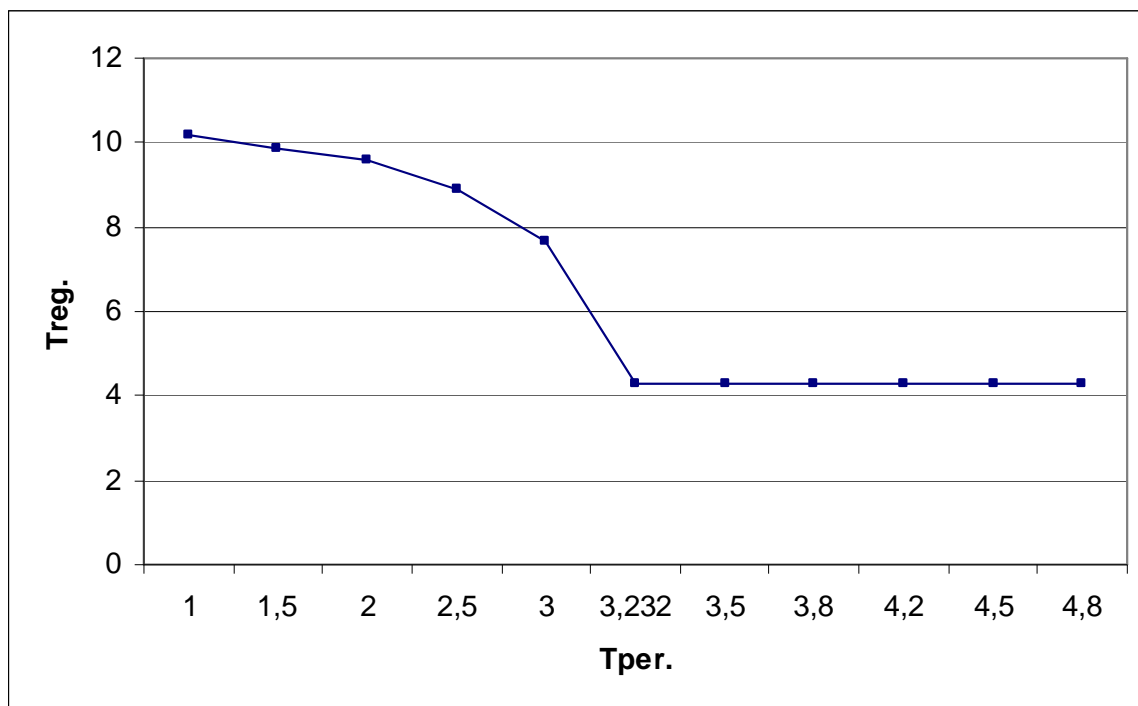
3.8 pav. Geriausia greičio pereinamojo proceso kreivė, kai  $x_{in}=6$ . Statinė apkrova 20%

Reguliavimo trukmės priklausomybė nuo perjungimo laiko, kai greičio nuostato signalas  $x_m=10$ , statinė apkrova 15%, pateikta 3.4 lentelėje ir 3.9 pav. Geriausia greičio pereinamojo proceso kreivė pateikta 3.10 pav., iš kurio matyti, kad greičio dinaminis nuokrypis neviršija 5%.

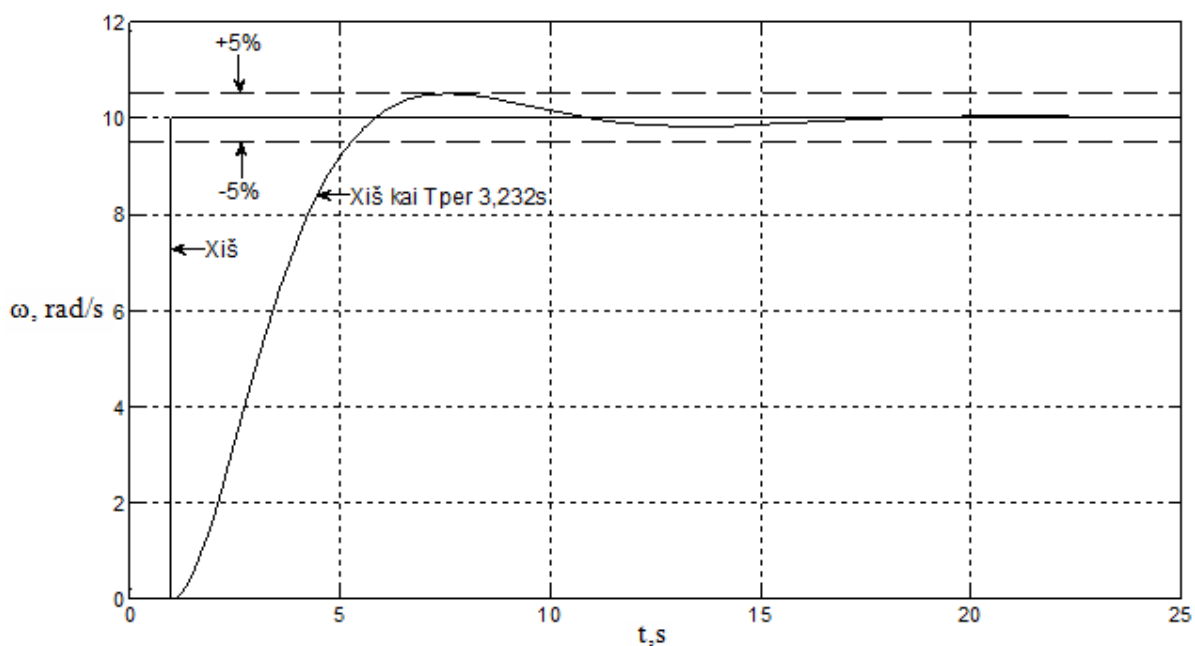
3.4 lentelė

**Reguliavimo trukmės priklausomybė nuo perjungimo laiko kai  $X_{in}=10$ . Apkrova 15%.**

Perjungimo laikas, s	Reguliavimo trukmė, s
1	10,198
1,5	9,841
2	9,570
2,5	8,883
3	7,675
<b>3,232</b>	<b>4,269</b>
3,5	4,287
3,8	4,293
4,2	4,297
4,5	4,297
4,8	4,297



3.9 pav. Reguliavimo trukmės priklausomybė nuo perjungimo laiko, kai  $x_m=10$ . Statinė apkrova 15%



3.10 pav. Geriausia greičio pereinamojo proceso kreivė, kai  $x_{in} = 10$ . Statinė apkrova 15%

Pagal trumpiausią reguliavimo trukmę visi nustatytieji geriausi perjungimo laikai iš proporcinio į proporcinį integruojantį valdymo dėsnį, kai greičio nuostato signalas kito nuo 0,5 iki 10 ir statinė apkrova buvo keičiama nuo 0 iki 20%, yra pateikti 3.5 lentelėje ir 3.11 pav.

3.5 lentelė

### Visi tyrimo rezultatai

	Apkrova				
	0	0,05	0,1	0,15	0,2
Greičio signalas	Perjungimo laikas				
0,5	3,631	2,537	2,265	2,166	2,179
0,6	3,631	2,616	2,331	2,201	2,160
0,7	3,631	2,679	2,390	2,243	2,173
0,8	3,631	2,735	2,445	2,288	2,200
0,9	3,631	2,782	2,493	2,330	2,232
1	3,631	2,825	2,538	2,371	2,266
2	3,631	3,080	2,825	2,660	2,540
3	3,631	3,203	2,979	2,825	2,708
4	3,631	3,280	3,080	2,936	2,825
5	3,631	3,320	3,149	3,016	2,911
6	3,631	3,370	3,203	3,079	2,979

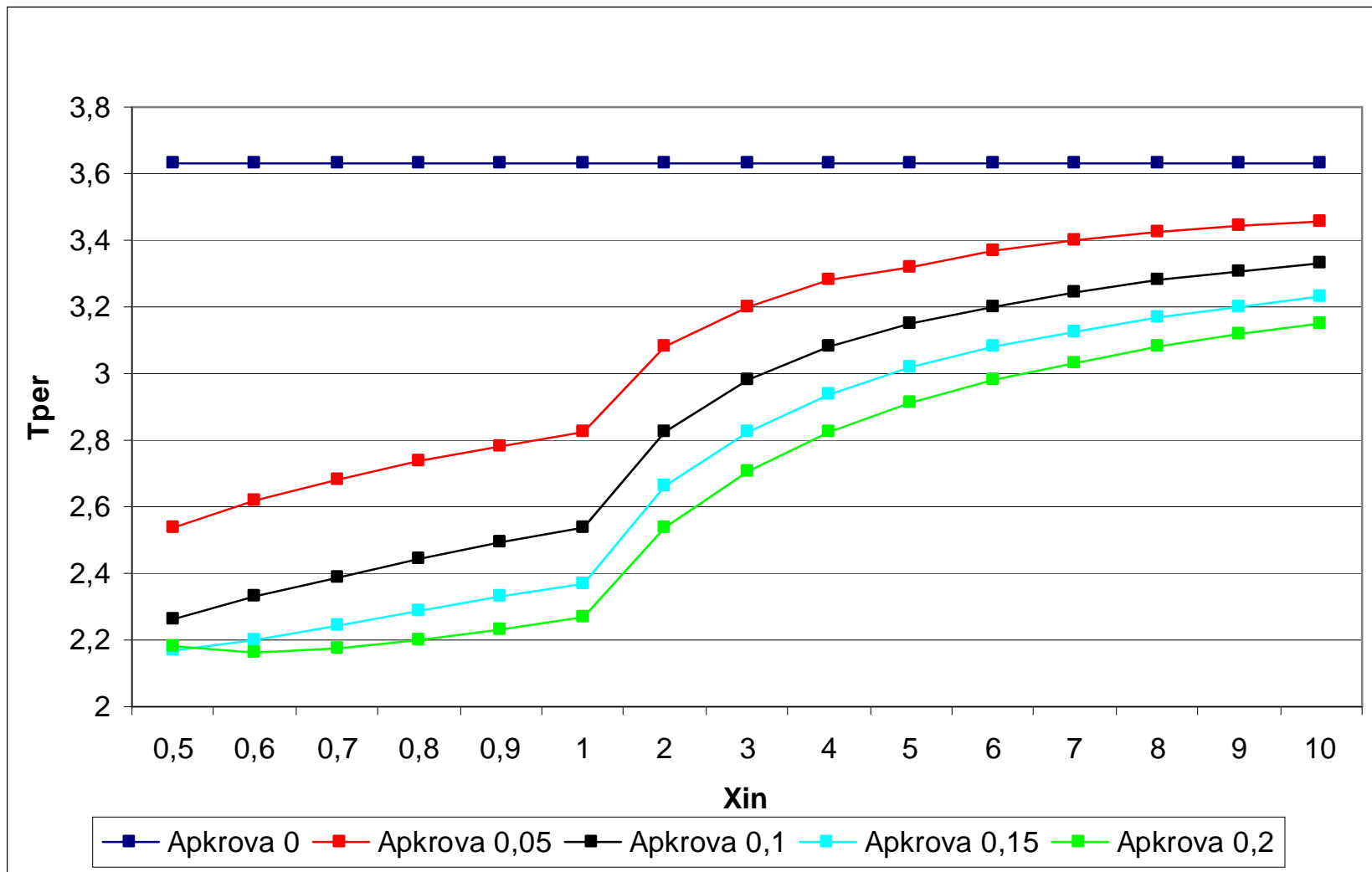
3.5 lentelės tęsinys kitame puslapyje

3.5 lentelės tęsinys

	Apkrova				
	0	0,05	0,1	0,15	0,2
Greičio signalas	Perjungimo laikas				
7	3,631	3,400	3,245	3,128	3,033
8	3,631	3,426	3,280	3,169	3,079
9	3,631	3,442	3,308	3,203	3,117
10	3,631	3,458	3,332	3,232	3,149

Iš 3.5 lentelėje pateiktų rezultatų matyti, kad nesant sistemoje statinės apkrovos perjungimo laikas yra vienodas prie visų greičio nuostato signalo verčių ir atitinka sistemą suderintą pagal kiekybinį optimumą – P reguliatorių.

Šie rezultatai taip pat rodo, kad didėjant sistemos statinei apkrovai greičio reguliatoriaus valdymo dėsnio perjungimo iš P į PI laikas mažėja, o didėjant greičio nustatymo signalui (įėjimo signalui) greičio reguliatoriaus valdymo dėsnio perjungimo iš P į PI laikas didėja, tai vaizduojama 3.11 pav.



3.11 pav. Geriausio perjungimo laiko priklausomybė nuo nuostato signalo ir apkrovos

## 4. KEIČIAMOS STRUKTŪROS GREIČIO REGULIATORIAUS REALIZAVIMAS

### 4.1. Nuolatinės srovės elektros pavaros parametrų apskaičiavimas

Kadangi visi gauti rezultatai yra universalūs, tai gali būti pritaikomi, bet kokioms elektromechaninėms greičio valdymo sistemoms. Patikrinti gautų duomenų universalumą yra pasirenkamas konkretus nuolatinės srovės elektros variklis kurio charakteristikos pateiktos 4.1 lentelėje.

4.1 lentelė

**Nuolatinės srovės elektros variklio parametrai**

$n_N$ , aps/min	$n_{max}$ , aps/min	$U_N$ , V	$P_N$ , kW	$M_N$ , Nm	$I_N$ , A	$R_i$ , $\Omega$	$L_i$ , mH	$L_n$ , mH	$J$ , kgm <sup>2</sup>
1530	1900	280	3,2	20	14,5	2,63	10,5	32	0,02

Siekiant pritaikyti santykiniais vienetais gautas perjungimo laiko vertes konkrečiai nuolatinės srovės elektros pavarai, šios vertės yra perskaičiuojamos pagal tokią formulę:

$$t_{per} = T_{per} \cdot T_{SK}; \quad (4.1)$$

čia  $T_{per}$  – santykinis perjungimo laikas priklausantis nuo apkrovos ir nuostato signalo vertės;  
 $T_{SK}$  – elektromechaninės sistemos srovės kontūro laiko pastovioji (šiuo atveju – 0,02 s).

Perskaičiuotos perjungimo laiko vertės vaizduojamos 4.2 lentelėje.

4.2 lentelė

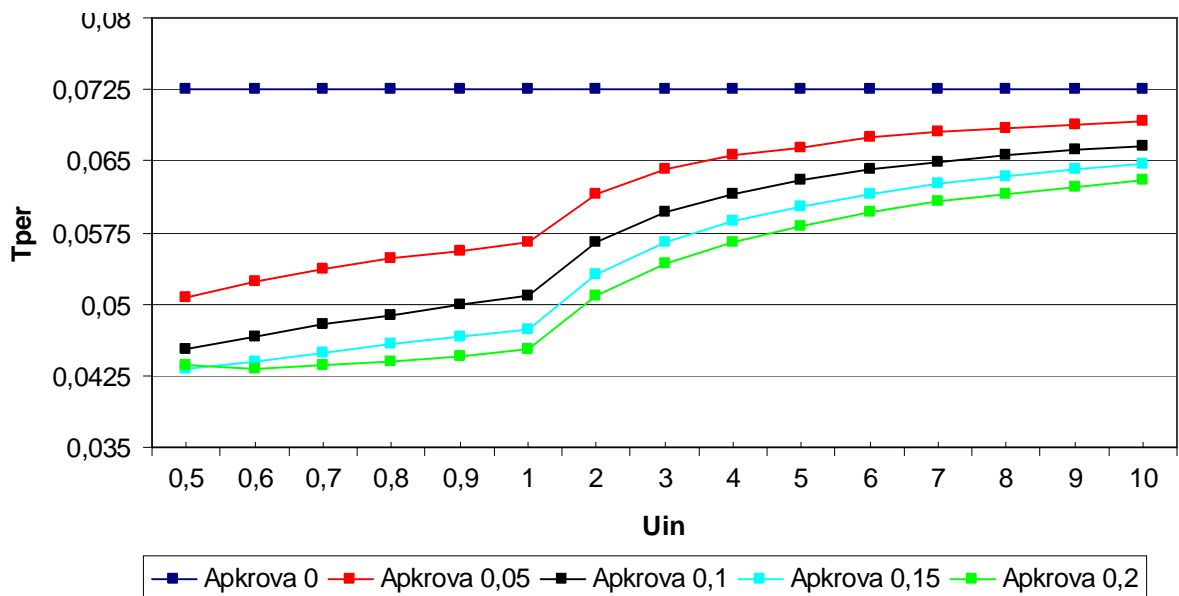
**Perskaičiuotos perjungimo laiko vertės**

	Apkrova				
	0	0,05	0,1	0,15	0,2
Greičio signalas	Perjungimo laikas				
0,5	0,0726	0,0507	0,0453	0,0433	0,0436

4.2 lentelės tęsinys kitame puslapyje

	Apkrova				
	0	0,05	0,1	0,15	0,2
Greičio signalas	Perjungimo laikas				
0,6	0,0726	0,0523	0,0466	0,0440	0,0432
0,7	0,0726	0,0536	0,0478	0,0449	0,0435
0,8	0,0726	0,0547	0,0489	0,0458	0,0440
0,9	0,0726	0,0556	0,0499	0,0466	0,0446
1	0,0726	0,0565	0,0508	0,0474	0,0453
2	0,0726	0,0616	0,0565	0,0532	0,0508
3	0,0726	0,0641	0,0596	0,0565	0,0542
4	0,0726	0,0656	0,0616	0,0587	0,0565
5	0,0726	0,0664	0,0630	0,0603	0,0582
6	0,0726	0,0674	0,0641	0,0616	0,0596
7	0,0726	0,0680	0,0649	0,0626	0,0607
8	0,0726	0,0685	0,0656	0,0634	0,0616
9	0,0726	0,0688	0,0662	0,0641	0,0623
10	0,0726	0,0692	0,0666	0,0646	0,0630

4.1 paveikslėlyje vaizduojama perskaičiuota geriausio perjungimo laiko verčių diagrama priklausanti nuo statinės apkrovos ir įėjimo (įtampos) signalo vertės.



4.1 pav. Perskaičiuota geriausio perjungimo laiko priklausomybė nuo nuostato signalo ir apkrovos

Apskaičiuojami elektromechaninės sistemos parametrai, kad būtų galima juos pritaikyti imitaciniame MATLAB/SIMULINK modelyje.



Inkaro srovės reguliavimo kontūro perdavimo funkcija:

$$H_{KOul}(s) = \frac{k_I^{-1}}{2 \cdot T_K \cdot s + 1} = \frac{5,184}{2 \cdot 0,01s + 1}; \quad (4.2)$$

čia  $T_K$  – galios keitiklio laiko pastovioji.

Grįžtamųjų ryšių kanalai suderinami taip, kad grįžtamojo ryšio signalai būtų lygūs 10 V, matuojamajai koordinatei pasiekus savo maksimalią reikšmę. Todėl srovės kontūro grįžtamojo ryšio koeficientas:

$$k_I = \frac{10}{I_{\max}} = \frac{10}{4 \cdot I_N} = 0,172; \quad (4.3)$$

Variklio mechaninės dalies perdavimo funkcija:

$$H_M(s) = \frac{C \cdot \Phi}{J \cdot s} = \frac{M_N / I_N}{J \cdot s} = \frac{20 / 14,5}{0,02s} = \frac{68,96}{s}; \quad (4.4)$$

Tenkinant kiekybinio optimumo kriterijų greičio reguliatoriaus perdavimo funkcija:

$$H_{KO\Omega}(s) = \frac{k_I}{C \cdot \Phi \cdot k_{\Omega}} \cdot \frac{J}{4 \cdot T_K} = \frac{0,172 \cdot 0,02}{1,379 \cdot 0,0503 \cdot 4 \cdot 0,01} = \frac{0,0034}{0,0027745} = 1,24; \quad (4.5)$$

Greičio kontūro grįžtamojo ryšio koeficientas:

$$k_{\Omega} = \frac{10}{\omega_{\max}} = \frac{10}{n_{\max} / 9,55} = 0,0503; \quad (4.6)$$

Tenkinant simetrinio optimumo kriterijų, greičio reguliatoriaus perdavimo funkcija:

$$H_{SO\Omega}(s) = k_{P\Omega} + \frac{k_{P\Omega}}{8 \cdot T_K \cdot s} = 1,24 + \frac{1,24}{8 \cdot 0,01s} = 1,24 + \frac{15,5}{s}. \quad (4.7)$$

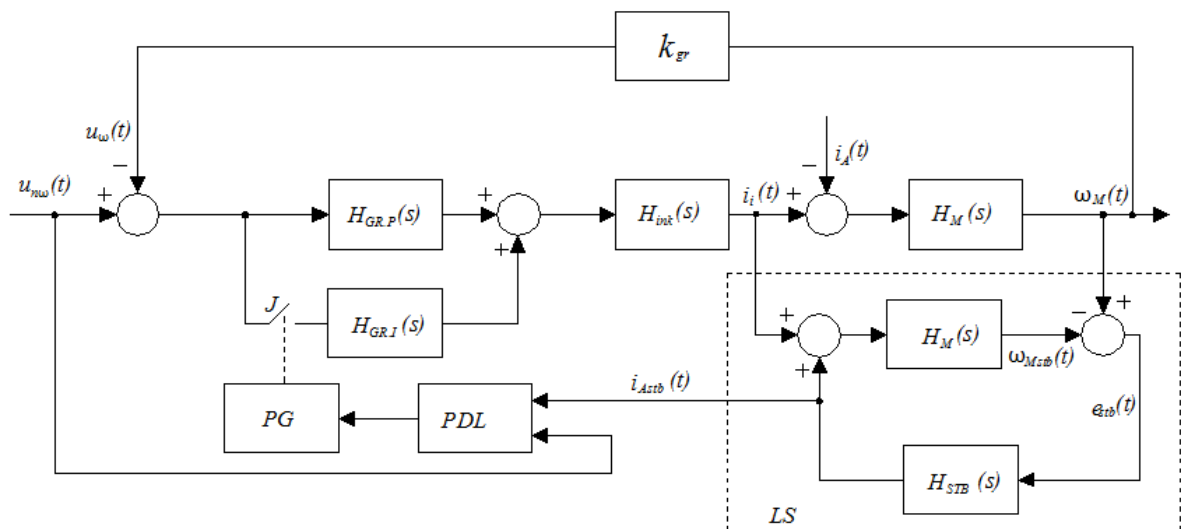
## 4.2. Elektromechaninės realizuotos sistemos su keičiamos struktūros regulatoriumi ir Luenbergerio stebikliu modelio sudarymas

Realizuoti automatinį greičio regulatoriaus struktūros perjungimą galima keletu metodų. Kaip jau buvo minėta 1 skyrelyje realizavimas gali būti atliekamas panaudojant *Fuzzy* logika pagrįsta valdymo metodą, arba programuojamąją duomenų lentelę *Lookup table* pagrįsta valdymo metodą. Pastarasis metodas ir panaudotas šiame darbe.

Nuolatinės srovės realizuotos elektromechaninės greičio stabilizavimo sistemos su keičiamos struktūros regulatoriumi struktūrinė schema pateikta 4.2 pav., kurioje statinės apkrovos nustatymui pritaikytas Luenbergerio stebiklis.

Luenbergerio stebiklis – tai matematinės struktūros įtaisas skirtas sistemos kintamųjų ar kitų parametru įvertinimui. Stebikliai yra taikomi kai tiesiogiai išmatuoti sistemos parametrus yra sudėtinga ar visiškai neįmanoma [16]. Toks parametras elektromechaninėje sistemoje yra apkrovos srovė.

Elektromechaninę sistemą (4.2 pav.) sudaro grįžtamojo ryšio koeficientas –  $k_{gr}$ , keičiamos struktūros regulatorius, galintis formuoti proporcinį –  $H_{GR.P}(s)$  ir integralinį –  $H_{GR.I}(s)$  reguliavimo dėsnius. Valdymo objektą išreiškia inkaro grandinės perdavimo funkcija –  $H_{ink}(s)$  ir variklio mechaninė dalis –  $H_M(s)$ .  $H_{STB}(s)$  – Luenbergerio stebiklio (*LS*) perdavimo funkcija.



4.2 pav. Nuolatinės srovės realizuotos elektromechaninės greičio stabilizavimo sistemos su keičiamos struktūros regulatoriumi ir Luenbergerio stebikliu struktūrinė schema

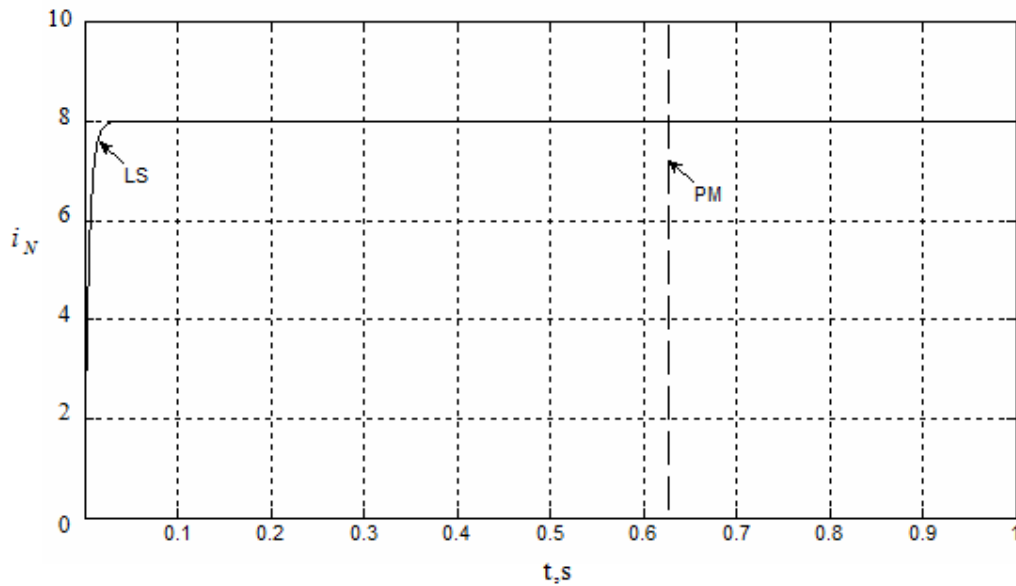
Greičio stabilizavimo sistemoje veikiant įėjimo signalui  $u_{n\omega}$  ir esant įjungtam tik proporciniam regulatoriaus valdymo kanalui bei sistemą veikiant nustatytai statinei apkrovai  $i_A$  gaunamas sistemos išėjimo greičio  $\omega_M$  statinis nuokrypis. Kad pašalinti sistemos statinį nuokrypį, tam tikru laiko  $t$  momentu automatiškai, pagal programuojamos duomenų lentelės *PDL* rezultatus, perjungimo grandis *PG* įjungia integralinį regulatoriaus kanalą, nes pastoviai įjungtas integruojantis regulatoriaus kanalas sukelia nepageidaujamo dydžio sistemos dinaminį nuokrypį. Taip automatiškai perjungiant regulatoriaus kanalus iš proporcinio į proporcinį integruojantį gaunamos geriausios kokybės greičio pereinamojo proceso kreivės.

4.2 pav. į vieną iš Luenbergerio stebiklio įėjimų paduodama inkaro srovė  $i_l$ . Stebiklio grandis  $H_M(s)$  yra identiška greičio valdymo sistemos mechaninei daliai –  $H_M(s)$ . Stebiklio paklaida  $e_{stb}(t)$  suformuojama tarp realaus variklio greičio  $\omega_M$  ir gaunamo variklio greičio stebiklyje  $\omega_{Mstb}$  skirtumo. Stebiklio kompensatorius (naudojamas stebiklyje gaunamos paklaidos sumažinimui) aprašomas perdavimo funkcija [16]

$$H_{STB}(s) = k_{STB}; \quad (4.8)$$

čia  $k_{STB}$  – stebiklio stiprinimo koeficientas, kuris nagrinėjamu atveju buvo parinktas  $k_{STB} = 3$ .

Siekiant, kad programuojamoji duomenų lentelė parinktų tinkamą regulatoriaus perjungimo laiką, reikalinga gauti statinės apkrovos vertę anksčiau nei įvyksta regulatoriaus valdymo dėsnio perjungimas. Iš 4.3 pav. akivaizdu, kad gauta statinės apkrovos srovė Luenbergerio stebiklyje pasiekia nusistovėjusią vertę kur kas anksčiau nei įvyksta perjungimas iš P valdymo dėsnio į PI (0,623s). Taigi šis statinės apkrovos srovės signalas yra tinkamas perduoti iš Luenbergerio stebiklio į programuojamąją duomenų lentelę. Perjungimo momentą vaizduoja PM kreivė.



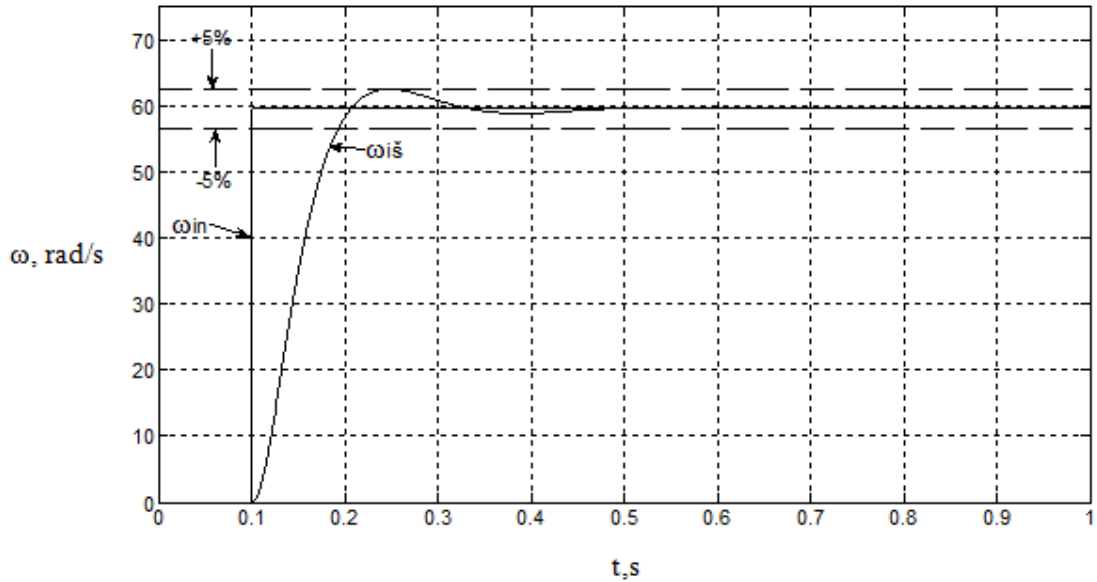
4.3 pav. Statinės apkrovos srovės kreivė gaunama Luenbergerio stebikliu

Pagal struktūrinę schemą (4.2 pav.) sudarytas elektromechaninės greičio stabilizavimo sistemos su keičiamos struktūros reguliatoriumi ir Luenbergerio stebikliu imitacinis modelis kompiuterine MATLAB/SIMULINK programa (4.4 pav). Imitacinio modelio sistemą sudaro: valdymo signalo grandis, šioje grandyje nustatoma greičio signalo vertė. Keičiamos struktūros reguliatorius sudarytas iš proporcinės ir integruojančios dalies, valdymo dėsnio perjungiklio, grandies sudarytos iš programuojamos duomenų lentelės „Lookup Table (2-D)“, skirtos automatiškam geriausio perjungimo laiko momento parinkimui pagal statinės apkrovos ir nuostato signalo vertes. Variklį sudaro vidinis srovės valdymo kontūras ir variklio mechaninė dalis. Luenbergerio stebiklis sudarytas iš stiprinimo ir variklio mechaninės perdavimo funkcijų ir yra skirtas statinei apkrovai nustatyti. Modelį taip pat sudaro leistinų ribų nustatymo kontūras, kontūras skirtas reguliavimo trukmės vertėms stebėti, grįžamojo ryšio grandys, kontūras skirtas gaunamoms pereinamojo proceso kreivėms vizualizuoti.

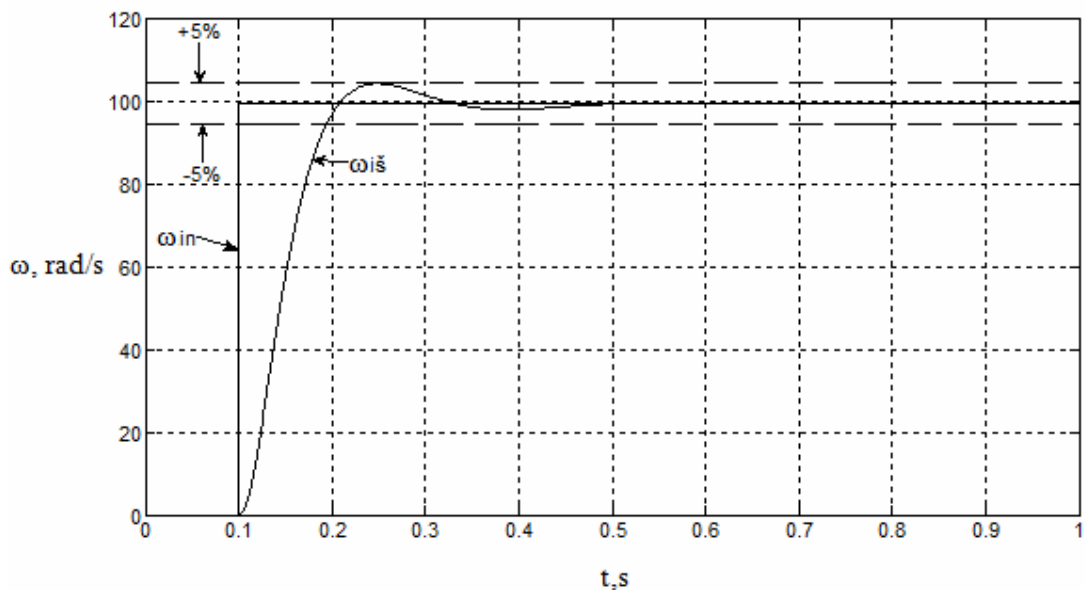


### 4.3. Elektromechaninės sistemos modeliavimo rezultatai

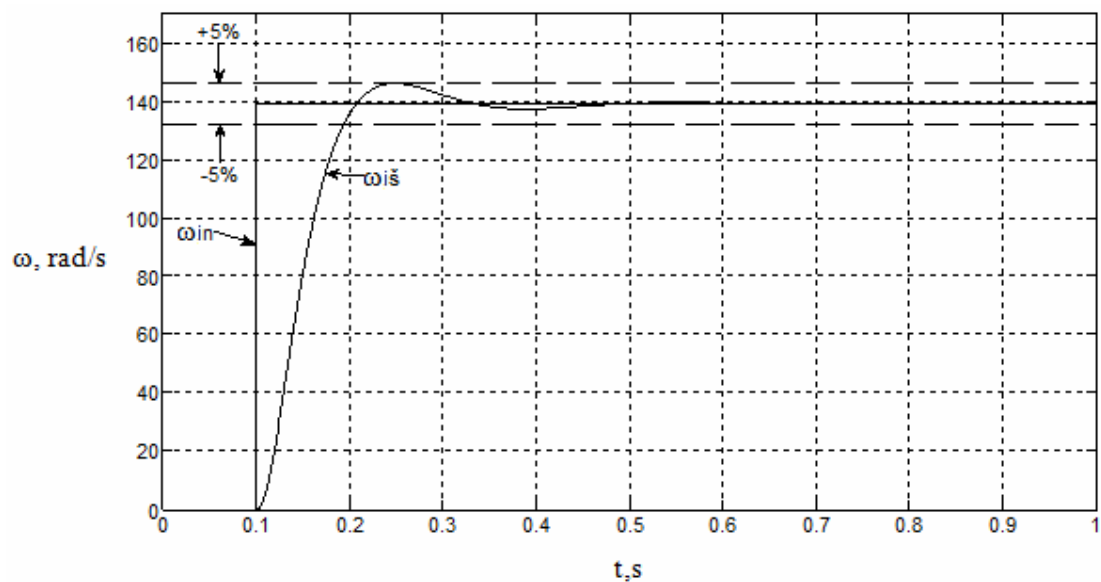
Elektromechaninės sistemos su keičiamos struktūros regulatoriumi ir Luenbergerio stebikliu gautos pereinamojo proceso greičio kreivės pateiktos 4.5 – 4.8 pav. Šios kreivės yra gautos prie skirtingų apkrovos ir greičio nuostato verčių ir visos jos užtikrino mažiausią reguliavimo trukmės vertę – geriausią sistemos dinamikos kokybę. Visame apkrovos ir greičio nuostato kitimo intervale greičio dinaminis nuokrypis neviršija 5% ir nėra greičio statinio nuokrypio.



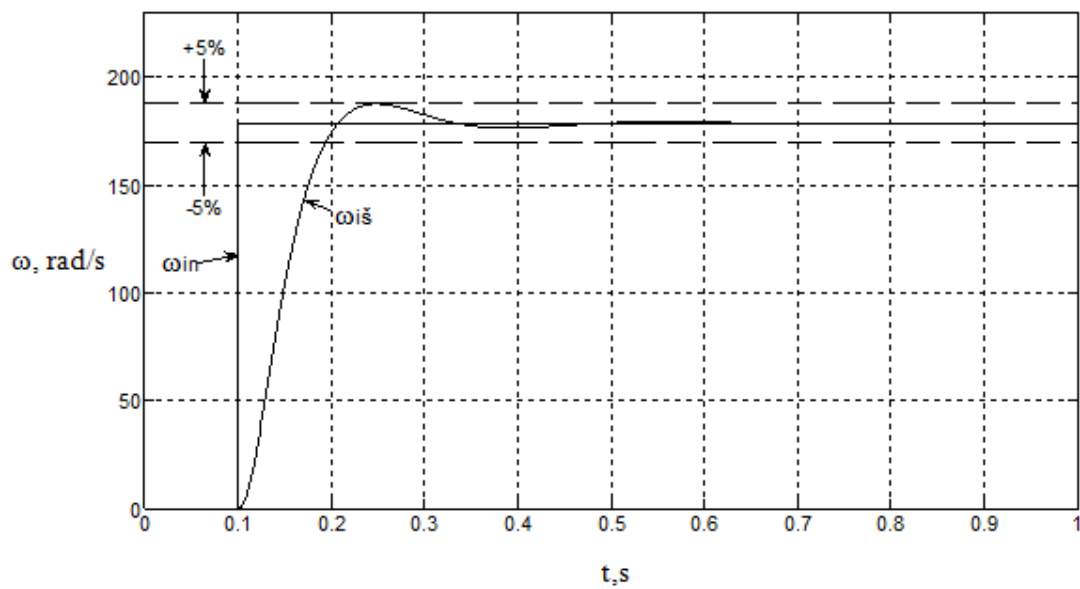
4.5 pav. Greičio pereinamojo proceso kreivės, kai  $U_{in} = 3V$ . Statinė apkrova 2A.



4.6 pav. Greičio pereinamojo proceso kreivės, kai  $U_{in} = 5V$ . Statinė apkrova 4A.



4.7 pav. Greičio perinamojo proceso kreivės, kai  $U_{in} = 7V$ . Statinė apkrova 6A.



4.8 pav. Greičio perinamojo proceso kreivės, kai  $U_{in} = 9V$ . Statinė apkrova 8A.

## IŠVADOS

1. Remiantis dinamikos kokybės rodikliu – reguliavimo trukme, nustatyta geriausią elektromechaninės greičio stabilizavimo sistemos dinamikos kokybę užtikrinanti reguliatoriaus perjungimo parametro priklausomybė nuo nuostato signalo vertės ir statinės apkrovos. Atliktų tyrimų rezultatai rodo, kad didėjant sistemos statinei apkrovai greičio reguliatoriaus valdymo dėsnio perjungimo iš P į PI laikas mažėja. Tuomet kai didėjant greičio nustatymo signalui (įėjimo signalui) greičio reguliatoriaus valdymo dėsnio perjungimo iš P į PI laikas didėja.
2. Elektromechaninės sistemos statinės apkrovos nustatymui pereinamojo proceso metu pritaikytas Luenbergerio stebiklis sudarius jo modelį MATLAB/SIMULINK programa. Sumodeliuotas Luenbergerio stebiklis buvo sėkmingai pritaikytas statinės apkrovos nustatymui nuolatinės srovės elektros pavarai imituojant automatinį greičio reguliatoriaus valdymo dėsnio perjungimą iš P į PI.
3. Atliktų tyrimų rezultatai – reguliatoriaus perjungimo parametro priklausomybė nuo nuostato signalo vertės ir statinės apkrovos yra universalūs ir buvo sėkmingai pritaikyti nuolatinės srovės elektros pavarai pasinaudojus programuojama lentele (Lookup table) imituojant automatinį greičio reguliatoriaus valdymo dėsnio perjungimą iš P į PI MATLAB/SIMULINK programa.



## LITERATŪRA

1. Geleževičius, V. Kriščiūnas, K. Kubilius, V. Elektros pavarų valdymo sistemos. Vilnius, Mokslas, 1990. – 360 p.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Geleževičius, V.A. Dvikoordinatės vykdyto sistemos. Kaunas, Technologija, 1997: p.47-51.
6. N. Šulčius. Kintamos struktūros greičio reguliatoriaus realizavimo elektromechaninėje vykdyto sistemoje tyrimas. Jaunųjų mokslininkų darbai. 2009, nr.3(24). ISSN 1648-8776 p.132-136.
7. Geleževičius V A., Šulčius N., 2009, Dynamical Quality Improvement of Mechatronic Servo System Using Variable Structure Velocity Controller. *Information Technology and Control*. Vol. 38. No. 1.P. 38-42.
8. 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.
9. N. Šulčius. Mechatroninių vykdyto sistemų valdymas kintamos struktūros reguliatoriais. Daktaro disertacija. Kauno technologijos universitetas, Kaunas, 2008, p. 98.
10. N. Šulčius. A.Mikulskis. Proporcinio – Proporcinio Integruojančio kintamos struktūros greičio reguliatoriaus tyrimas. Jaunųjų mokslininkų darbai. 2009, nr.3(24). ISSN 1648-8776 p.137-141.
11. A. Mikulskis., Kintamos struktūros reguliatorių taikymo elektromechaninėse vykdyto sistemose tyrimas. *Magistro darbas*. Šiaulių universitetas. 2009. – 52 p.
12. A. Dambrauskas, V. Rinkevičius. Stochastinių automatinio valdymo sistemų algoritminė sintezė // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2005. – Nr. 7(63). – P. 49–52.

13. A. Dambrauskas, B. Karaliūnas, D. Šulskis. Kintamos struktūros valdymo sistemos su koordinačių apribojimais sintezė // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2008. – Nr. 4(84). – P. 31–34.
14. A. Dambrauskas, B. Karaliūnas, D. Šulskis. Sinchroninio generatoriaus adaptyviosios žadinimo reguliavimo sistemos sintezė // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas : Technologija, 2003. – Nr. 5(47). – P. 31-37.
15. R.J. Lapè. Automatinio reguliavimo teorija. 2001.
16. 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.