



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Karolis Raišelis

PROCESŲ SU ŽYMIU VĖLAVIMU VALDYMO SISTEMŲ
TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Prof. dr. Donatas Levišauskas

KAUNAS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
AUTOMATIKOS KATEDRA

PROCESŲ SU ŽYMIU VĖLAVIMU VALDYMO SISTEMŲ
TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas
Valdymo technologijos (621H66001)

Vadovas

Prof. dr. Donatas Levišauskas

Recenzentas

doc. K. Brazauskas

Projektą atliko

Karolis Raišelis

KAUNAS, 2017



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS

(Fakultetas)

Karolis Raišelis

(Studento vardas, pavardė)

Valdymo technologijos (621H66001)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

PROCESŲ SU ŽYMIU VĖLAVIMU VALDYMO SISTEMŲ TYRIMAS

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 _____ m. _____ d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano Karolio Raišelio baigiamasis projektas tema „Procesų su žymiu vėlavimu valdymo sistemų tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Raišelis, Karolis. Procesų su žymiu vėlavimu valdymo sistemų tyrimas. Valdymo sistemų magistro baigiamasis darbas. Vadovas prof. dr. Donatas Levišauskas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Automatikos katedra.

Mokslo kryptis ir sritis: Elektros ir elektronikos inžinerija, Technologiniai mokslai

Reikšminiai žodžiai: reguliavimas, PI, PID, Smith prediktorius, statistikinis įvertinimas, laiko vėlavimas.

Kaunas, 2017. 49 p.

Santrauka

Darbo tikslas – imitacinio modeliavimo būdu ištirti procesus su žymiu vėlavimu automatinio valdymo sistemose.

Magistro baigiamajame darbe atliktas procesų su žymiu vėlavimu valdymo sistemų tyrimas. Tyrimas atliktas imitacinio modeliavimo būdu Matlab/Simulink aplinkoje. Procesams modeliuoti naudojami perdavimo funkcijos modeliai, kuriuose laiko vėlavimo trukmė labai didelė lyginant su atstojamąja laiko pastoviaja. Darbe ištirtas vienkantūrių valdymo sistemų veikimas, buvo naudojami standartiniai PI, PID reguliatoriai, bei laiko vėlavimo kompensavimo sistema. Pateiktas pereinamųjų procesų kokybės rodiklių statistikinis įvertinimas.

Pateiktos valdymo sistemų reakcijos kreivės, pereinamųjų procesų kokybės rodikliai ir jų statistikinis įvertinimas. Darbo rezultatai apibendrinti išvadose.

Raišelis, Karolis. Control of processer with time delays. Master's control system finishing project thesis. Supervisor assoc. doc. dr. Donatas Levišauskas. Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of automation.

Research area and field: Electrical and Electronics Engineering, Technological Sciences

Key words: regulation, PI, PID, Smith prediktor, statistical description, time delay.

Kaunas, 2017. 49 p.

Summary

The main goal of research -to simulate and investigate the processes of automatic management systems with significant automatic delays.

In master's final work, is investigation of managing systems with significant time delays. Investigation was done by simulation carried out in the environment of Matlab/Simulak. To model the processes, transmission functions in which time delay duration is much greater, than in comparison with the resultant steady of time were used. Work consists of investigation of operation in-one management systems. Standard PI, PID, regulators and time delay-compensating system, were used. Final work consists of quality evaluation of statistical indexes of transitional processes.

Research presents management system response curves, transitional processes quality indexes and their statistical evaluation. Research findings are summarized in the evaluation:

Turinys

Santrauka	4
Summary.....	5
Turinys.....	6
Įvadas.....	7
1. Teorinė dalis	8
1.1 Valdymo procesas su vėlavimu	8
1.2 Proceso modelis	9
1.3 PID reguliatorius.....	10
1.4 Smito prediktorius.....	13
2. Tiriamoji dalis	15
2.1 Perdavimo funkcijų identifikavimas iš šuolinės reakcijos kreivės C.L.Smith'o metodu	15
2.2 PI ir PID reguliatorių derinimas.....	19
2.3 Laiko vėlavimo kompensavimo sistema.....	28
2.4 Kokybės rodiklių nustatymas.....	36
2.5 Statistinis pereinamųjų procesų kokybės rodiklių įvertinimas	38
Išvados:.....	43
Literatūros sąrašas	44
Priedai.....	46

Įvadas

Šiuolaikiniame gyvenime didelė dalis butyje ir pramonėje naudojamų modernių įrenginių yra apibrėžiami kaip automatizuotos valdymo sistemos. Tokių valdymo sistemų veikimo principas yra toks, kad joms užduodama norimas tikslas ir šie įrenginiai bando jį įvykdyti. Automatizuotose valdymo sistemose vienas iš pagrindinių uždavinių yra efektyvus sistemų valdymas, t.y. užsibrėžto tikslo siekimas kuo mažesniais sąnaudomis (pavyzdžiui, mažesnio elektros energijos ar medžiagų sunaudojimo), todėl labai svarbu tokioms valdymo sistemoms parinkti tinkamus reguliatorius ir suderinti jų parametrus, kad būtų pasiektas priimtinas tokių sistemų valdymas.

Nemaža dalis valdomų technologiniu procesų turi laiko vėlavimus, t.y. sistemas veikia uždelsimai, dėl kurių valdomo objektų specifinės dinaminės savybės įtakoja valdymo sistemų kokybę. Dėl šių laiko vėlinimų yra nepakamai greitas reguliavimas, ar net dideli perreguliavimai.

Šiame baigiamojo magistro projekte bus bandoma skirtingais reguliavimo metodais tirti procesus su žymiu vėlavimu automatinio valdymo sistemose. Visiems gautiems rezultatams bus nustatomi kokybės rodikliai ir atliekamas statistikinis kokybės rodiklių įvertinimas.

1. Teorinė dalis

1.1 Valdymo procesas su vėlavimu

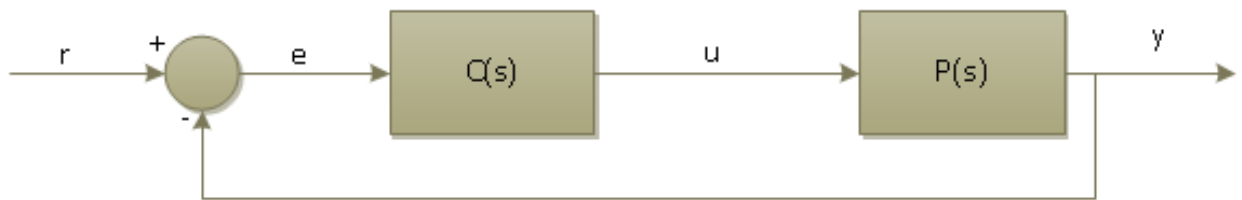
Šiuolaikinėje visuomenėje, energijos taupymas yra svarbi tema, tiek dėl ekonominių, tiek dėl aplinkosaugos priežasčių. Kuro kainos didėja, todėl įmonės peržiūri savo energijos poreikius ir ieško kur sumažinti išlaidas. Tuo pačiu metu, teisės aktai liepia įmones investuoti į įrangą, kuri yra daugiau veiksmingesnė ir ekonomiškesnė. Valdymo optimizavimas yra viena sritis, kurioje nedidelė investicijų vertė gali sumažėti energijos paklausą be jokių naujų įrenginių.

Inžinerijos kompanija Solvina atrado problemų esamoje įrenginių gamyboje, garo cheminiuose procesuose. Per metus, įrenginių naudingumas buvo pakeistas ir atnaujintos galimybės gaminant garą skirtingais etapais. Paskutinės investicijos buvo dujų turbina su kuro degimo galimybėmis. Jų tikslas yra gaminti ne daugiau garo negu būtina, ir norint pasiekti šį tikslą reikia sudeginti kuo mažiau kuro ir padaryti automatiškai kontroliuojama sistemą. Dabartinė kontrolės konfigūracijos rezultatai, nestabili kontrolė po degimo, kurią reikia išspręsti, nes dėl šio valdymo vėlavimo yra gaminamas garo perteklius, todėl gaunamos didesnės degalų paklausos, nei būtina. Alternatyvus sprendimas yra pagreitinti valdymą, todėl laikotarpiu po degimo reaguos lėčiau į pasikeitusią garo paklausą.

Problema kyla iš ilgų laiko konstantų ir didelių laiko vėlinimų, todėl procesą pasidaro sunku kontroliuoti. PI ir PID reguliatoriai yra dažniausi valdikliai naudojami pramonėje, nes šių valdiklių lengvas valdymas. Daugiau kitokių pažangių valdiklių retai naudojami, nes atsiranda didelių sunkumų apibūdinti proceso modelį. Tačiau dažnai kontroliuojamus parametrus tokius kaip: srautas, slėgis ir temperatūra dažnai gana lengva apibūdinti su paprasta perdavimo funkcija. Elektriniams ir mechaniniams procesams modelis gaunamas lengviau ir greičiau. Šioje srityje problemos su žymiais laiko vėlavimais dažnai sprendžiamos naudojant smito prediktorių, kai modelis prognozuoja teisingą vertę po uždelsimu, todėl sumažina perreguliuojimus ir netikslumus, kaip PI ir PID reguliatoriai su tokiais vėlavimais daug sunkiau susitvarko. Kitas skirtumas nuo skysčių / šiluminių procesų ir elektrinis / mechaninių procesų yra tai, kad skystis / šiluminiai procesai dažnai turi didesnę klaidą išmatuotą kintamojo dėl mažiau tikslios matavimo įrangos. Kuo mažiau tiksli matavimo įranga, tuo didesnis gaunamas triukšmo veiksnys, kuris gali padaryti procesą sunkiau kontroliuojamą.

1.2 Proceso modelis

Teorija reikalinga kontroliuoti procesus su didelėmis laiko konstantomis ir ilgais laiko uždelsimais. Pirmame paveiksle yra pavaizduota paprasčiausias ir pagrindinis būdas kaip yra valdomi procesai su laiko vėlavimais. Paveiksle yra reguliatorius $C(s)$, kuris kontroliuoja procesą $P(s)$. Proceso išėjimas y yra matuojamas ir naudojamas grįžtamasis ryšys prie valdiklio. Yra ir kitų būdų kontroliuoti procesus, tačiau tai yra labiausiai paplitusi struktūra, kuri naudojama industrijos pramonėje.[10]



1.1 pav. Struktūrinė schema valdymo su grįžtamoju ryšiu.

Paprastas procesas su realiais proceso duomenimis dažnai turi vieną dominuojantį kintamąjį. Kai tai atsitinka perdavimo funkcijos modelyje, tada dažnai galima prognozuoti naudojant eksperimentinius duomenis, siekiant nustatyti pirmos eilės modelį su laiko vėlavimais.

$$P(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{K}{1 + sT} e^{-s\tau_d} \quad (1)$$

Konstantos yra nustatomos pagal eksperimento darbinis taškus. Proceso stiprinimo koeficientas K yra nustatomas iš y pasiskirstymo ir jo pokyčio. Laiko konstanta T yra proceso laikas, pasiektas 63% iš galutinės y vertės atėmus laiko vėlavimą. Laiko vėlavimas τ_d , tai proceso laikas užtrukęs reaguoti į įvesties žingsnio pokyčius. Laiko vėlavimas išreikštas:

$$P_d(s) = e^{-s\tau_d} \quad (2)$$

Galutinis perdavimo funkcijos modelis naudojamas apibūdinti procesą su didelėmis laiko konstantomis ir dideliais laiko vėlavimais, formą:

$$P(s) = \frac{K}{sT + 1} \cdot \frac{1}{s\tau_d + 1} \cdot \frac{12 - 6s\tau_d + (s\tau_d)^2}{12 + 6s\tau_d + (s\tau_d)^2} \quad (3)$$

1.3 PID reguliatorius

PID reguliatorius – tai plačiausiai šiuolaikinėse valdymo sistemose naudojamas reguliatorius. Šis reguliatorius sugeba mažinti paklaidą tarp išmatuoto proceso kintamojo ir siekiamo lygio, apskaičiuodamas kitai iteracijai reikalingą valdymo signalą, kad esamo lygio reikšmės artėtų prie norimo lygio reikšmiu. Klasikinis PID reguliatorius sudarytas iš 3 grandžių: proporcinės (P), integruojančios (I) ir diferencijuojančios (D).

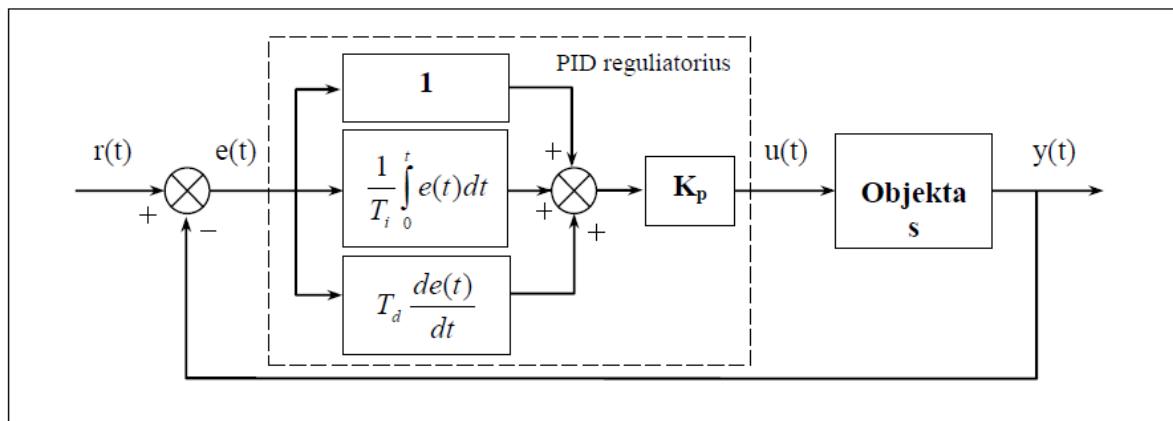
Tarkime, kad:

- $u(t)$ - valdymo signalas;
- $r(t)$ - užduoties (norimas) signalas;
- $y(t)$ - išėjimo (esamas) signalas;
- $e(t) = r(t) - y(t)$ - valdymo paklaida;
- $K = P$ - proporcinės grandies koeficientas;
- TI – integruojančios grandies laiko pastovioji;
- TD – diferencijuojančios grandies laiko pastovioji;
- T - diskretizavimo žingsnis,

Tuomet PID reguliatoriaus išraiška yra užrašoma taip:

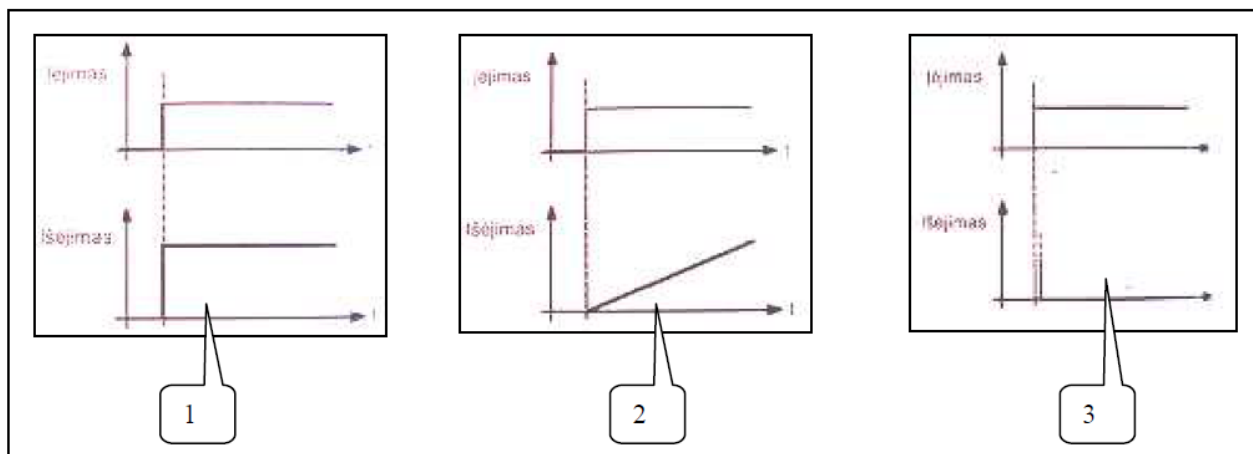
$$u(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d(\tau) + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4)$$

Objekto su PID reguliatoriumi valdymo sistema pavaizduota (1.2 pav.)



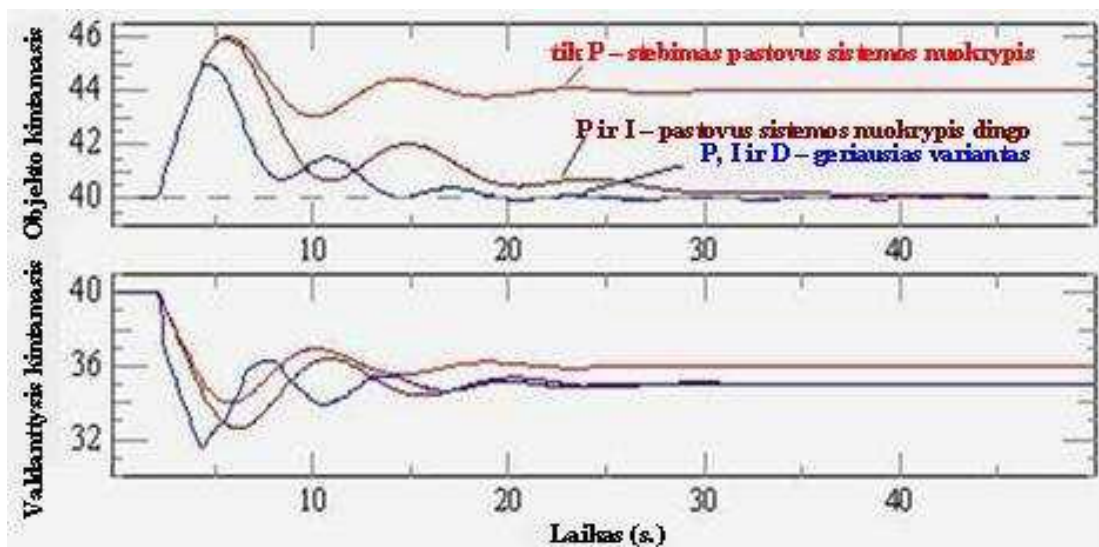
1.2 pav. Valdymo sistemos su PID reguliatoriumi schema

Geresniam PID reguliatoriaus veikimo supratimui nagrinėjamos atskiros PID reguliatoriaus komponentės: P, I ir D reguliatoriai. Proporciniame reguliatoriuje (1.3 pav. 1) valdančiojo kintamojo išėjimas yra proporcingas sistemos nuokrypiui. Jei sistemos nuokrypis yra didelis, tai valdančiojo kintamojo vertė taip pat yra didelė. Jei sistemos nuokrypis yra mažas, tai ir valdančiojo kintamojo vertė yra nedidelė. Kadangi, valdantysis kintamasis yra proporcingas sistemos nuokrypiui, tai bus tik tada, jei bus sistemos nuokrypis. Dėl šios priežasties vien proporciniu valdikliu negalima pasiekti, kad sistemos nuokrypis būtų lygus 0. Tokiu atveju, nebus valdančiojo kintamojo, o tuo pačiu ir valdymo. Integruojančio veikimo reguliatorius (1.3 pav. 2) atlieka sistemos nuokrypio sudėties veiksmą laikui bėgant, t. y. integruoja jį. Jei sistemos nuokrypis yra pastovus, tai valdančiojo kintamojo reikšmė pastoviai didės, kadangi ji priklauso nuo sumos, kuri bėgant laikui didėja. Tačiau didėjant valdančiojo kintamojo vertei, sistemos nuokrypio vertė mažėja. Toks procesas tęsiasi iki tol, kol sistemos nuokrypis pasidaro lygus 0. Integruojančio veikimo reguliatoriai yra taikomi, kai norima išvengti pastoviu sistemos nuokrypiu. Diferencijuojanti grandis (1.3 pav. 3) įvertina, kokių greičiu kinta sistemos nuokrypis. Jei sistemos nuokrypis kinta greitai, tai valdančiojo kintamojo vertė yra didelė. Jei sistemos nuokrypis kinta lėtai, tai valdančiojo kintamojo vertė yra maža. Reguliatorius, kuris turi tik diferencijuojančią grandį, neturi prasmės, kadangi valdantysis kintamasis turės vertę tik tada, kai pasikeis sistemos nuokrypis.



1.3 pav. Reguliatorių P, I, D veikimo schemas

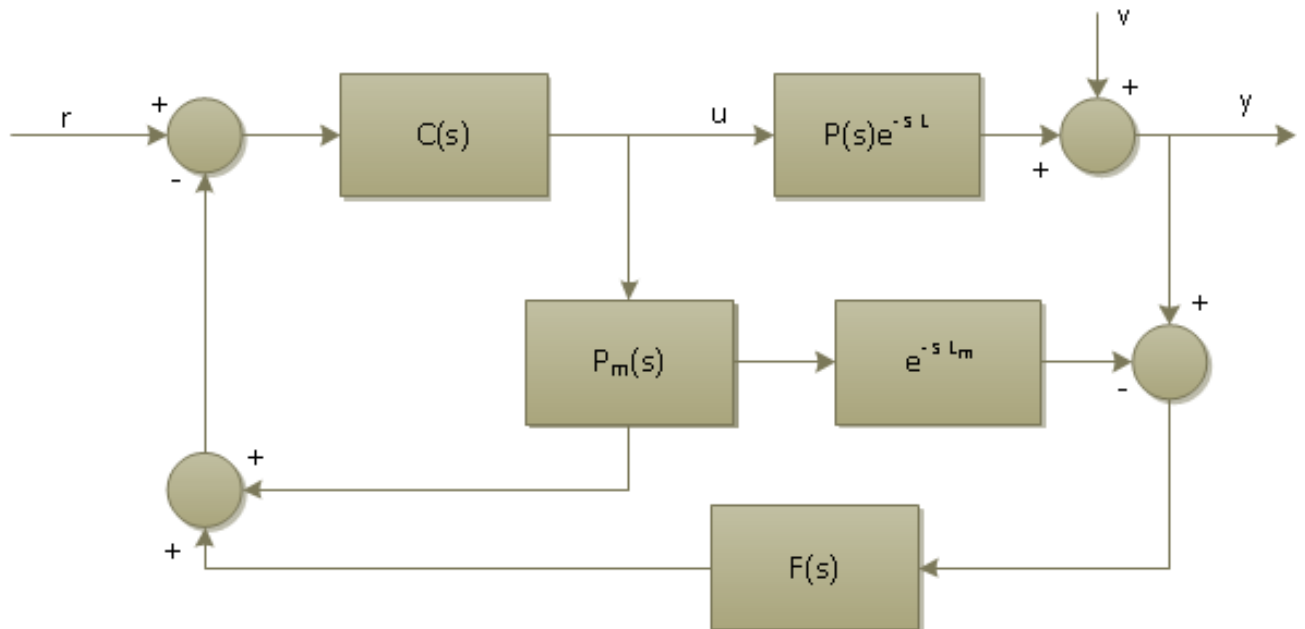
Bendruoju atveju kaip keičiasi valdymo paklaida bei valdymo signalas naudojant atskiras PID reguliatoriaus grandis ir visas kartu pavaizduojant (4 pav.).



1.4 pav. Sistemos išėjimo signalai su skirtingomis PID reguliatoriaus grandimis.

1.4 Smito prediktorius

Smito prognozės valdymo reguliatorius padeda lengviau valdyti ir kompensuoti procesus su žymiu laiko vėlavimu. Teoriškai, jei sureguliuota puikiai, tai reguliatorius pašalina sistemos sutrikimus ir pagerina sutrikimus dėl laiko uždelsimų. Jei sistemoje yra laiko uždelsimai, tai standartiniai PI(D) reguliatoriai naudoja jau pasenusius iš grįžtamojo ryšiu gautus duomenis. Jeigu modelis numatytu, kur procesas turetų būti, tada sistemose nebūtų laiko vėlavimų, valdiklis galėtų kontroliuoti procesą be perreguliavimų. Valdiklio schema su smito prediktorium pavaizduotas 1.5 paveiksle. [10]



1.5 pav. Valdymo sistema su smito prediktoriaus

Išraiška $y(s)$ forma $r(s)$ ir $v(s)$ geriausias modelis ($P(s) = P_m(s)$ ir $L = L_m$) rezultatai:

$$y(s) = \frac{C(s)P(s)e^{-sL}}{1 + C(s)P(s)}r(s) + \frac{1 + C(s)P(s)(1 - F(s)e^{-sL})}{1 + C(s)P(s)}v(s) \quad (5)$$

Filtras $F(s)$ turės tik poveikį nuo matavimų triukšmų ir aprkrovos sutrikimų $v(s)$. Jei $F(s) = e^{-s\tau}$ atsako atmetimas yra optimalus. Tai negali būti įgyvendinta, nes atsiranda laiko vėlavimas, bet aproksimavus galima gauti suderinamą sistemą:

$$e^{\tau s} \approx \frac{1 + B(s)}{1 + B(s)e^{-\tau s}}, \quad (6)$$

Kur τ yra modelio vėlavimas ir $B(s)$ žemo dažnio filtras:

$$B(s) = \frac{K_{lp}}{1 + T_{lp}s} \quad (7)$$

Kiti filtrai taip pat gali būti naudojami siekiant pagerinti stabilumą ir trikdžių kompensavimą. Pirmos eilės filtras:

$$F(s) = \frac{K_F}{1 + T_F s} \quad (8)$$

Filtruoti trikdžius atmetimo būdu:

$$F = \frac{1 + T_{F1}s}{1 + T_{F2}s} \quad (9)$$

Valdiklis sudarytas iš u ir y turi gerus rezultatus, o grįžtamasis ryšys priklauso nuo daugelio skirtingų komponentų:

$$u(s) = \frac{C(s)}{1 - F(s)C(s)P(s)e^{-sL} + C(s)P(s)}r(s) + \frac{F(s)C(s)}{1 - F(s)C(s)P(s)e^{-sL} + C(s)P(s)}y(s) \quad (10)$$

2. Tiriamoji dalis

2.1 Perdavimo funkcijų identifikavimas iš šuolinės reakcijos kreivės C.L.Smith'o metodu

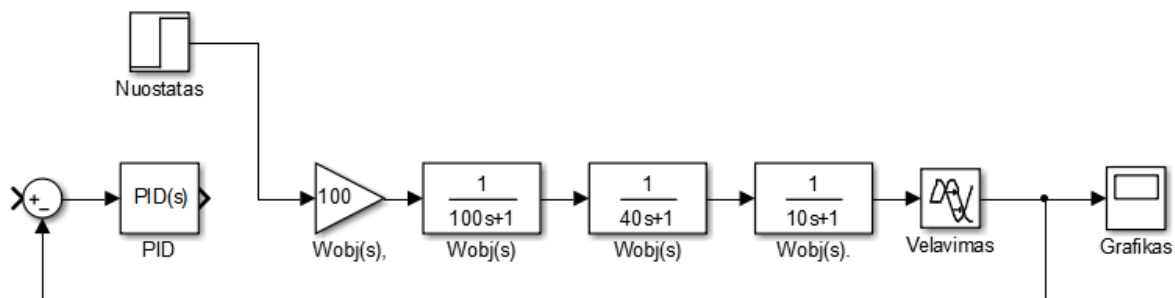
Tirti procesams su žymiu vėlavimu buvo parinkti keli perdavimo funkcijos modeliai, kuriose laiko vėlavimo trukmė labai didelė lyginant su atstojamąja laiko pastoviaja. Naudodami standartinius PI, PID reguliatorius ir Smith prediktoriaus metodu tirsime kaip funkcija seka nuostatą ir susidoroja su trikdančiu poveikiu. Žemiau pateikta perdavimo funkcija ir jos parametrai.

$$G_{pr}(s) = \frac{k_{pr} \exp(-\tau_{pr}s)}{(T_1s+1)(T_2s+1)(T_3s+1)} \quad (1)$$

2.1 lentelė. Modelio (1) parametrai

Var Nr.	Modelio parametrai			
	T ₁	T ₂	T ₃	τ _{pr}
1	100	40	10	100
2	100	20	10	120
3	100	40	5	120
4	100	20	5	100
5	100	40	5	150
6	100	20	5	130

Grafiniu C.L.Smith metodu nustatomi perdavimo funkcijos parametrai, remiantis eksperimentine šuolinės reakcijos kreive. Eksperimentas reakcijos kreivei nustatyti atliekamas atjungus sistemos reguliatorių. Schema pateikiama (2.1 pav.)



2.1 pav. Proceso reakcijos kreivei nustatyti eksperimento schema

Matuojamo proceso pokytis laiko momentu $t=0$ buvo lygus Δu , todėl naudojamos tokios formulės [1]:

Stiprinimo koeficientas K_{pr}

$$K_{pr} = \frac{y(\infty)}{\Delta u} \quad (2)$$

Laiko pastovioji T_{pr}

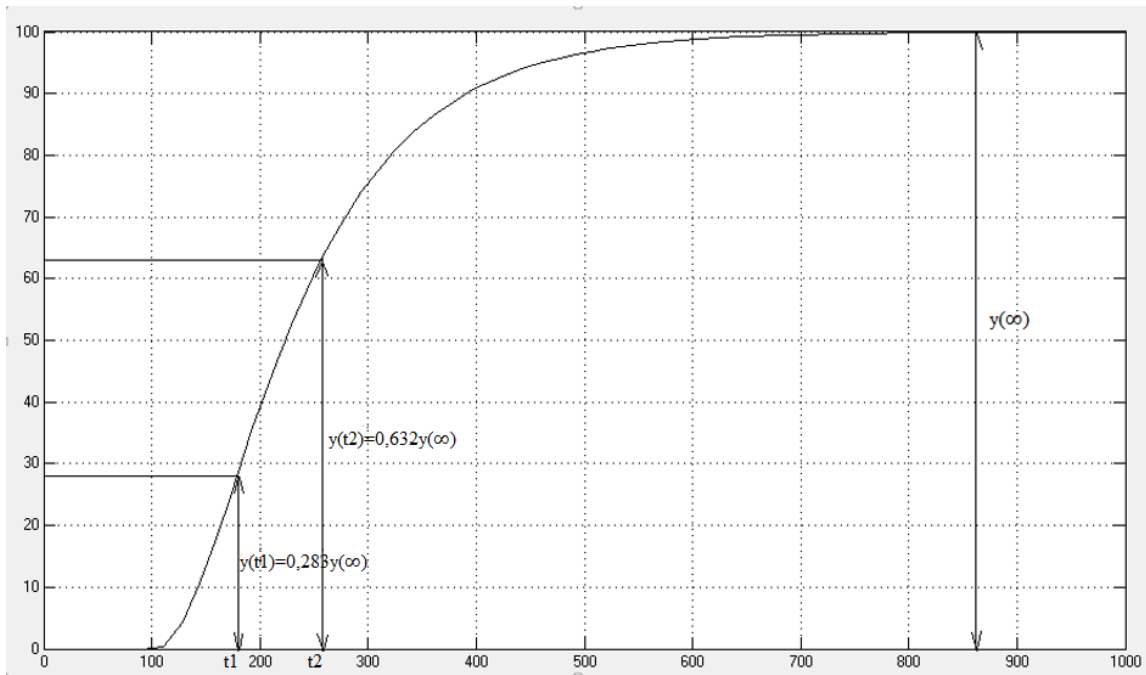
$$T_{pr} = \frac{3}{2}(t_2 - t_1) \quad (3)$$

Atstojamoji vėlavimo trukmė τ_{pr}

$$\tau_{pr} = t_2 - T_{pr} \quad (4)$$

Perdavimo funkcijai paskaičiuoti yra rekomenduojami du taškai $t_1=(\tau_{pr} + T_{pr}/3)$ ir $t_2=(\tau_{pr} + T_{pr})$. Šiuos taškus atitinka reakcijos kreivės taškai $y(t_1)=0,283*y(\infty)$ ir $y(t_2)=0,632*y(\infty)$, kuri yra pavaizduota 2.2 pav.

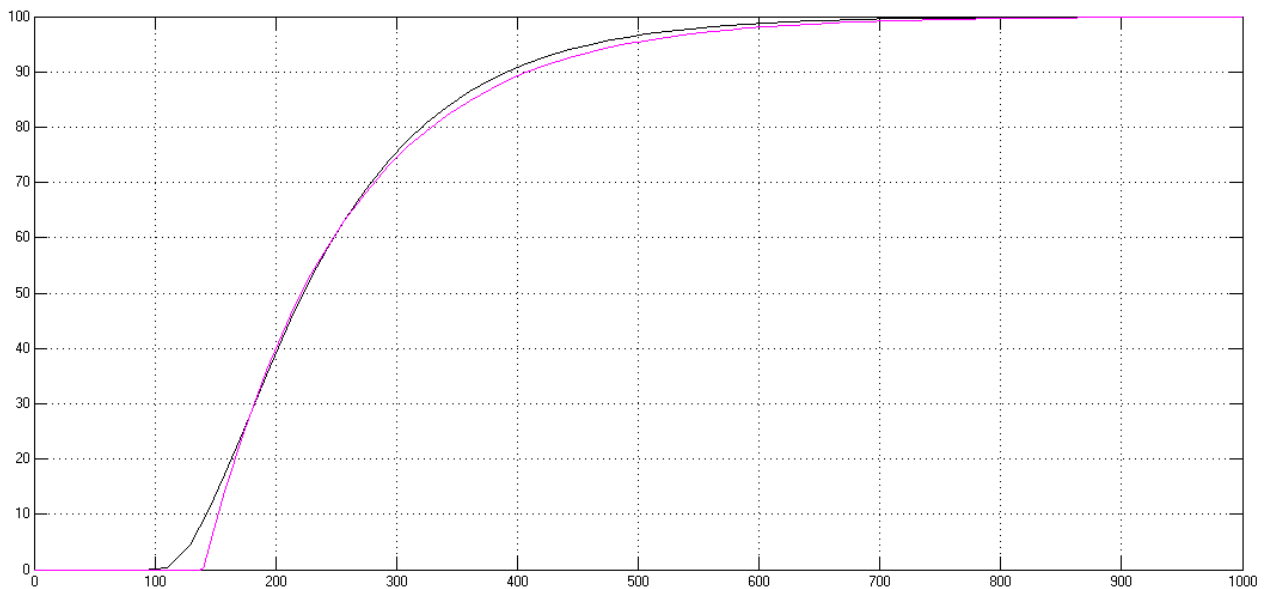
Į 2.1 pav. schemą sustatomi parinkti perdavimo funkcijos parametrai. Sustačius duomenis pagal pirmą modelio parametrų variantą gaunama šuolinės reakcijos kreivė, kuri pavaizduota 2.2 pav.



2.2 pav. Pirmosios eilės su vėlavimu modelio parametrų nustatymas iš šuolinės reakcijos kreivės Smith'o metodu

Gauti tokie perdavimo funkcijos parametrai $K_{pr} = 100$, $T_{pr} = 116,7$, $\tau_{pr} = 140,2$

2.3 pav. pateikiama aproksimuota ir šuolinė reakcijos kreivė, kuri rodo kokybiškai gautus perdavimo funkcijos parametrus.

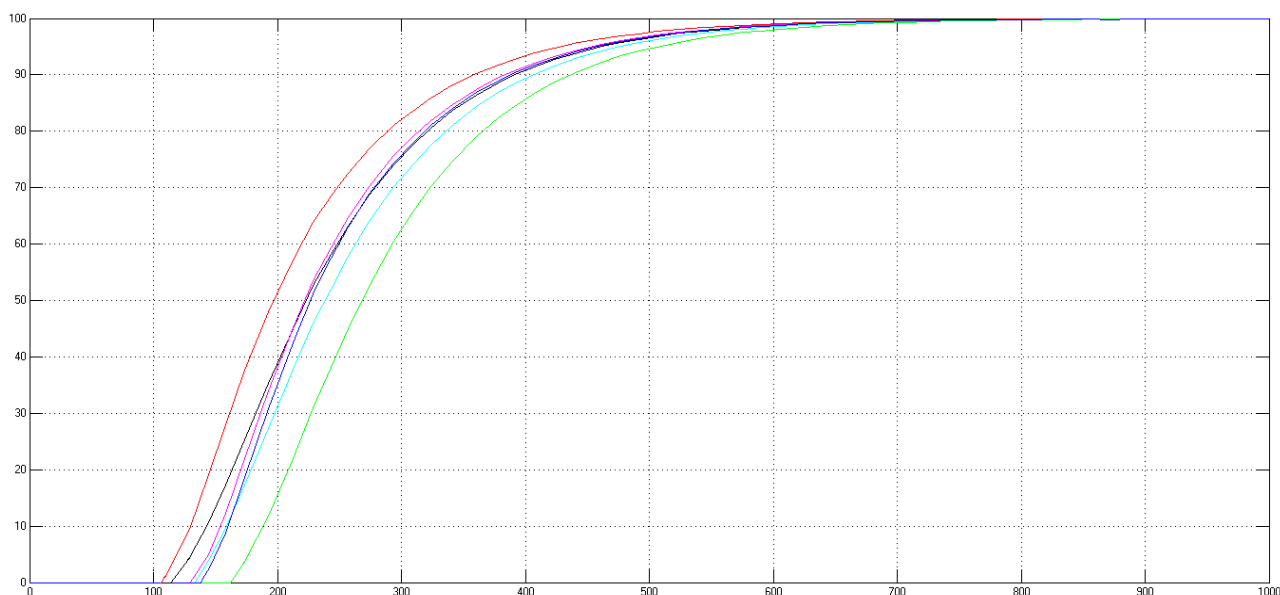


2.3 pav. Pirmosios eilės su vėlavimu ir šuolinės reakcijos kreivės

Tokiu pačiu C.L.Smith grafiniu metodu buvo gauti ir kitų modelio variantų perdavimo funkcijų parametrai. Visi gauti rezultatai pateikti 2.2 lentelėje ir reakcijos kreivės pavaizduotos 2.4 pav.

2.2 lentelė. Perdavimo funkcijos parametrai

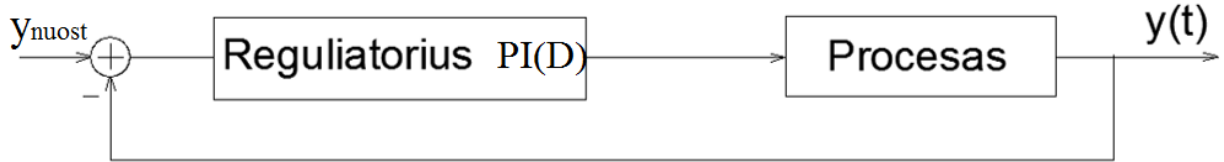
Var Nr.	Atstojamosios perdavimo funkcijos parametrai		
	K_{pr}	T_{pr}	τ_{pr}
1	100	116,7	140,2
2	100	104,25	148,75
3	100	116,8	155,15
4	100	103,8	123,8
5	100	118,5	184,7
6	100	103,8	153,8



2.4 pav. Pirmos eilės su vėlavimu aproksimuotos šuolinės reakcijos kreivės

2.2 PI ir PID reguliatorių derinimas

Valdymo sistemų su žymiu vėlavimu tyrimas buvo atliktas naudojant sistemoje PI ir PID reguliatorius.



2.5 pav. PI(D) reguliatoriaus struktūra

PI reguliatoriaus derinimas

PI reguliatoriaus derinimui buvo naudojami du skirtingi metodai, tai yra ITAE kriterijaus ir vidinio modelio valdymo (IMC) derinimo taisyklės.

Iš pradžių reguliatoriaus parametrai skaičiuojami pagal ITAE kriterijų. Naudojamos formulės, kai valdomas statinis objektas ir keičiamas nuostatas [1].

$$K_r = \frac{0,586}{K_{pr}} \left(\frac{T_{pr}}{\tau_{pr}} \right)^{0,916} \quad (5)$$

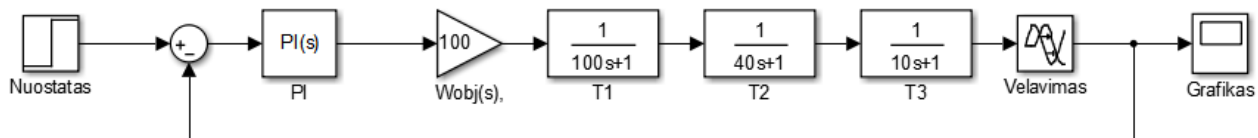
$$T_i = \frac{T_{pr}}{\left[1,03 - 0,165 \left(\frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right) \right]} \quad (6)$$

2.3 lentelė. PI reguliatoriaus parametrai (ITAE kriterijus)

Var Nr.	PI reguliatoriaus parametrai		
	K_r apskaičiuoti	K_r parinkti	T_i
1	0,0050	0,0042	140,30
2	0,0042	0,0035	131,20
3	0,0045	0,0038	144,05
4	0,0050	0,0045	124,57
5	0,0039	0,0030	153,33
6	0,0041	0,0032	132,15

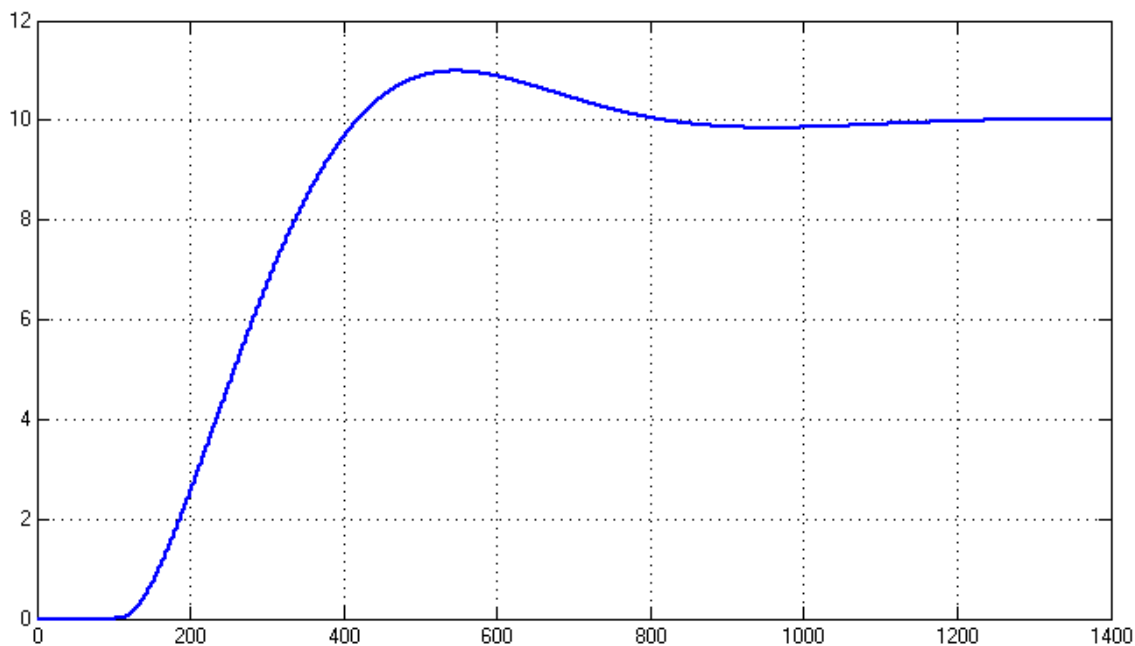
Naudojant šias formules (5) ir (6) buvo apskaičiuoti reguliatoriaus derinimo parametru nuostatai, kurie pateikti 2.3 lentelėje. Sistemą veikia didelis vėlavimas, todėl norint užtikrinti reikiamą stabilumą buvo rankiniu būdu sumažintas reguliatoriaus stiprinimo koeficientas (K_r).

PI reguliatoriaus parametrai yra įstatomi į Matlab/Simulink valdymo sistemos modelį. Modelio schema pateikiama 2.6 pav. Nuostato dydis Δu yra lygus 10.

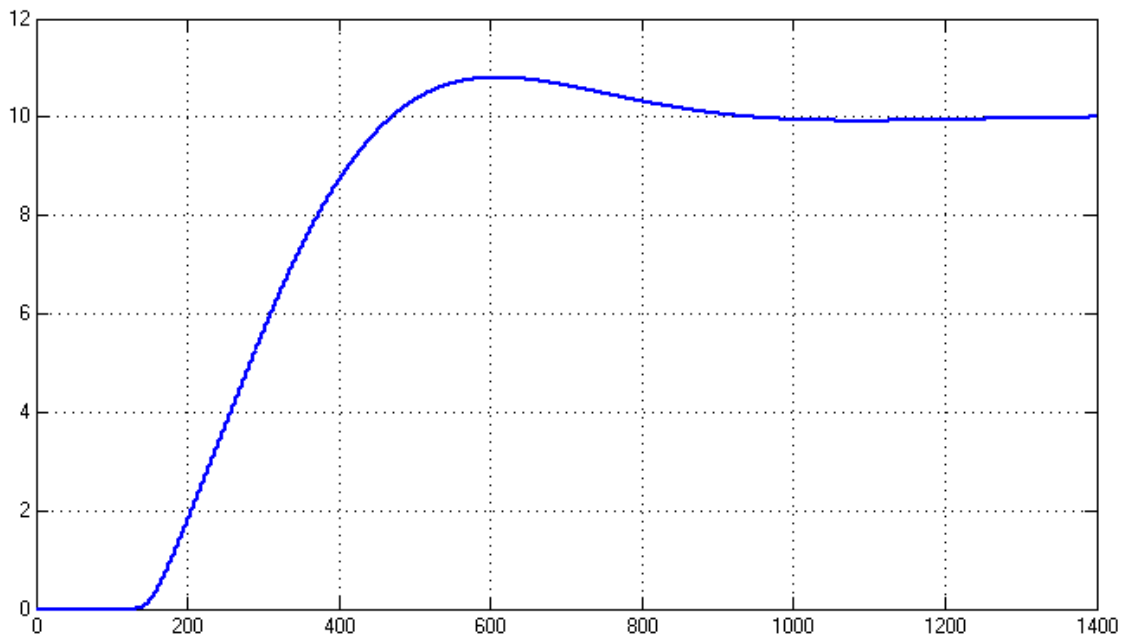


2.6 pav. Matlab/Simulink valdymo sistemos modelio schema (perdavimo funkcija Nr1.)

Pateikiama ARS šuolinės reakcijos kreivės pagal kelis varianto parametrus, buvo paimta su mažiausiu sistemos vėlavimu (2.7 pav.) ir didžiausiu (2.8pav.). Kaip matyti iš grafikų valdant sistemą su PI reguliatoriumi pradinio momentu yra stipriai matomas vėlavimas, taip pat pasiekus nuostato dydį įvyksta perreguliuavimai. Tačiau galima teigti, kad reguliatoriaus parametru apskaičiavimai atlikti gerai. Likusios 4 reakcijos kreivės yra labai panašios kaip pavaizduotos čia, dėl to likusias reakcijos kreivės sukeltos į darbo priedus.(priedas 1)



2.7 pav. Valdymo sistemos reakcija į šuolinį nuostato pokytį (ITAE, perdavimo funkcija Nr1.)



2.8 pav. Valdymo sistemos reakcija į šulinį nuostato pokytį (ITAE, perdavimo funkcija Nr6.)

Vėliau regulatoriaus parametrai skaičiuojami pagal vidinio modelio valdymo derinimo taisyklės. Naudojamos formulės, kai $T_f > 0,2\tau_{pr}$ [1].

$$K_r = \frac{T_{pr}}{K_{pr}T_f} \quad (7)$$

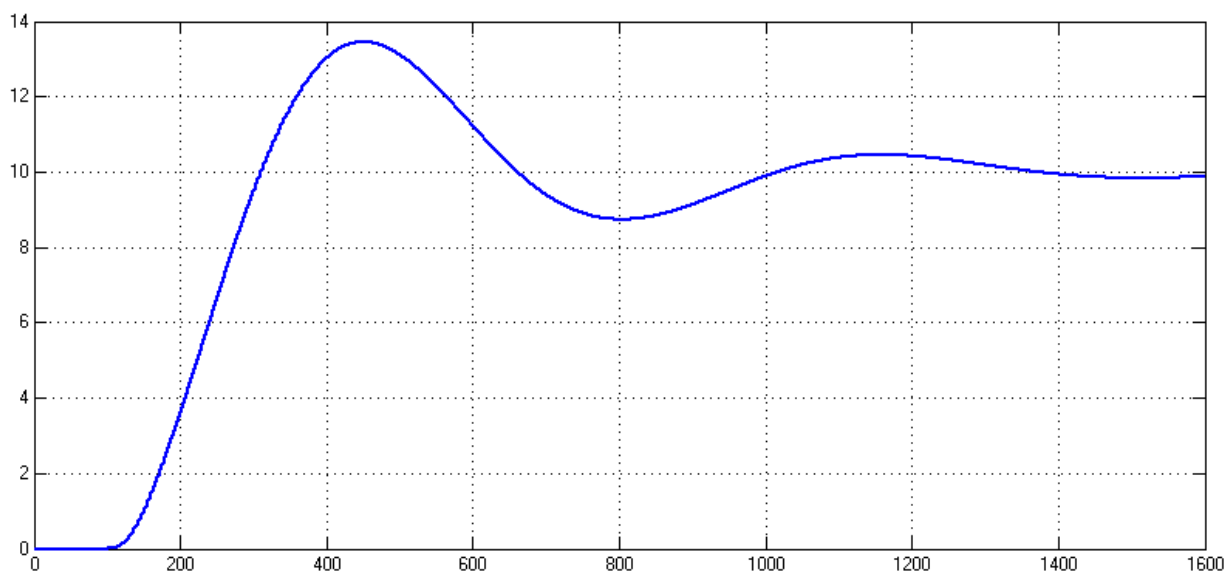
$$T_i = T_{pr} \quad (8)$$

2.4 lentelė. PI regulatoriaus parametrai (IMC)

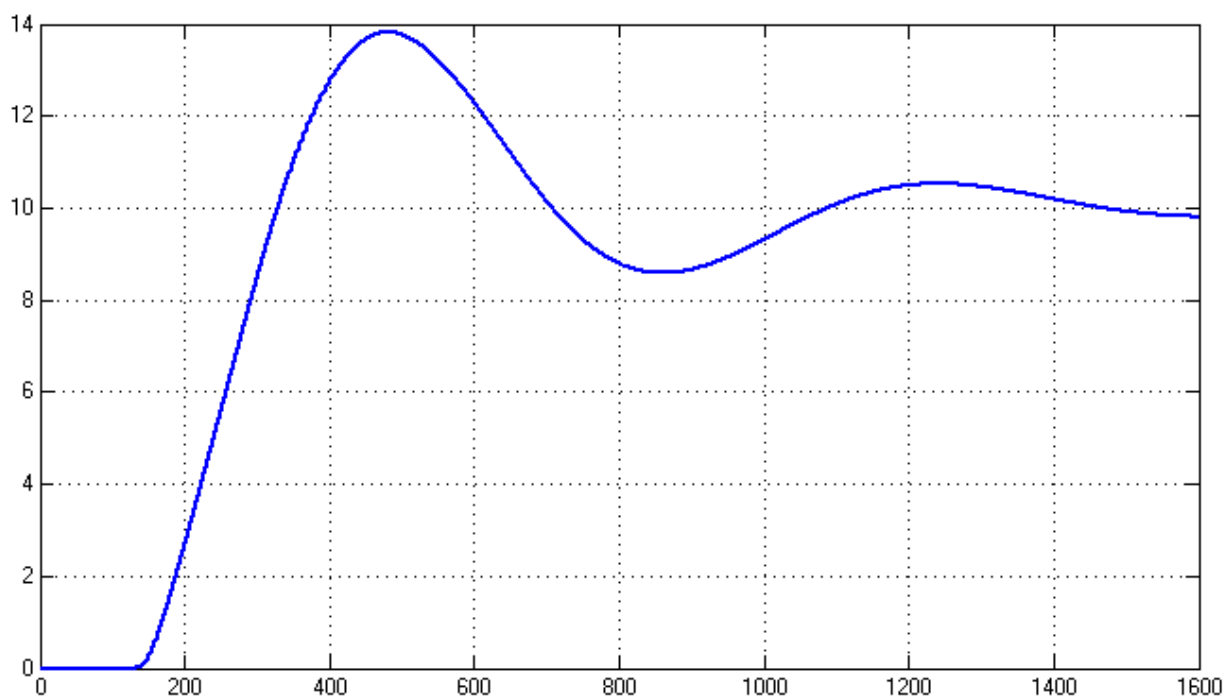
Var Nr.	PI regulatoriaus parametrai		
	K_r apskaičiuoti	K_r parinkti	T_i
1	0,0330	0,010	116,70
2	0,0298	0,008	104,25
3	0,0334	0,011	116,80
4	0,0334	0,012	103,80
5	0,0296	0,009	118,50
6	0,0299	0,010	103,80

PI reguliatoriaus parametrai yra įstatomi į Matlab/Simulink valdymo sistemos modelį. Modelio schema pateikiama 2.6 pav. Nuostato dydis Δu yra lygus 10.

Pateikiama ARS šuolinės reakcijos kreivės pagal kelis varianto parametrus, buvo paimta su mažiausiu sistemos vėlavimu (2.9 pav.) ir didžiausiu (2.10pav.). Likusios 4 reakcijos kreivės yra labai panašios kaip pavaizduotos čia, dėl to likusias reakcijos kreivės sukeltamos į darbo priedus.(priedas 1)

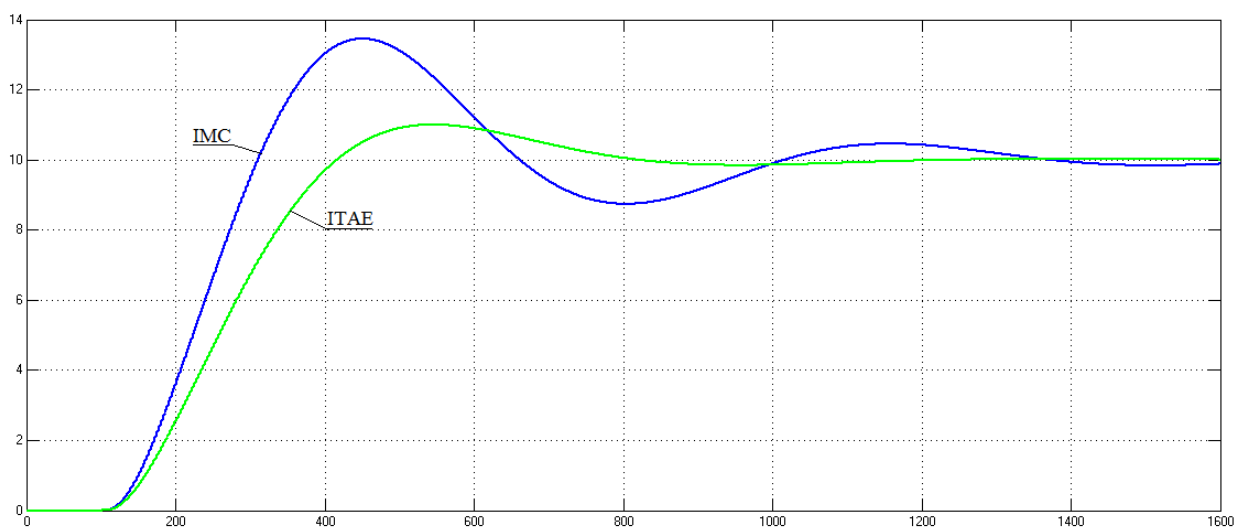


2.9 pav. Valdymo sistemos reakcija į šuolinį nuostato pokytį (IMC, perdavimo funkcija Nr1.)



2.10 pav. Valdymo sistemos reakcija į šuolinį nuostato pokytį (IMC, perdavimo funkcija Nr6.)

Iš šių dviejų grafikų matyti, kad derinant ITAE metodu suderinimas vyksta daug sklandžiau, vidinio modelio reguliavimo trukmė ilgesnė, perreguliavimas didesnis. Todėl tolimesniems skaičiavimams PI reguliatoriui derinti naudojamas ITAE kriterijus.



2.11 pav. Valdymo sistemos reakcija į šuolinį nuostato pokytį (perdavimo funkcija Nr1.)

PID reguliatoriaus derinimas

PID reguliatoriaus derinimui taip pat buvo naudojami du skirtingi metodai, tai yra ITAE kriterijaus ir vidinio modelio valdymo (IMC) derinimo taisyklės. Sistemą veikia didelis vėlavimas, todėl norint užtikrinti reikiamą stabilumą buvo rankiniu būdu sumažintas reguliatoriaus stiprinimo koeficientas (K_r).

Iš pradžių reguliatoriaus parametrai skaičiuojami pagal ITAE kriterijų. Naudojamos formulės, kai valdomas statinis objektas ir keičiamas nuostatas [1].

$$K_r = \frac{0,965}{K_{pr}} \left(\frac{T_{pr}}{\tau_{pr}} \right)^{0,855} \quad (9)$$

$$T_i = \frac{T_{pr}}{\left[0,796 - 0,147 \left(\frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right) \right]} \quad (10)$$

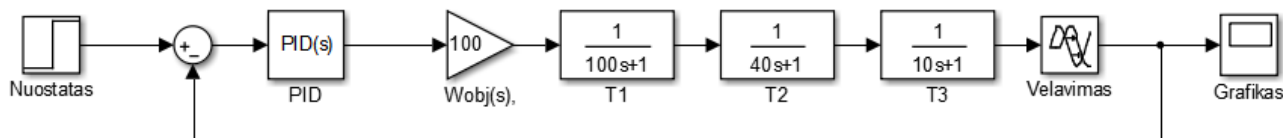
$$T_d = 0,308 * T_{pr} \left(\frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right)^{0,929} \quad (11)$$

Naudojant šias formules buvo apskaičiuoti reguliatoriaus derinimo parametrų nuostatai. Sistemą veikia didelis vėlavimas, todėl norint užtikrinti reikiamą stabilumą buvo rankiniu būdu sumažintas reguliatoriaus stiprinimo koeficientas (K_r).

2.5 lentelė. PID reguliatoriaus parametrai (ITAE)

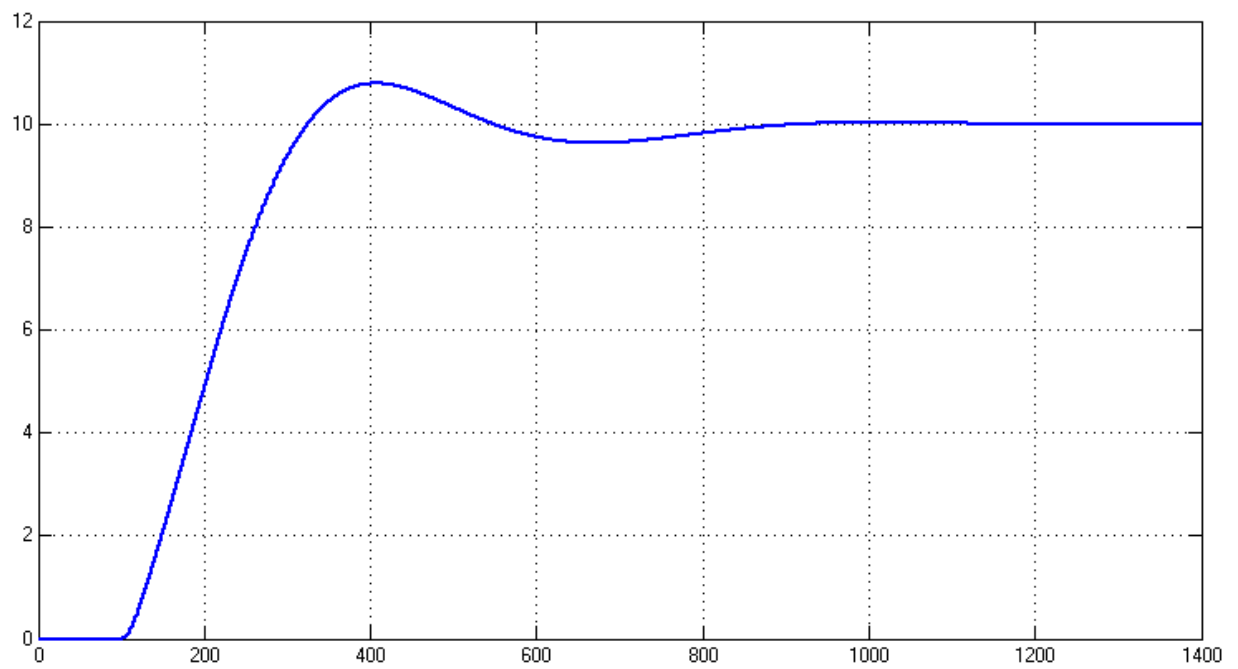
Var Nr.	PID reguliatoriaus parametrai			
	K_r apskaičiuoti	K_r parinkti	T_i	T_d
1	0,0082	0,0073	188,41	42,62
2	0,0071	0,0064	177,82	44,67
3	0,0076	0,0069	194,43	46,83
4	0,0083	0,0072	167,24	37,65
5	0,0066	0,0055	206,04	55,13
6	0,0069	0,0060	179,53	46,06

Apskaičiuoti PID reguliatoriaus parametrai yra įstatomi į Matlab/Simulink valdymo sistemos modelį. Modelio schema pateikiama 2.12 pav. Nuostato dydis Δu yra lygus 10.

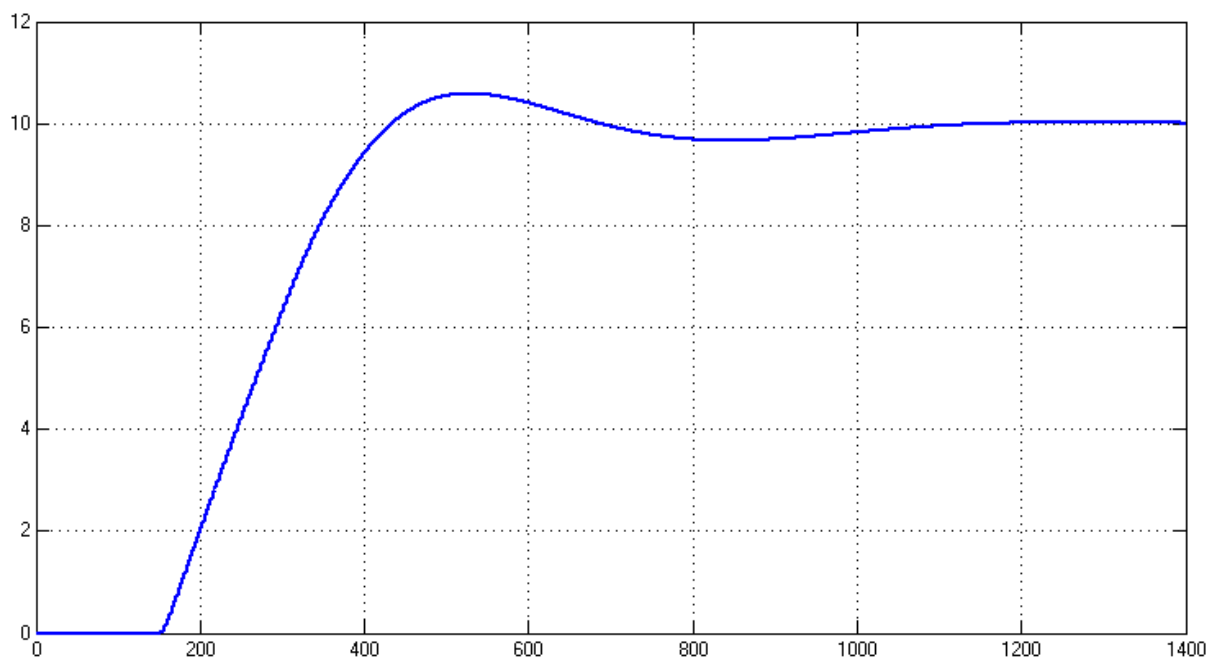


2.12 pav. Matlab/Simulink valdymo sistemos modelio schema (perdavimo funkcija Nr1.)

Pateikiama ARS šuolinės reakcijos kreivės pagal kelis varianto parametrus, buvo paimta su mažiausiu sistemos vėlavimu (2.13 pav.) ir didžiausiu (2.14pav.). Kaip matyti iš grafikų apskaičiavimai atlikti gerai, reguliatorius reguliuoja greitai su labai nedideliais perreguliavimais. Likusios 4 reakcijos kreivės yra labai panašios kaip pavaizduotos čia, dėl to likusias reakcijos kreivės sukeltamos į darbo priedus.(priedai 2)



2.13 pav. Valdymo sistemos reakcija į šulinį nuostato pokytį (ITAE, perdavimo funkcija Nr1.)



2.14 pav. Valdymo sistemos reakcija į šulinį nuostato pokytį (ITAE, perdavimo funkcija Nr5.)

Vėliau reguliatoriaus parametrai skaičiuojami pagal vidinio modelio valdymo derinimo taisyklės. Naudojamos formulės, kai $T_f > 0,2\tau_{pr}$ [1].

$$K_r = \frac{2T_{pr} + \tau_{pr}}{2K_{pr}(T_f + \tau_{pr})} \quad (12)$$

$$T_i = T_{pr} + \frac{\tau_{pr}}{2} \quad (13)$$

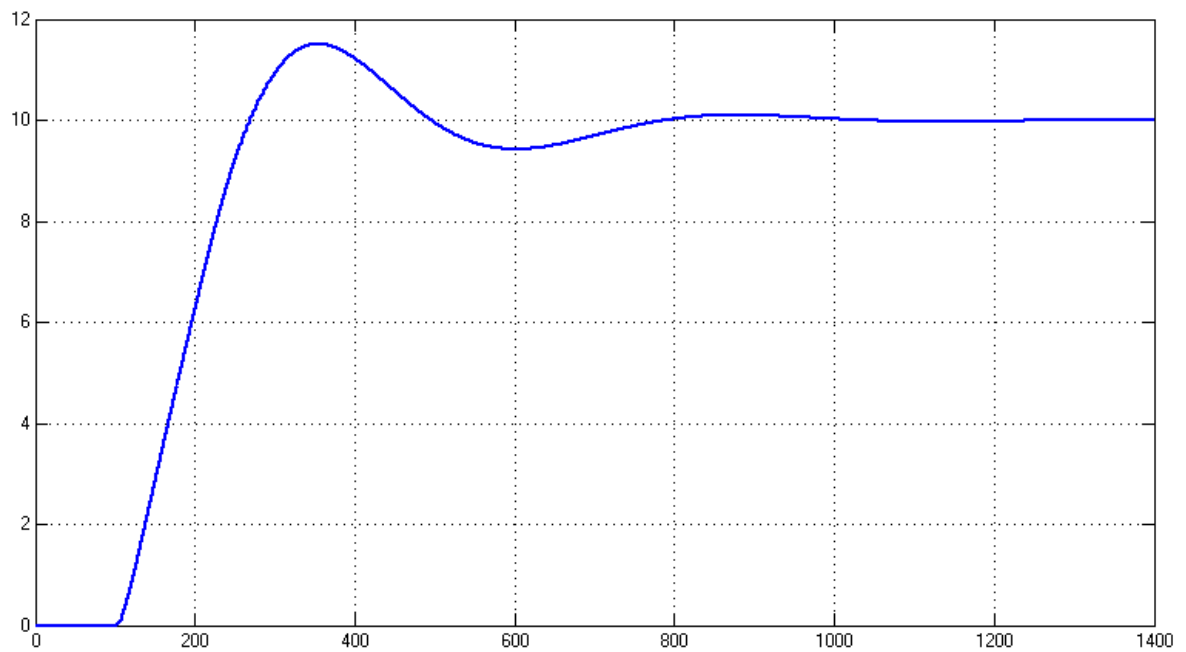
$$T_d = \frac{T_{pr} \tau_{pr}}{2T_{pr} + \tau_{pr}} \quad (14)$$

2.6 lentelė. PID reguliatoriaus parametrai (IMC)

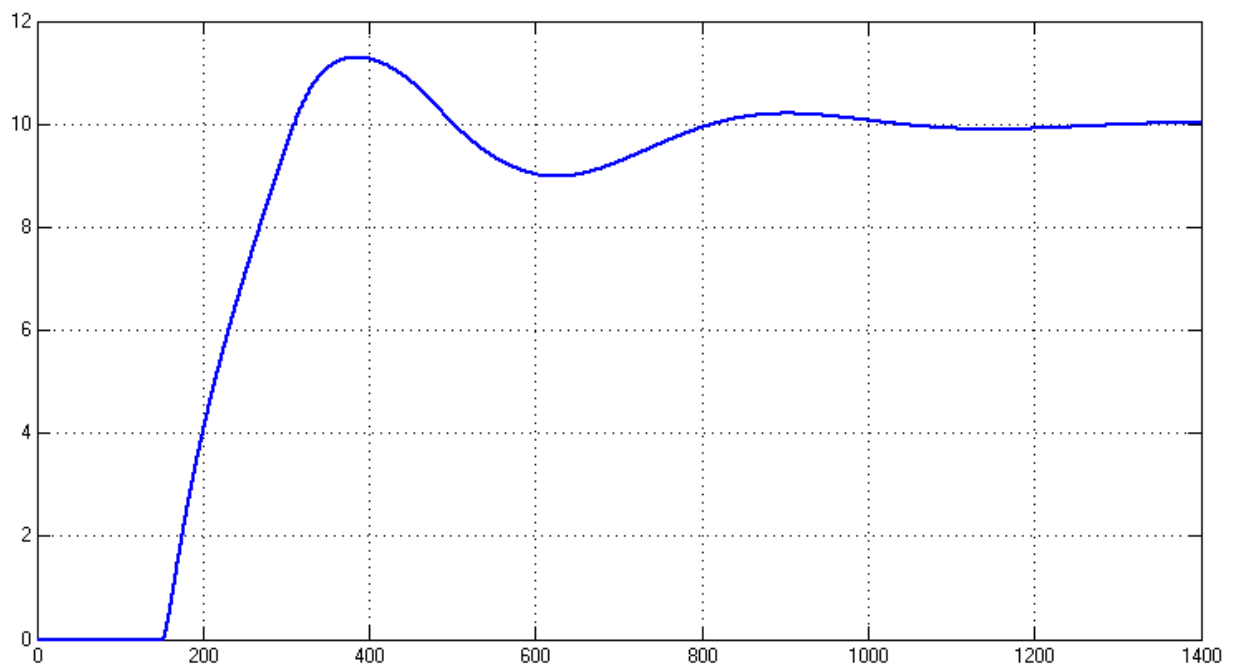
Var Nr.	PID reguliatoriaus parametrai			
	K_r apskaičiuoti	K_r parinkti	T_i	T_d
1	0,0110	0,010	186,80	43,79
2	0,0101	0,008	178,62	43,40
3	0,0105	0,009	194,37	46,61
4	0,0110	0,010	165,70	38,77
5	0,0098	0,008	210,85	51,90
6	0,0102	0,009	180,70	44,17

PID reguliatoriaus parametrai yra įstatomi į Matlab/Simulink valdymo sistemos modelį. Modelio schema pateikiama 2.12 pav. Nuostato dydis Δu yra lygus 10.

Pateikiama ARS šuolinės reakcijos kreivės pagal kelis varianto parametrus, buvo paimta su mažiausiu sistemos vėlavimu (2.15 pav.) ir didžiausiu (2.16pav.). Kaip matyti iš grafikų apskaičiavimai atlikti gerai, reguliuoja greitai su nedideliais perreguliavimais. Likusios 4 reakcijos kreivės yra labai panašios kaip pavaizduotos čia, dėl to likusias reakcijos kreivės sukeliama į darbo priedus.(priedai 2)

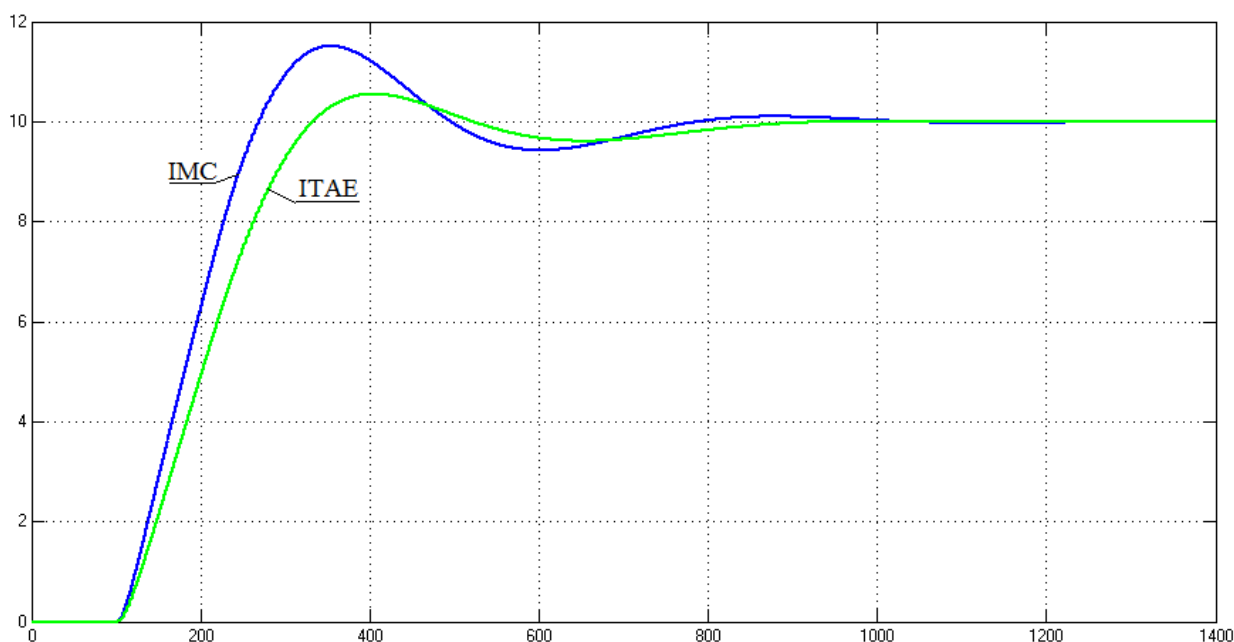


2.15 pav. Valdymo sistemos reakcija į šulinį nuostato pokytį (IMC, perdavimo funkcija Nr1.)



2.16 pav. Valdymo sistemos reakcija į šulinį nuostato pokytį (IMC, perdavimo funkcija Nr5.)

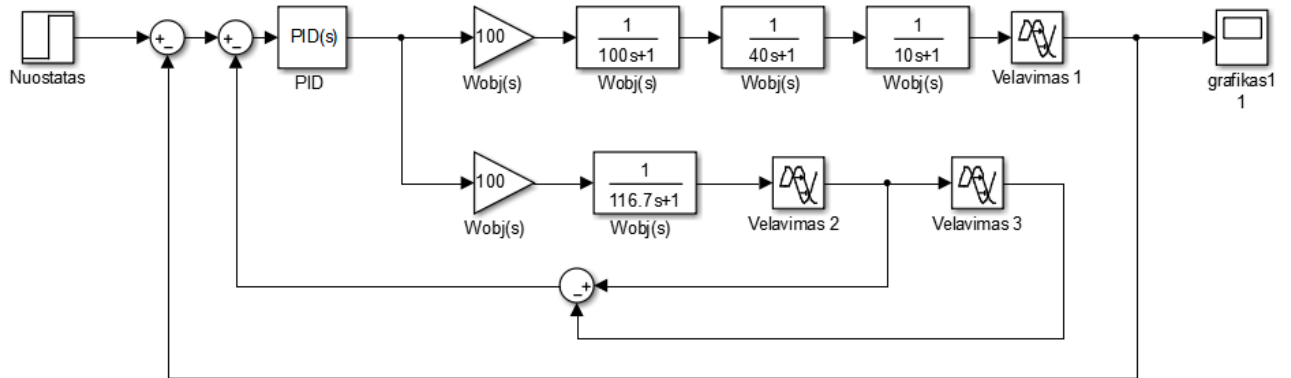
Iš šių dviejų grafikų matyti, kad derinant ITAE metodu suderinimas vyksta daug sklandžiau, vidinio modelio reguliavimo trukmė ilgesnė, perreguliavimas didesnis. Todėl tolimesniems skaičiavimams PID reguliatoriui derinti naudojamas ITAE kriterijus.



2.17 pav. Valdymo sistemos reakcija į šuolinį nuostato pokytį (perdavimo funkcija Nr1.)

2.3 Laiko vėlavimo kompensavimo sistema

Procesams su žymiu vėlavimu valdyti dažnai naudojama valdymo sistema su Smith'o prediktoriumi. Šios valdymo sistemos tikslas yra prognozuoti proceso išėjimą, remiantis proceso įėjimu. Skirtingai nuo tradicinės sistemos šioje yra įvestas papildomas grįžtamojo ryšio kontūras, gaubiantis reguliatorių. Šio modelio schema pateikiama 3.18 pav. Nuostato dydis Δu yra lygus 10.



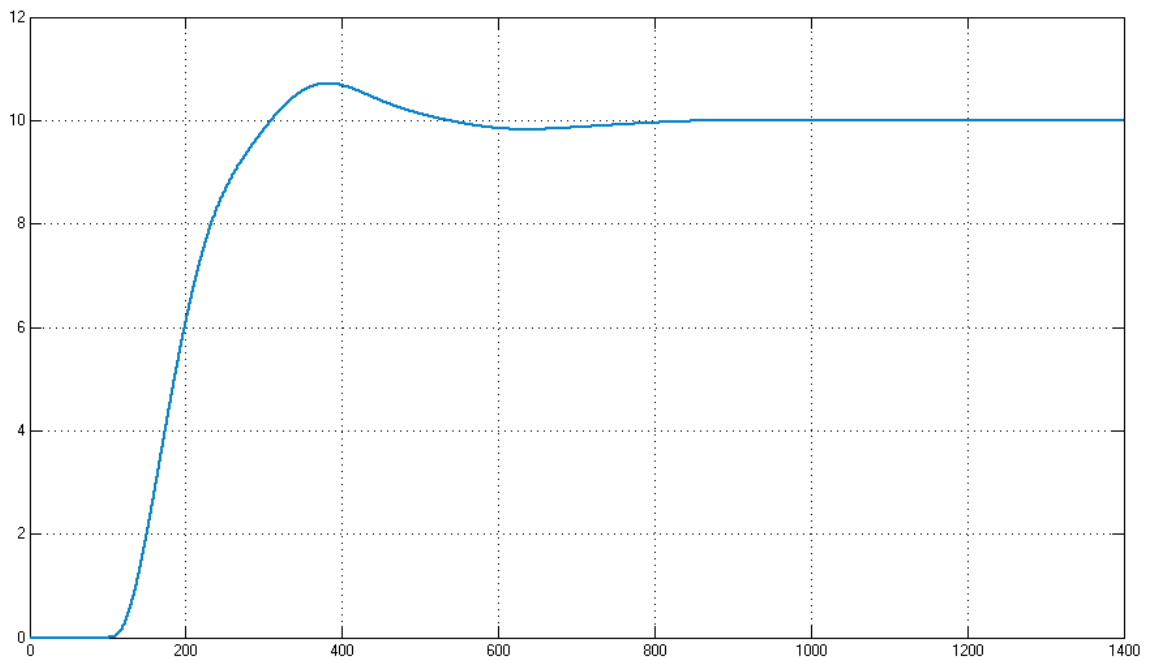
2.18 pav. Matlab/Simulink valdymo sistemos modelio schema

Šis valdymo sistemos modelis yra sudarytas iš dviejų dalių. Viršutinė dalis yra sudaryta iš tradicinės sistemos, tokia pati kaip skaičiuota anksčiau pagal PI ar PID reguliatorių. Apatinė dalis yra skirta laiko kompensavimui, kuri sudaryta iš identifikuotos perdavimo funkcijos ir dar vieno vėlavimo kontūro. Matlab/Simulink valdymo sistemos modelio bloką „vėlavimas 1“ ir „vėlavimas 3“ parametrai yra tokie patys, o bloko „vėlavimas 2“ parametrai yra apskaičiuojami. Iš identifikuotos perdavimo funkcijos gauto vėlavimo atimamas funkcijos vėlavimas. Pagal šiuos naujai paskaičiuotus perdavimo funkcijos parametrus yra randami PI ir PID reguliatoriaus parametrai pagal ITAE kriterijų. Visi apskaičiuoti parametrai pateikti 2.7 lentelėje.

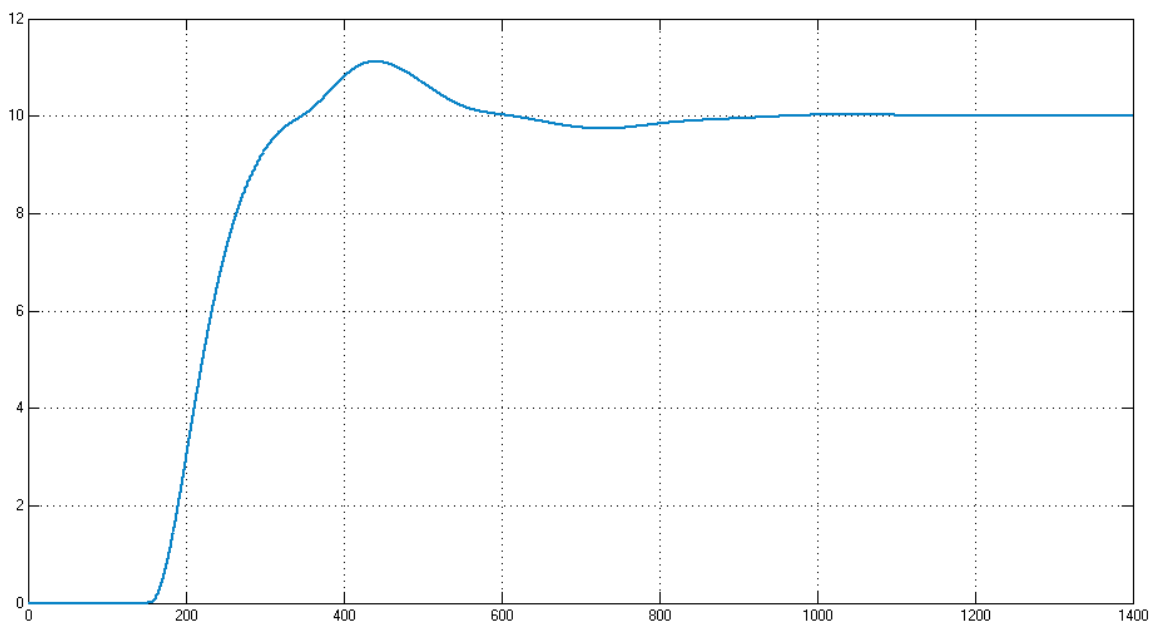
PI reguliatoriaus derinimui buvo naudojamas ITAE kriterijus. Naudojamos formulės, kai valdomas statinis objektas ir keičiamas nuostatas [1].

2.7 lentelė. PI reguliatoriaus parametrai

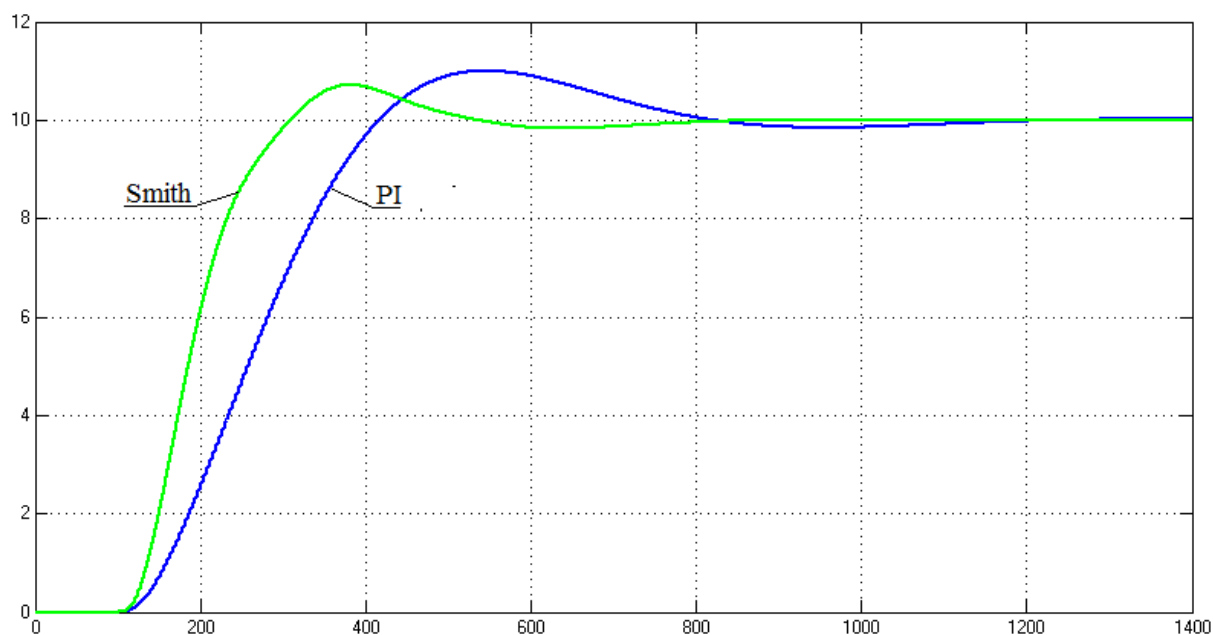
Var Nr.	PI reguliatoriaus parametrai		
	K_r apskaičiuoti	K_r parinkti	T_i
1	0,015	0,011	119,90
2	0,019	0,015	105,89
3	0,018	0,014	119,14
4	0,023	0,018	104,61
5	0,019	0,014	120,70
6	0,022	0,017	106,62



2.19 pav. Valdymo sistemos reakcija į šuolinį nuostato pokytį (perdavimo funkcija Nr1.)



2.20 pav. Valdymo sistemos reakcija į šuolinį nuostato pokytį (perdavimo funkcija Nr5.)

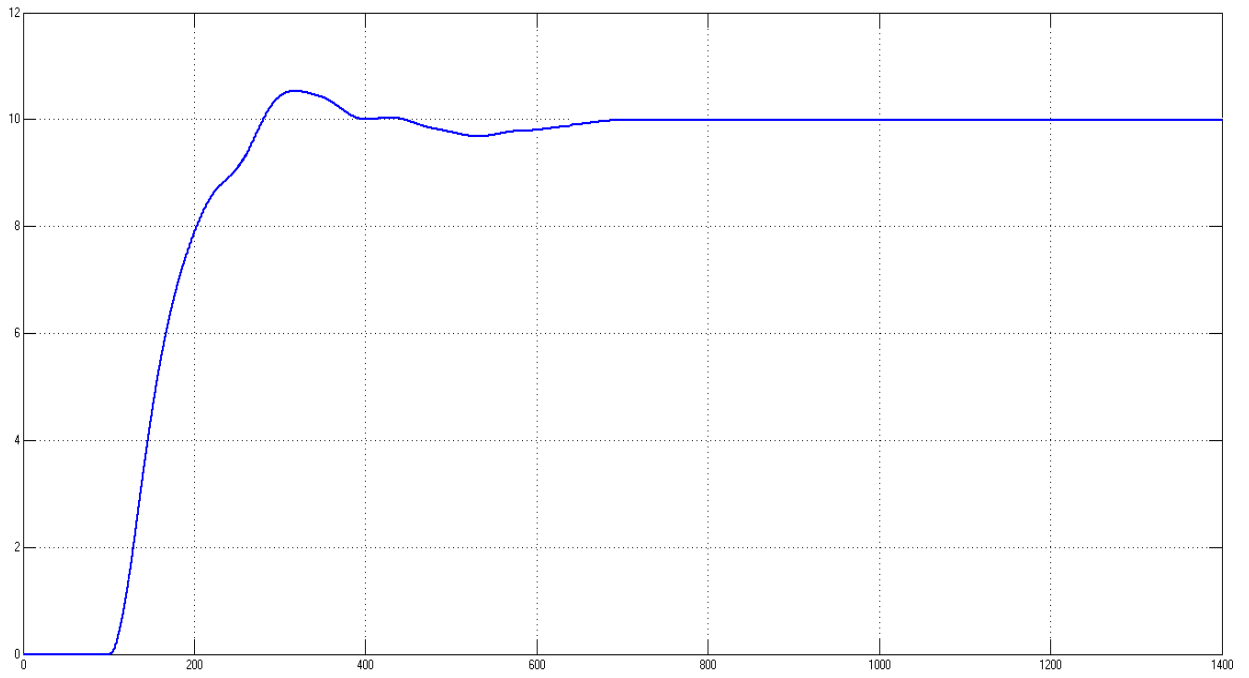


2.21 pav. PI ir Smith (PI) valdymo sistemų reakcija į šulinį nuostato pokytį (perdavimo funkcija Nr1.)

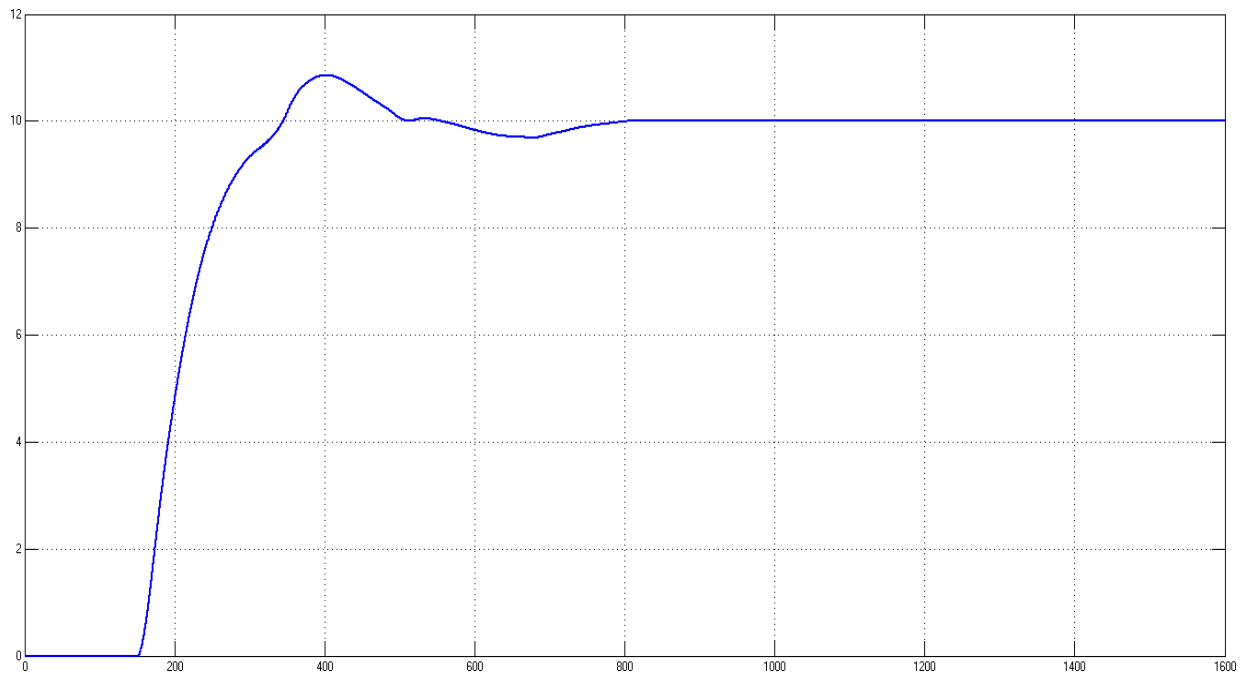
PID reguliatoriaus derinimui buvo naudojamas ITAE kriterijus. Naudojamos formulės, kai valdomas statinis objektas ir keičiamas nuostatas [1].

2.8 lentelė. PID reguliatoriaus parametrai

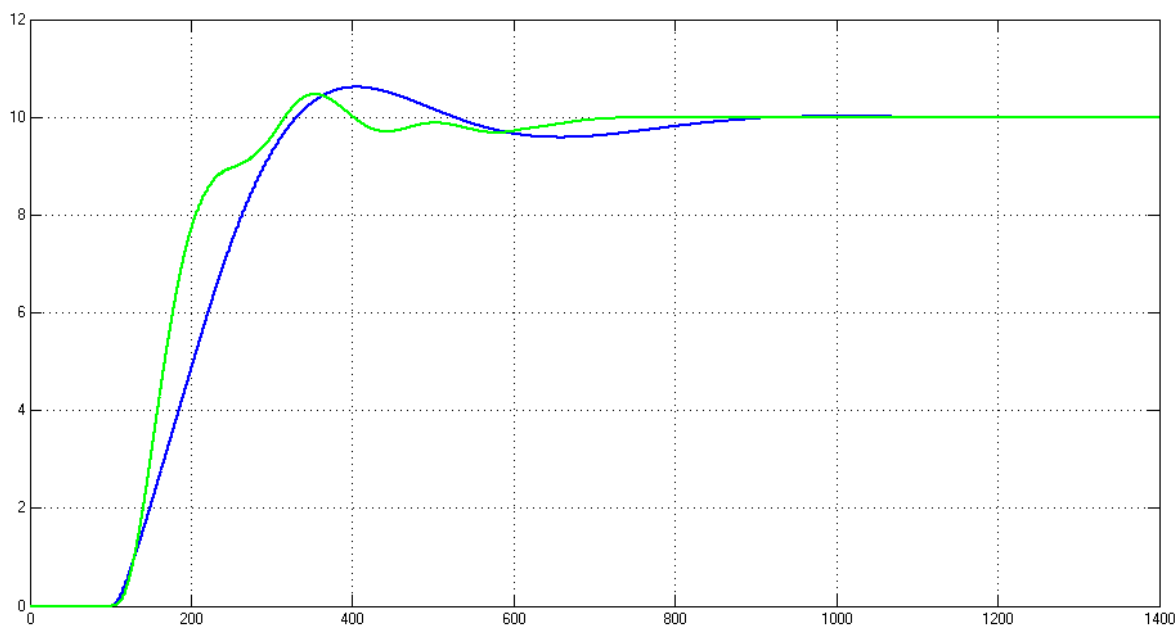
Var Nr.	PID reguliatoriaus parametrai			
	K_r apskaičiuoti	K_r parinkti	T_i	T_d
1	0,024	0,019	156,56	13,35
2	0,029	0,023	137,99	9,70
3	0,027	0,021	155,32	11,70
4	0,034	0,028	136,16	8,13
5	0,027	0,023	157,38	11,66
6	0,034	0,027	136,16	8,13



2.22 pav. Valdymo sistemos reakcija į šuolinį nuostato pokytį (perdavimo funkcija Nr1.)



2.23 pav. Valdymo sistemos reakcija į šuolinį nuostato pokytį (perdavimo funkcija Nr5.)



2.24 pav. PID ir Smith (PID) valdymo sistemų reakcija į šuolinį nuostato pokytį (perdavimo funkcija Nr1.)

Vėliau į sistemą buvo paduotas nedidelis trikdys, tai yra procesą veikia vienetinis šuolis, kuris prasidėjo 700 laiko momentu. Trikdančiojo poveikio pagalba galima stebėti kaip sukurtos sistemos modelis reaguoja ir kompensuoja šiuos pasikeitimus. Kaip matyti grafikuose, kurie pateikti 2.26pav. ir 2.27pav. į sistema padavus trikdį ji staigiai pakyla, tačiau labai greitai sureguoja ir sureguliuoja iki nustatyto nuostato.

Regulatoriaus parametrai skaičiuojami pagal ITAE kriterijų. Naudojamos formulės trikdžiui kompensuoti [1].

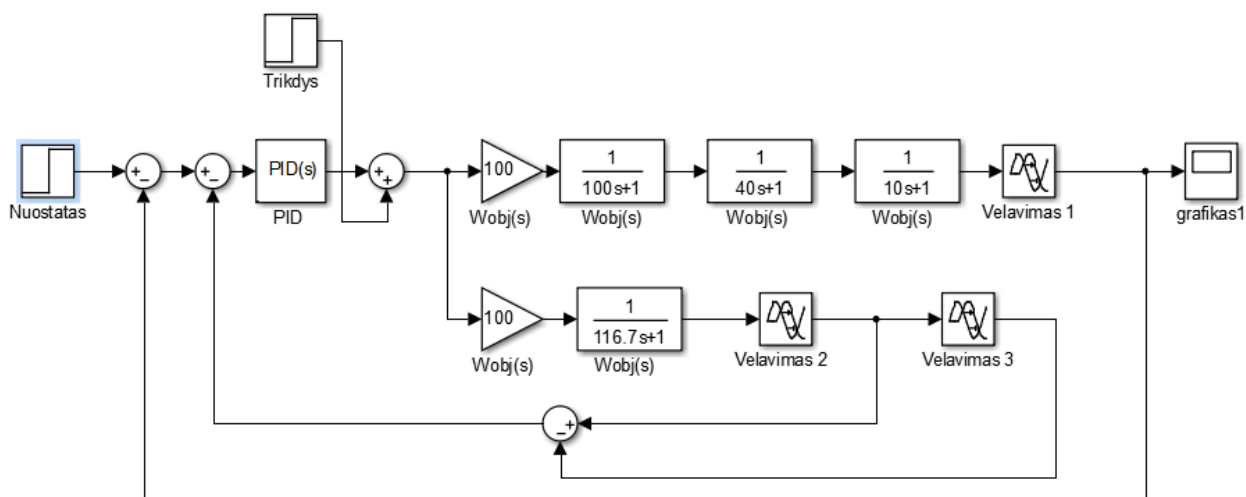
$$K_r = \frac{1,357}{K_{pr}} \left(\frac{T_{pr}}{\tau_{pr}} \right)^{0,947} \quad (15)$$

$$T_i = \frac{T_{pr}}{0,842} \left(\frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right)^{0,738} \quad (16)$$

$$T_d = 0,381 * T_{pr} \left(\frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right)^{0,995} \quad (17)$$

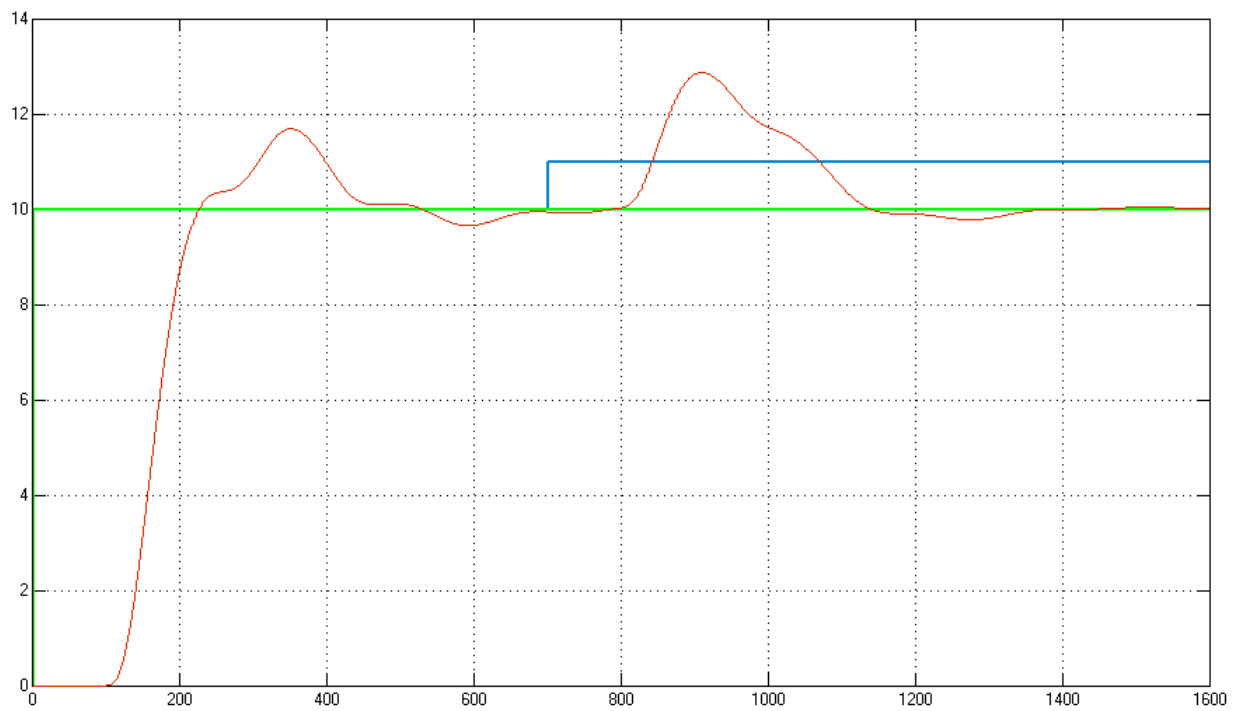
2.9 lentelė. PID reguliatoriaus parametrai

Var Nr.	PID reguliatoriaus parametrai trikdžio kompensavimui			
	K_r apskaičiuoti	K_r parinkti	T_i	T_d
1	0,037	0,010	63,12	15,39
2	0,046	0,015	48,85	11,02
3	0,042	0,014	58,18	13,47
4	0,053	0,019	41,57	9,13
5	0,043	0,015	56,85	13,30
6	0,054	0,018	43,67	9,14

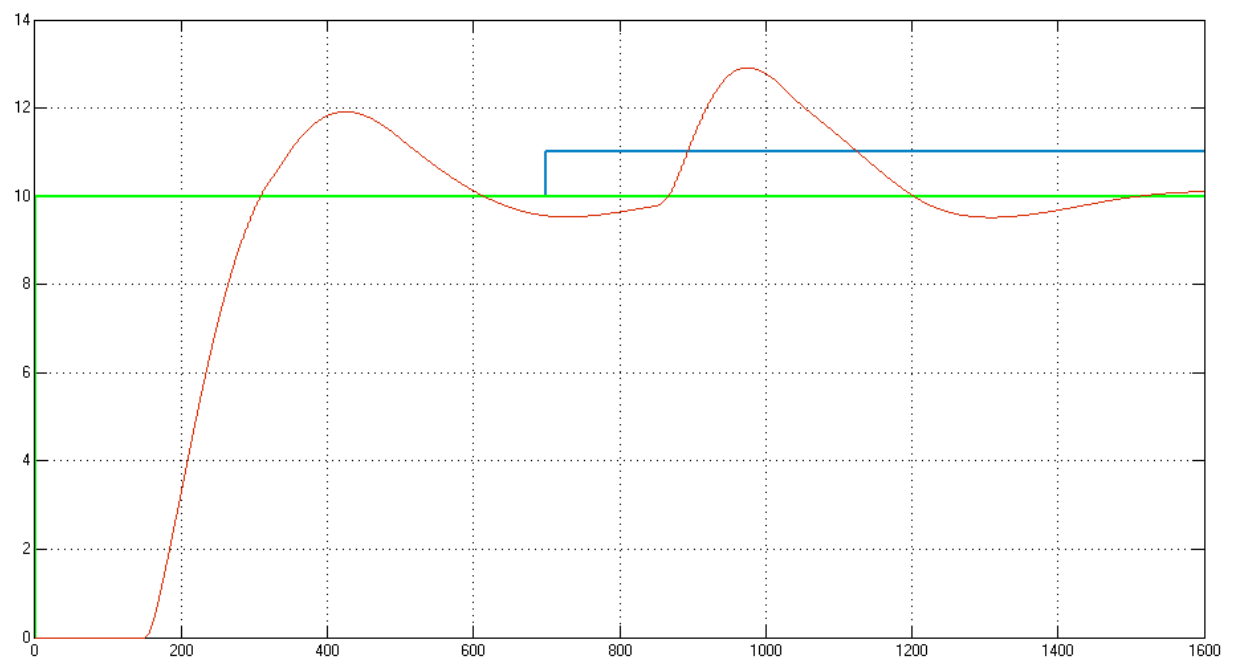


2.25 pav. Matlab/Simulink valdymo sistemos modelio schema su trikdžiu

Pateiktos kelių variantų kreivės, kurias veikia trikdis.



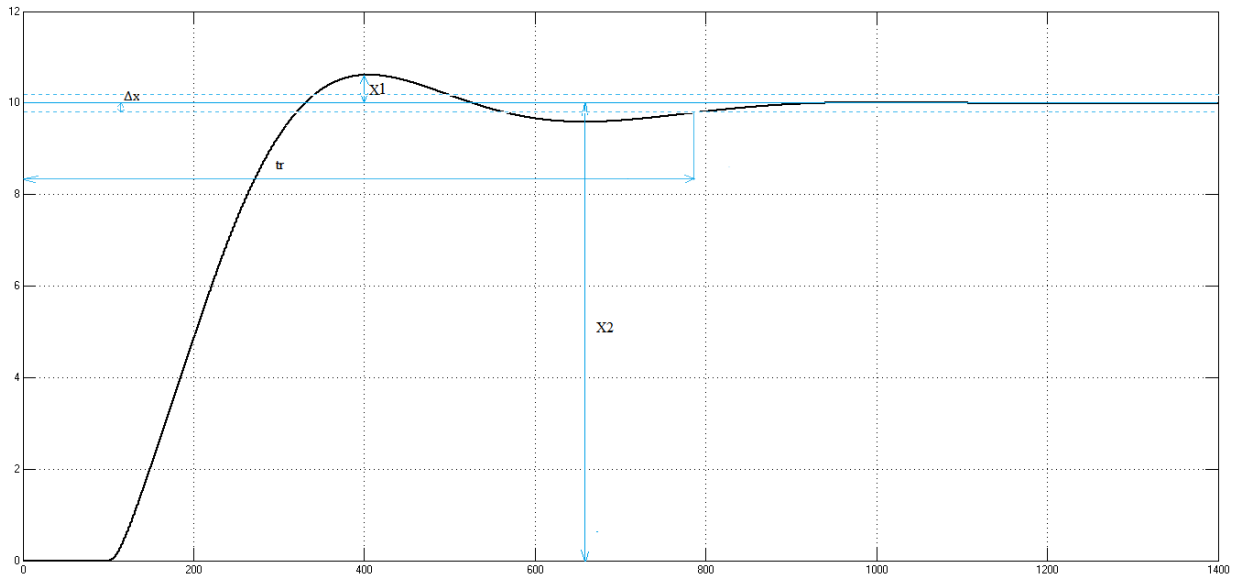
2.26 pav. Valdymo sistemos reakcija į trikdantį poveikį (perdavimo funkcija Nr1.)



2.27 pav. Valdymo sistemos reakcija į trikdantį poveikį (perdavimo funkcija Nr5.)

2.4 Kokybės rodiklių nustatymas

Toliau gautoms kreivėms apskaičiuojamas kokybės kriterijus.



2.18 pav. Pereinamojo proceso kokybės rodiklių nustatymas

Leistinas dinaminis nuokrypis yra Δx ne didesnis nei 1% nuo nusistovėjusios reikšmės.

Maksimalus leistinas santykinis dinaminis nuokrypis (perreguliavimas σ) apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\sigma = \frac{x_1}{x_2} \cdot 100 \quad (18)$$

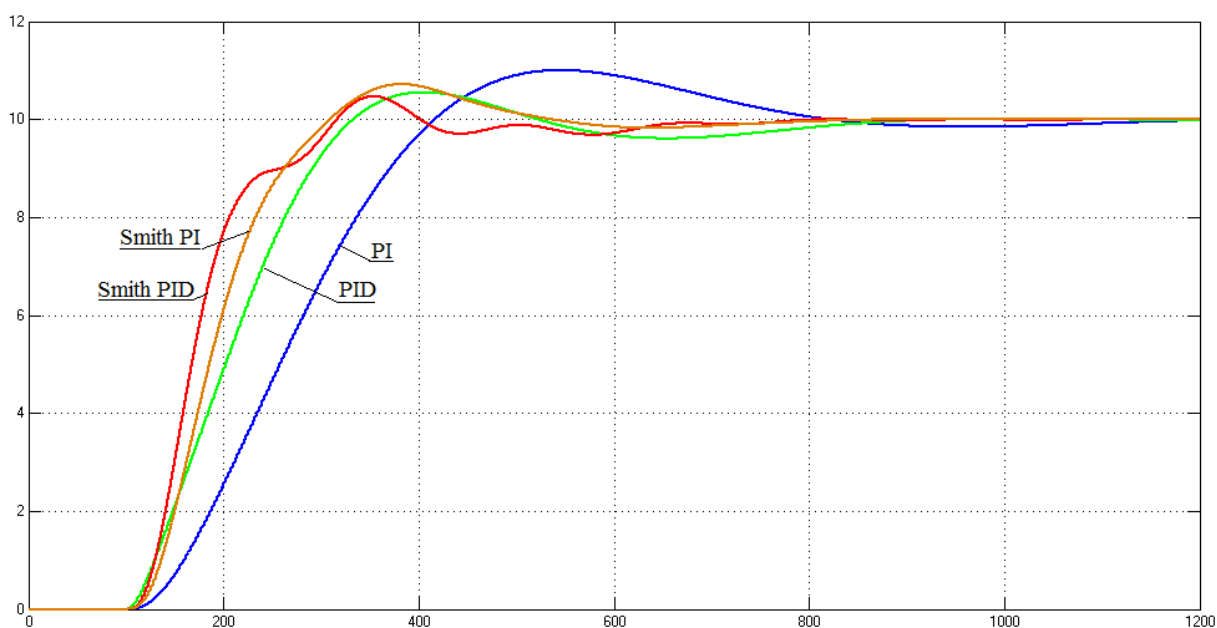
$$x_1 = 0,98; \quad x_2 = 10 \quad (19)$$

$$\sigma = \frac{0,98}{10} \cdot 100 = 9,8\% \quad (20)$$

2.10 lentelė. Kokybės rodiklių parametrai

Var. nr.	Pereinamojo proceso trukmė				Santykinis dinaminis nuokrypis			
	PI	PID	Smith (PI)	Smith (PID)	PI	PID	Smith (PI)	Smith (PID)
1	1100	840	740	650	9,8%	6,5%	7,1%	5,5%
2	1150	850	700	620	10%	7%	9%	6,8%
3	1180	900	790	700	9,9%	7%	9,5%	7,5%
4	850	740	590	550	6%	6,5%	7%	5,5%
5	1360	1050	870	800	11%	8%	10,5%	8,5%
6	1100	900	640	590	8%	5%	8%	7%

Iš skaičiavimo matosi, kad visais būdais santykinis dinaminis nuokrypis yra labai nedidelis. Didžiausias yra PI reguliatoriaus, o mažiausias Smith prediktoriaus. Taip pat ir sistemos reguliavimo greitis lečiausiai sureguliuoja naudojantis PI reguliatoriumi, greičiau PID, o greičiausiai pasiekia nustatyta tikslą Smith reguliavimo metodu.



2.19 pav. Pereinamojo proceso kokybės rodiklių nustatymas (perdavimo funkcija Nr1.)

2.5 Statistinis pereinamųjų procesų kokybės rodiklių įvertinimas

Norint atlikti tolimesnius skaičiavimus atliekamas duomenų normavimas. Atliekant bandymus su skirtingais kintamaisiais yra gaunami labai plačiai ir skirtingai issidėstę rezultatai, tam yra pasitelkiamas normavimas, kurio dėka gauti bandymo duomenys yra sulyginami su skirtingomis reikšmėmis. Šiuo metu normavimas atliekamas pereinamojo proceso trukmei, duomenys pateikiami 2.11 lentelėje. Iš pradžių atskaitos taškas parenkamas PI regulatoriaus gauti rezultatai, tai yra kiekvieno bandymo PI gautas rezultatas prilyginamas 100%. PID ir Smith parametrai yra apskaičiuojami naudojant proporciją.

2.11 lentelė. Normuoti bandymo parametrai

Var. nr.	Normuota pereinamojo proceso trukmė				Santykinis dinaminis nuokrypis			
	PI	PID	Smith (PI)	Smith (PID)	PI	PID	Smith (PI)	Smith (PID)
1	100%	76,4%	67,3%	59,1%	9,8%	6,5%	7%	5,5%
2	100%	73,9%	60,8%	53,9%	10%	7%	9%	6,8%
3	100%	76,3%	66,9%	59,3%	9,9%	7%	9,5%	7,5%
4	100%	87,1%	68,8%	64,7%	6%	6,5%	7%	5,5%
5	100%	77,2%	64,5%	58,8%	11%	8%	10,5%	8,5%
6	100%	81,8%	58,2%	53,6%	8%	5%	8%	7%
Vidurkis	100%	78,45%	64,4%	58,2%	9,1%	6,6%	8,5%	6,7%

Pereinamajam procesui reguliuoti buvo naudojami trys skirtingi reguliavimo metodai, tai yra PI, PID ir Smith prediktoriaus. Su kiekvienu metodu buvo atlikti 6 bandymai su skirtingomis perdavimo funkcijomis. Todėl, kad išsiaiškinti ar reguliavimo metodai vienas už kita geresni atliksime statistikinius rodiklių įvertinimus.

Skaičiuojame pasikliaujama intervalą tikrajam skirtumui tarp pereinamojo proceso trukmės, naudojant sistemas su Smith prediktoriumi ir sistemas su PI ir PID regulatoriais.

Iš pradžių patikriname hipotezę tarp PI reguliariaus ir Smith (PI) prediktoriaus proceso reguliavimo trukmės.

Skaičiuojamas vidurkis Smith (PI) kintamiesiems:

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 64,4 \quad (21)$$

Apskaičiuojamas vidutinės kvadratinės nuokrypos įvertinimas:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m)^2} = 4,13 \quad (22)$$

Žemiau pateikta formulė apskaičiuoti pasikliaujamam intervalui [5]:

$$y_1 - y_2 - \varepsilon s \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \leq m_1 - m_2 \leq y_1 - y_2 + \varepsilon s \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \quad (23)$$

Čia ε yra t-pasiskirstymo lentelėje [3] parenkama kritinė vertė, atitinkanti laisvės laipsnių skaičių $\varphi=n-1$ ir reikšmingumo lygį α . Kai $\alpha=0,05$ tai kritinė vertė $\varepsilon = 2,571$. Įstačius apskaičiuotas parametrų vertes į formulę (23), randame pasikliaujamą intervalą.

$$29,47 \leq m_1 - m_2 \leq 41,73$$

Kitu būdu pasikliaujamas intervalas gali būti užrašytas taip:

$$m_1 - m_2 = 35,6 \pm 6,13$$

Kaip matyti pagerėjimas vyksta naudojant sistemą su Smith(PI) prediktoriumi. Reguliuojamo laiko trukmės sumažėjimas siekia $35,6 \pm 6,13$ su 95% tikimybe, kad ta išvada teisinga.

Taip pat tikriname hipotezę tarp PID reguliariaus ir Smith(PID) prediktoriaus proceso reguliavimo trukmės.

Iš pradžių skaičiuojamas vidurkis PID ir Smith(PID) kintamiesiems pagal (21) formulę:

$$\text{PID vidurkis } m_1 = 78,45$$

$$\text{Smith(PID) vidurkis } m_2 = 58,23$$

Apskaičiuojamas vidutinės kvadratinės nuokrypos įvertinimas:

$$s_1^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_1)^2 = 25,87 \quad (24)$$

$$s_2^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_2)^2 = 16,85 \quad (25)$$

$$s = \sqrt{\frac{s_1^2 \varphi_1 + s_2^2 \varphi_2}{\varphi_1 + \varphi_2}} = 4,62 \quad (26)$$

Žemiau pateikta formulė apskaičiuoti pasikliaujamam intervalui [5]:

$$y_1 - y_2 - \varepsilon s \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \leq m_1 - m_2 \leq y_1 - y_2 + \varepsilon s \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \quad (27)$$

Čia ε yra t-pasiskirstymo lentelėje [3] parenkama kritinė vertė, atitinkanti laisvės laipsnių skaičių $\varphi = n_1 + n_2 - 1$ ir reikšmingumo lygį α . Kai $\alpha = 0,05$ tai kritinė vertė $\varepsilon = 2,228$. Įstačius apskaičiuotas parametrų vertes į formulę (27), randame pasikliaujamą intervalą.

$$14,22 \leq m_1 - m_2 \leq 26,11$$

Kitu būdu pasikliaujamas intervalas gali būti užrašytas taip:

$$m_1 - m_2 = 20,16 \pm 5,94$$

Kaip matyti pagerėjimas vyksta naudojant sistemą su Smith(PID) prediktoriumi. Reguliuojamo laiko trukmės sumažėjimas siekia $20,16 \pm 5,94$ su 95% tikimybe, kad ta išvada teisinga.

Atliekamas statistinis vertinimas santykinio dinaminio nuokrypio parametrų. Bus tikrinama hipotezė ar PI reguliatorius ir Smith(PI) prediktorius, PID reguliatorius ir Smith(PID) prediktorius yra statistiškai reikšmingi.

Iš pradžių tikriname hipotezę tarp PI reguliariaus ir Smith prediktoriaus:

Skaičiuojamas vidurkis PI ir Smith(PI) kintamiesiems pagal (21) formulę:

$$\text{PI vidurkis } m_1 = 9,11$$

Smith(PI) vidurkis $m_2=8,5$

Apskaičiuojamas vidutinės kvadratinės nuokrypos įvertinimas:

$$s_1^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_1)^2 = 3,27 \quad (28)$$

$$s_2^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_2)^2 = 3,33 \quad (29)$$

$$s = \sqrt{\frac{s_1^2 \varphi_1 + s_2^2 \varphi_2}{\varphi_1 + \varphi_2}} = 1,623 \quad (30)$$

Čia ε yra t-pasiskirstymo lentelėje parenkama kritinė vertė, atitinkanti laisvės laipsnių skaičių $\varphi=n_1+n_2-1$ ir reikšmingumo lygį α . Kai $\alpha=0,05$ tai kritinė vertė $\varepsilon = 2,228$.

Hipotezės patikrinimo kriterijumi naudojama testinė funkcija [5]:

$$T = \frac{m_1 - m_2}{s \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} = 0,640 \quad (31)$$

Po to tikrinama sąlyga : $|T| \geq \varepsilon \quad |0,640| \geq 2,228$

Kaip matyti ši sąlyga netenkinama, todėl hipotezė, kad $m_1 = m_2$ patvirtinama. Todėl galima teigti, kad skirtumas tarp PI ir Smith(PI) pereinamojo proceso reguliavimo yra statistiškai nereikšmingas.

Tikriname hipotezę tarp PID reguliariaus ir Smith(PID) prediktoriaus:

Skaičiuojamas vidurkis PID ir Smith(PID) kintamiesiems pagal (21) formulę:

PID vidurkis $m_1=6,6$

Smith(PID) vidurkis $m_2=6,7$

Apskaičiuojamas vidutinės kvadratinės nuokrypos įvertinimas:

$$s_1^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_1)^2 = 0,97 \quad (32)$$

$$s_2^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_2)^2 = 1,37 \quad (33)$$

$$s = \sqrt{\frac{s_1^2 \varphi_1 + s_2^2 \varphi_2}{\varphi_1 + \varphi_2}} = 1,082 \quad (34)$$

Čia ε yra t-pasiskirstymo lentelėje parenkama kritinė vertė, atitinkanti laisvės laipsnių skaičių $\varphi = n_1 + n_2 - 1$ ir reikšmingumo lygį α . Kai $\alpha = 0,05$ tai kritinė vertė $\varepsilon = 2,228$.

Hipotezės patikrinimo kriterijumi naudojama testinė funkcija [5]:

$$T = \frac{m_1 - m_2}{s \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} = -0,160 \quad (35)$$

Po to tikrinama sąlyga : $|T| \geq \varepsilon \quad |-0,160| \geq 2,228$

Kaip matyti ši sąlyga netenkinama, todėl hipotezė, kad $m_1 = m_2$ patvirtinama. Todėl galima teigti, kad skirtumas tarp PID ir Smith pereinamojo proceso reguliavimo yra statistiškai nereikšmingas.

Išvados:

1. Sudaryti procesų su žymiu vėlavimu valdymo sistemų modelį ir atliktos sistemų imitaciniai modeliavimai.
2. Apskaičiuoti pereinamųjų procesų valdymo sistemoje kokybės rodikliai ir atliktas jų statistikinis palyginimas.
3. Tytymo rezultatai parodė, kad sistemose su Smith prediktoriumi pereinamojo proceso laikas sutrumpėja $35,6 \pm 6,13$ su PI reguliatoriumi ir $20 \pm 5,94\%$ su PID reguliatoriumi lyginant vienkontūre valdymo sistemose.
4. Lyginant maksimalias dinamines nuokrypas sistemose su PI ir PID reguliatoriais statistiškai reikšmingas skirtumas nenustatytas.
5. Valdant procesus su žymiu vėlavimu rekomenduojama naudoti Smith prediktorių. Sistemose vidiniame kontūre galima naudoti valdymo proceso dinamiškai aproksimuojantį pirmos eilės su vėlavimu modelį.

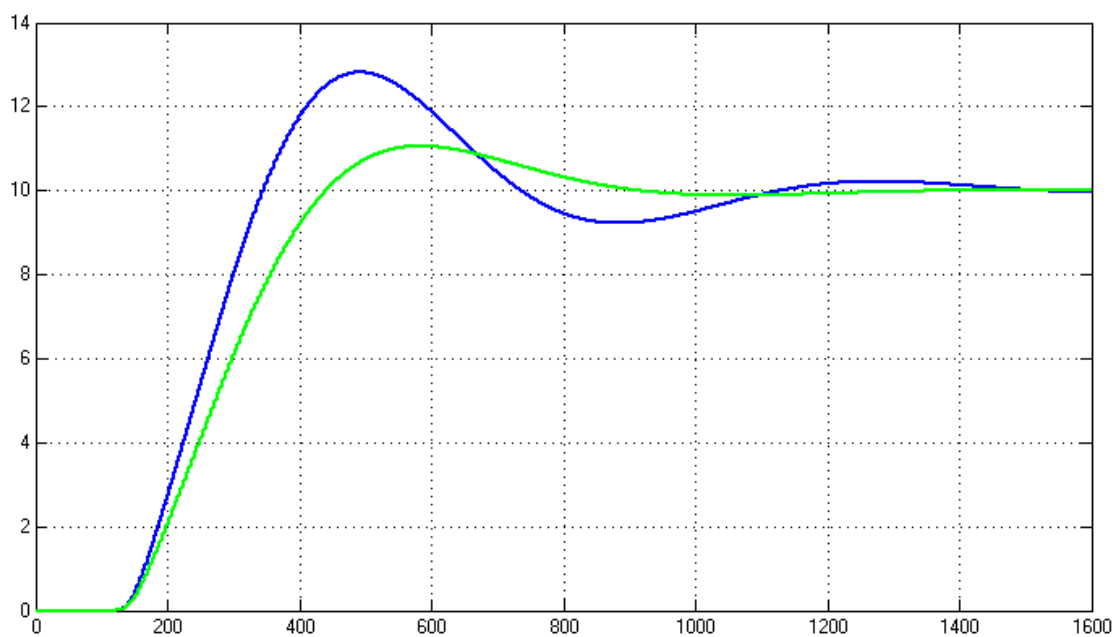
Literatūros sąrašas

1. D. Levišauskas, Automatinio reguliavimo sistemų derinimas: mokomoji knyga, Vilnius: Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, 2008.
2. Chapman, Stephen J. *MATLAB Programming for Engineers*. 3rd ed. Toronto: Thompson, 2005.
3. V. Aleksa, S. Dailidė, J. Staniskis, Gamybos procesų automatizavimas, Vilnius : Mokslas, 1976.
4. Jones Butron W. *Statistics*, 20 channel center street Boston, MA02210, JAV. 2012
5. Charles Henry Brase, Corrinne Pellillo Brase, *Statistics: Concepts and Methods*. 10 ed. Boston, USA 2012.
6. http://www.cim.mcgill.ca/~ialab/ev/IMC_design_for_unstable_processes_with_time_delays_Tan_Marquez_Chen.pdf [žiūrėta per internetą 2017-04-10]
7. http://v-cds-server1.caltech.edu/~murray/wiki/images/8/8b/Nilsson_thesis_98.pdf [žiūrėta per internetą 2017-03-10]
8. R. Simutis, Sistemų modeliavimas ir identifikavimas, Vilnius: Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, 2008.
9. Ivanauskas. Automatinio valdymo teoriniai pagrindai. „Technologija“, Kaunas, 2005.
10. Henrik Granberg, Control of a Process with Large Time Constants and Significant Time Delay, Chalmers university of technology Gothenburg, Sweden 2013
11. Aleksa, v, galvanauskas v., Technologinių procesų automatizavimas ir valdymas, Kaunas, 2008.
12. S. Lisauskas. Automatinio valdymo teorija. Vilnius 2012m
13. Charles Henry Brase, Corrinne Pellillo Brase, *Statistics: Concepts and Methods*. 10 ed. Boston, JAV. 2012.
14. J. E. Normey-Rico, E. F. Camacho, Control of Dead-time Processes. Springer London 2007
15. Majhi, S. and Atherton, D.P., ”Modified Smith Predictor and Controller for Processes with Time Delays”, *IEE Proc. on Cont. Theory and Appln*, 1999m.
16. Siva Rama Krishna Veeramachaneni, PID Control Using a Smith Predictor for Time Delay Systems, Master of science, Wichita State University, 2010.

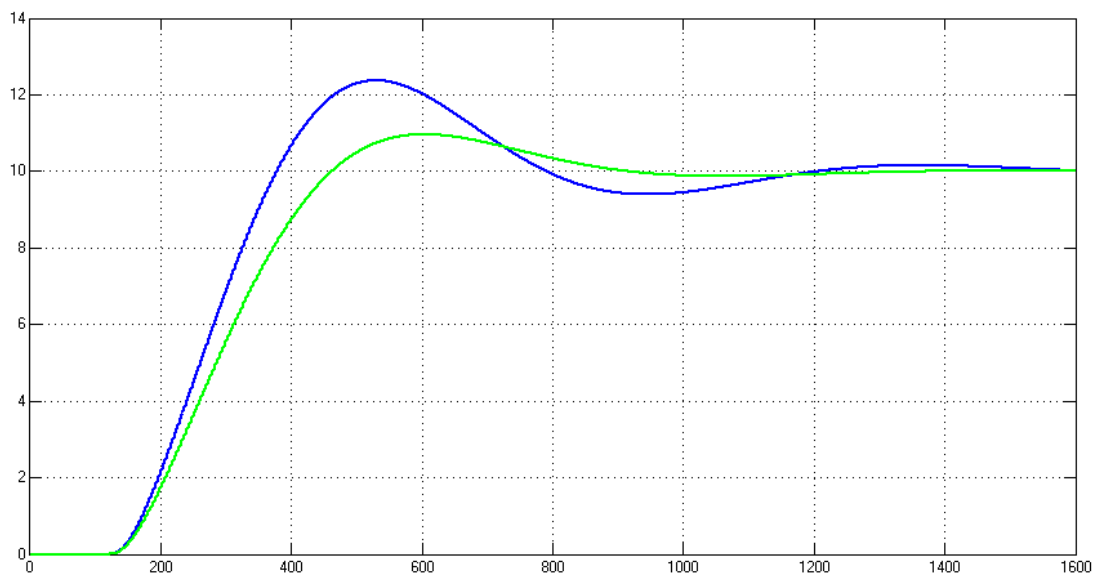
17. Sandra D Schlotzhauer, Elementary statistics using JMP, SAS Institute Inc. , Cary, NC, JAV, 2007.
18. A. S. Rao, V. Rao, and M. Chidambaram, “Set point weighted modified smith predictor for integrating and double integrating processes with time delay,” ISA Transactions, 2007m.

Priedai

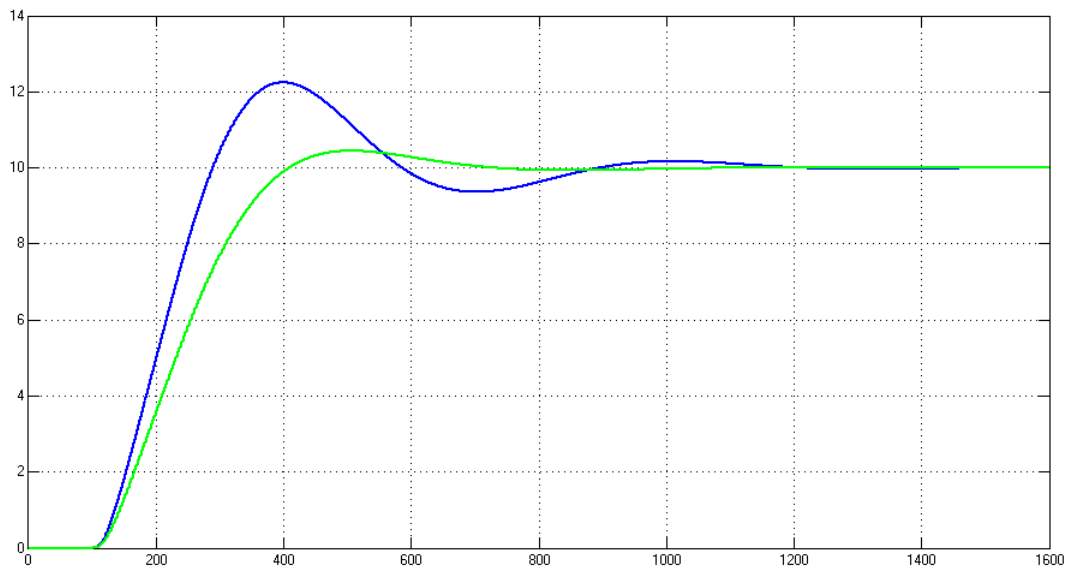
Priedas 1.



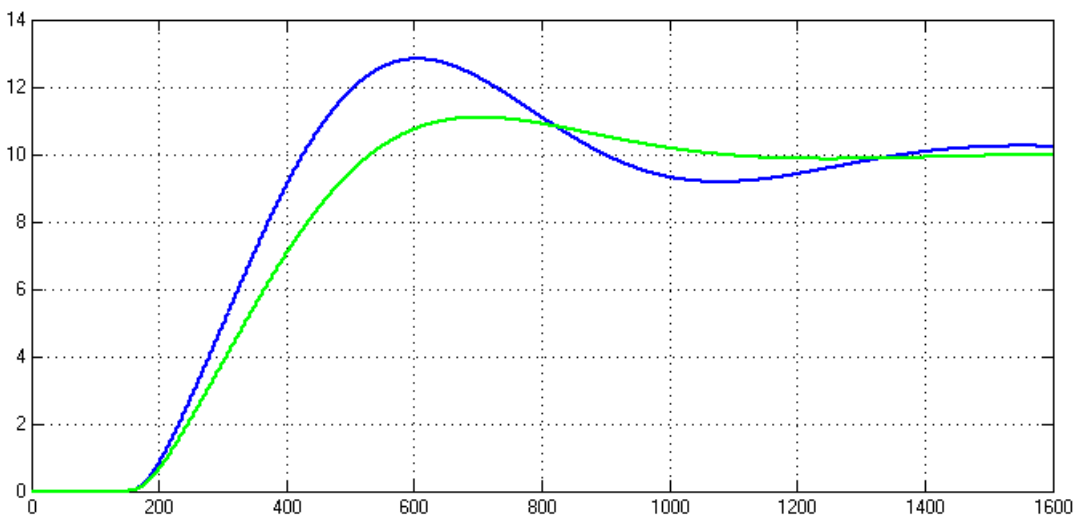
1 pav. Valdymo sistemos reakcija į šulinį nuostato pokytį (perdavimo funkcija Nr2.)



2 pav. Valdymo sistemos reakcija į šulinį nuostato pokytį (perdavimo funkcija Nr3.)

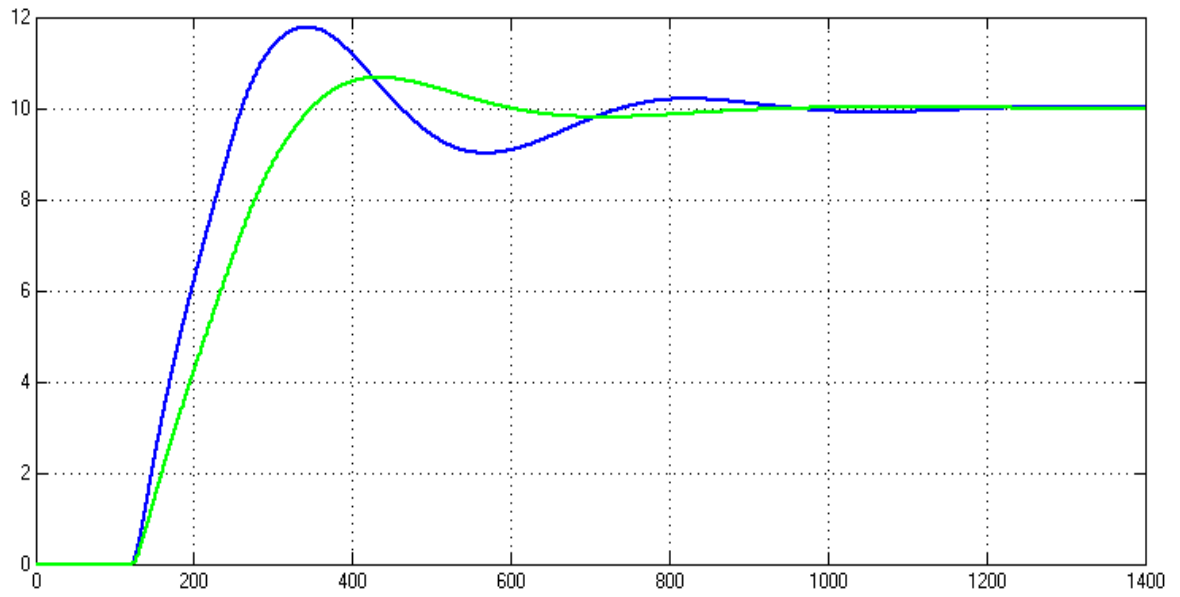


3 pav. Valdymo sistemos reakcija į šulinį nuostato pokytį (perdavimo funkcija Nr4.)

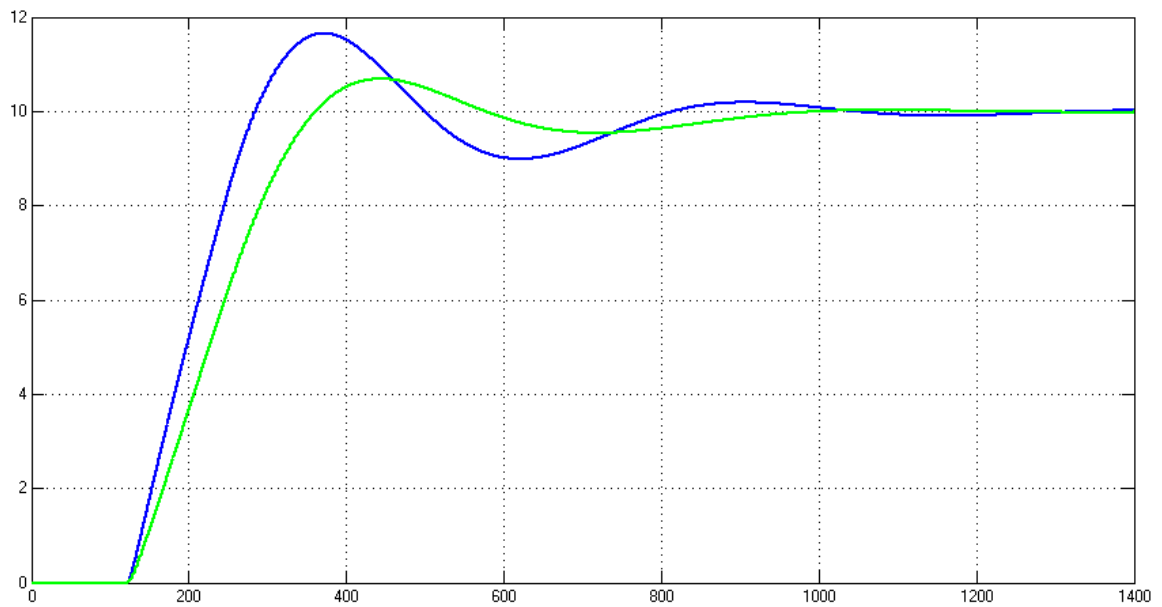


4 pav. Valdymo sistemos reakcija į šulinį nuostato pokytį (perdavimo funkcija Nr5.)

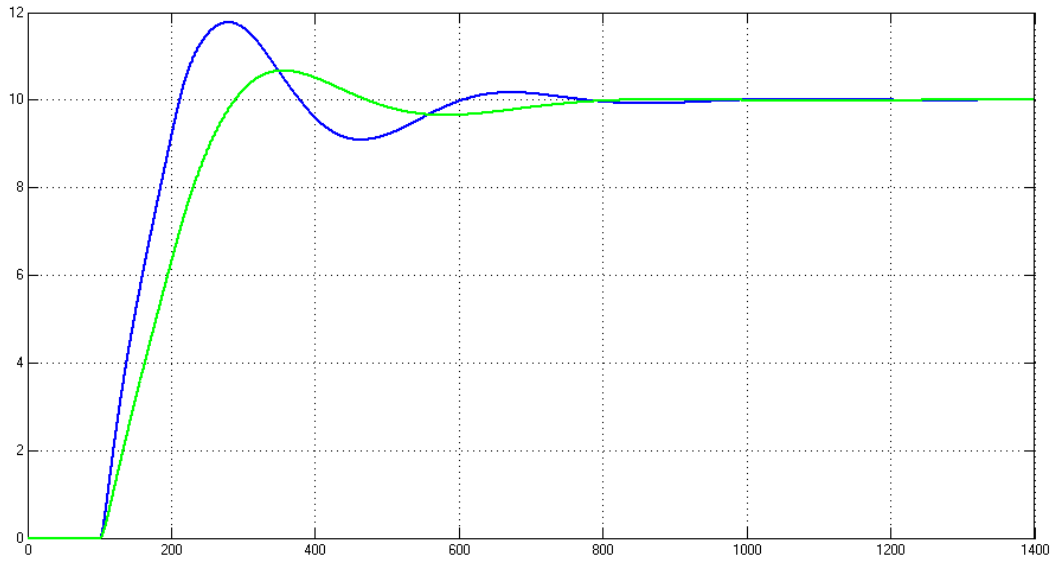
Priedas 2



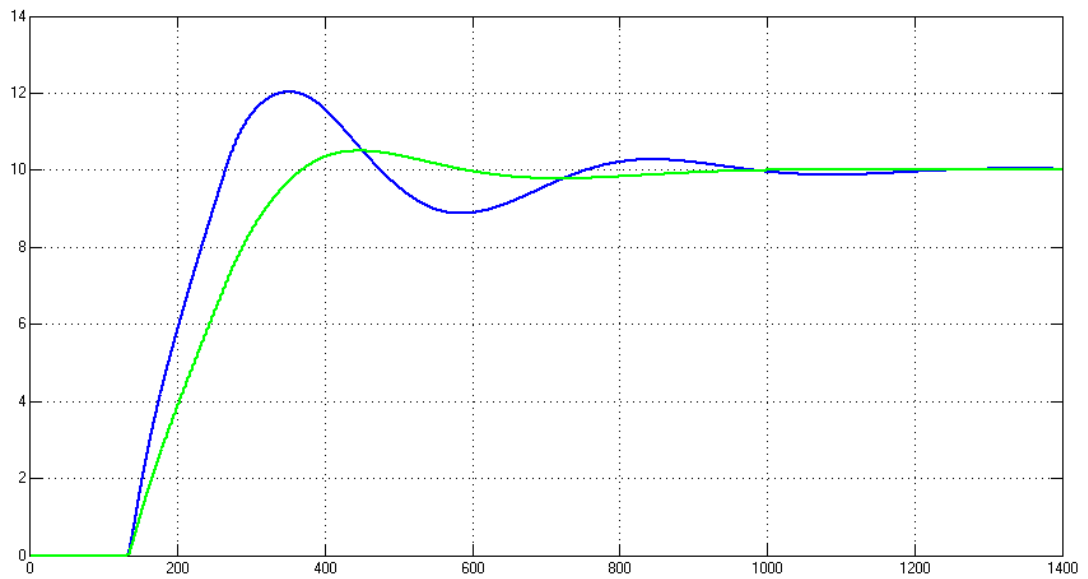
5 pav. Valdymo sistemos reakcija į šuolinį nuostato pokytį (perdavimo funkcija Nr2.)



6 pav. Valdymo sistemos reakcija į šuolinį nuostato pokytį (perdavimo funkcija Nr3.)



7 pav. Valdymo sistemos reakcija į šulinį nuostato pokytį (perdavimo funkcija Nr4.)



8 pav. Valdymo sistemos reakcija į šulinį nuostato pokytį (perdavimo funkcija Nr6.)