



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Tadas Patilskis

ITAE KRITERIJUMI PAGRISTŲ PID REGULIATORIAUS
DERINIMO METODŲ TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Prof. dr. Vytautas Galvanauskas

KAUNAS, 2018

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
AUTOMATIKOS KATEDRA

ITAE KRITERIJUMI PAGRISTŲ PID REGULIATORIAUS
DERINIMO METODŲ TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas
Valdymo technologijos (kodas 621H66001)

Vadovas

Prof. dr. Vytautas Galvanauskas

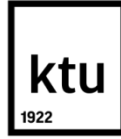
Recenzentas

Doc. dr. Kęstutis Brazauskas

Projektą atliko

Tadas Patilskis

KAUNAS, 2018



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Tadas Patilskis

(Studento vardas, pavardė)

Valdymo technologijos, 621H66001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „ITAE kriterijumi pagrįstų PID reguliatoriaus derinimo metodų tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 ____ m. _____ d.

Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Tado Patilskio** baigiamasis projektas tema „ITAE kriterijumi pagrįstų PID reguliatoriaus derinimo metodų 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)

Patilskis, Tadas. ITAE kriterijumi pagrįstų PID reguliatoriaus derinimo metodų tyrimas. Valdymo sistemų magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Vytautas Galvanauskas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Automatikos katedra.

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

Reikšminiai žodžiai: *ITAE, optimizavimas, PID, reguliatorius, derinimas, Sung, Hassan, Hwang, Rovira.*

Kaunas, 2018. 51 p.

SANTRAUKA

Šiame darbe atliekamas ITAE kriterijumi pagrįstų PID reguliatoriaus derinimo metodų tyrimas. Literatūros analizėje apžvelgiama PID reguliatoriaus struktūra, jų derinimo uždaviniai, procesų modeliai, integraliniai derinimo kriterijai ir tiriama derinimo metodai.

Atlikus literatūros analizę buvo atrinkti keturi tyrimo sąlygas tenkinantys metodai: *Sung* (1996), *Hassan* (1993), *Hwang* (1995) ir *Rovira* (1969). Šie metodai buvo ištirti pagal nuostato sekimo ir trikdžio kompensavimo sąlygas. Pagrindinis dėmesys buvo skiriamas *Sung* metodui, siekiant išsiaiškinti, ar taikant šį metodą galima gauti rezultatus artimus optimaliai pagal ITAE kriterijų suderintai sistemai. Taip pat buvo ištirtas pirmos eilės modelio su vėlinimu parametru radimo metodų pranašumas *Rovira* derinimo metodui, patikrintas optimalių PID reguliatoriaus parametru radimo metodas. Tyrimui atlikti naudojamas *Matlab* ir *Simulink* programų paketas.

Iš tyrimo rezultatų galima daryti išvadas, kad pagal ITAE kriterijų geriausi rezultatai, pagal abi derinimo sąlygas (nuostato sekimo ir trikdžio kompensavimo), buvo pasiekti naudojant *Sung* derinimo metodą, kurie ne daug skyrėsi nuo optimaliai pagal ITAE kriterijų suderintos sistemos rezultatų.

Patilskis, Tadas. INVESTIGATION OF PID CONTROLLER TUNING METHODS BASED ON ITAE CRITERION: *Master's thesis in Control Systems / supervisor prof. Vytautas Galvanauskas. 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: *ITAE, optimization, PID, controller, tuning, Sung, Hassan, Hwang, Rovira.*

Kaunas, 2018. 51 p.

SUMMARY

In this work investigation of PID controller tuning methods based on ITAE criterion is done. The structure of the PID controller, the purpose of tuning, process models, tuning integral criteria and tuning methods are investigated in literature review.

In the literature review, four methods satisfying the research conditions were selected: *Sung* (1996), *Hassan* (1993), *Hwang* (1995) and *Rovira* (1969). These methods have been investigated in accordance to setpoint tracking and disturbance rejection. The main focus was to find out if by using the *Sung* method results that are close to system optimized for ITAE criterion can be achieved. Furthermore, the superiority of methods for finding the first-order model with delay parameters used for *Rovira* tuning method was checked, the method for finding optimal parameters of the PID controller has been verified. *Matlab* and *Simulink* software package was used for the investigation.

From the results of the study conclusions can be drawn that when tuning the system for ITAE criterion, the best results for both tuning purposes (setpoint tracking and disturbance rejection) were achieved while using the *Sung* tuning method, which are very similar to the results of system optimized for ITAE criterion.

TURINYS

| | |
|--|----|
| ĮVADAS..... | 8 |
| 1. LITERATŪROS APŽVALGA..... | 9 |
| 1.1. Reguliatorių struktūra..... | 9 |
| 1.2. Reguliatorių derinimo uždaviniai..... | 10 |
| 1.3. Procesų modeliai..... | 10 |
| 1.3.1. Pirmos eilės aperiodinė grandis su vėlavimu..... | 11 |
| 1.3.2. Antros eilės aperiodinė grandis su vėlavimu..... | 12 |
| 1.4. ITAE kriterijus..... | 15 |
| 1.5. Tiriamieji PID regulatoriaus derinimo metodai..... | 16 |
| 1.5.1. <i>Sung</i> (1996) metodas..... | 17 |
| 1.5.2. <i>Hassan</i> (1993) metodas..... | 19 |
| 1.5.3. <i>Hwang</i> (1995) metodas..... | 22 |
| 1.5.4. <i>Rovira</i> (1969) metodas..... | 23 |
| 2. METODOLOGINĖ DALIS..... | 25 |
| 2.1. Tiriamasis modelis..... | 25 |
| 2.2. Pirmos eilės modelio su vėlinimu parametrų identifikavimas..... | 26 |
| 2.2.1. Mažiausių kvadratų metodas..... | 27 |
| 2.2.2. Liestinės per perlinkio tašką metodas..... | 27 |
| 2.3. Antros eilės modelio su vėlinimu parametrų indentifikavimas..... | 28 |
| 2.4. Tyrimas su rele ir neigiamu grįžtamuoju ryšiu..... | 29 |
| 2.5. PID regulatoriaus parametrų optimizavimas pagal ITAE kriterijų..... | 30 |
| 2.5.1. Nuostato sekimo sąlyga..... | 30 |
| 2.5.2. Trikdžio kompensavimo sąlyga..... | 31 |
| 3. TYRIMO REZULTATAI..... | 33 |
| 3.1. Optimalių PID regulatoriaus parametrų radimo patikrinimas..... | 33 |
| 3.2. Pirmos eilės modelio su vėlinimu parametrų radimo metodų palyginimas..... | 33 |
| 3.2.1. Nuostato sekimo sąlyga..... | 34 |
| 3.2.2. Trikdžio kompensavimo sąlyga..... | 36 |

| | |
|---|----|
| 3.3. Bendras visų metodų palyginimas..... | 37 |
| 3.3.1. Nuostato sekimo sąlyga..... | 37 |
| 3.3.2. Trikdžio kompensavimo sąlyga | 40 |
| IŠVADOS..... | 43 |
| LITERATŪROS SĄRAŠAS..... | 45 |
| PRIEDAI..... | 47 |
| Priedas Nr. 1. Pirmos eilės modelio su vėlinimu parametrų identifikavimo pagal mažiausių kvadratų metodą <i>Matlab</i> programinis kodas | 47 |
| Priedas Nr. 2. Pirmos eilės modelio su vėlinimu parametrų identifikavimo pagal liestinės perlinkio taške metodą <i>Matlab</i> programinis kodas | 47 |
| Priedas Nr. 3. Antros eilės modelio su vėlinimu parametrų identifikavimo <i>Matlab</i> programinis kodas..... | 48 |
| Priedas Nr. 4. Tyrimo su rele ir neigiamu grįžtamoju ryšiu <i>Matlab</i> programinis kodas | 50 |
| Priedas Nr. 5. PID reguliatoriaus optimizavimo pagal ITAE kriterijų <i>Matlab</i> programinis kodas | 50 |

IVADAS

Šiuolaikiniame pasaulyje dinaminėms sistemoms valdyti dažnai yra taikomi valdymo teorijoje naudojami metodai, tokie kaip grįžtamasis ryšys ir proporciniai integruojantys, diferencijuojantys (angl. *Proportional Integral Derivative, PID*) reguliatoriai. Šie reguliatoriai yra valdymo teorijos pagrindas jau daugiau kaip septyniasdešimt metų. PID reguliatorių gebėjimas sureguliuoti praktikoje naudojamus pramoninius procesus nulėmė jų platų naudojimą pramonės srityse. Teigiama, kad daugiau nei 95 % pramonės valdymo sistemų yra valdomos naudojant PID reguliatorius [1]. Šių reguliatorių diegimas yra rekomenduojamas žemos arba vidutinės eilės procesams su mažu laiko uždelsimu, kai parametrai nustatomi naudojant derinimo taisykles ir reguliatoriaus sintezė atliekama bent kartą.

Nors kelis dešimtmečius ši sritis buvo plečiama, duomenys gauti apie pramoninio valdymo būseną iš daugelio įmonių rodo, kad 30 % įdiegtų reguliatorių dirba rankiniu režimu ir 65 % automatiniu režimu dirbančių reguliatorių veikia su prastai suderintais parametrais. Tikėtina, kad 25 % iš visų PID reguliatorių, kurie naudoja numatytus gamyklinius nustatymus, visiškai nebuvo derinti. Šie duomenys rodo, kad PID valdiklių parametrų derinimas yra keblė problema taikant valdiklius. Pagrindinis būdas reguliatoriams suderinti - panaudojimas derinimo taisyklių. Šių taisyklių vien PID tipo reguliatoriams yra bent 258, kurios remiasi įvairiais derinimo kriterijais ir yra skirtos įvairiems proceso modeliams [2]. Dėl tokios taisyklių gausos kyla dvejonų dėl tinkamiausio pasirinkimo. Šiame projekte bus tiriami paklaidos modulio svertinės laiko funkcijos integralo (angl. *Integral of Time-weighted Absolute Error, ITAE*) vertės minimumo kriterijumi paremtų PID reguliatoriaus derinimo metodai, siekiant patikrinti *Sung'o* (*Sung*, 1996m.) metodą ir rasti tiksliausiai ITAE kriterijaus minimumą užtikrinantį variantą.

Tyrimo tikslas:

Atlikti *Sung'o* PID reguliatorių derinimo metodo tyrimą, palyginti jį su kitais derinimo metodais paremtais ITAE kriterijumi ir palyginti su optimizuota sistema pagal ITAE kriterijų.

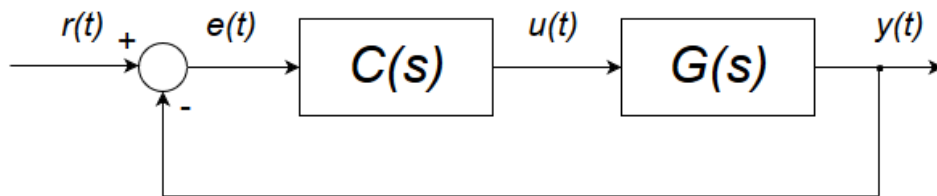
Tyrimo uždaviniai:

Iš trečios eilės objekto funkcijos identifikuoti pirmos ir antros eilės modelio su vėlinimu parametrus, rasti optimalius PID reguliatoriaus parametrus pagal ITAE kriterijų ir atlikti visų apskaičiuotų ir sumodeliuotų derinimo metodų palyginimą pagal nuostato sekimo ir trikdžio kompensavimo sąlygas.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Reguliatorių struktūra

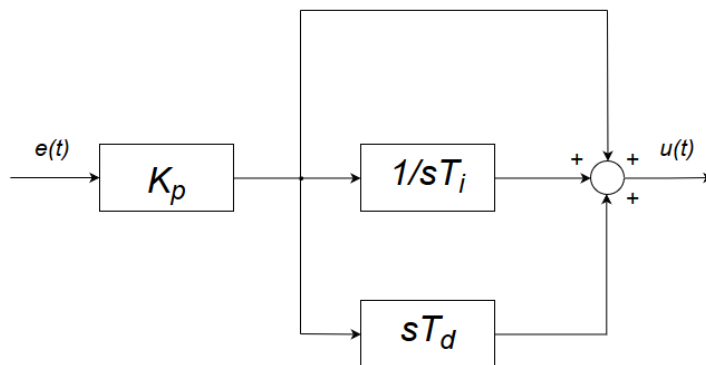
Tipinė valdymo sistema susideda iš valdomo objekto (procesu) ir reguliatoriaus (1.1 pav).



1.1 pav. Uždara valdymo sistema su PID reguliatoriumi

Pagrindinis valdymo teorijos uždavinys yra procesą suvaldyti taip, kad į jį paduodant atitinkamą įėjimo signalą būtų gaunamas norimas išėjimo signalas. Tai įgyvendinti dažniausiai yra panaudojamas grįžtamasis ryšys su reguliatoriumi, kuris lygina išmatuotą sistemos išėjimo signalą $y(t)$ su nuostato signalu $r(t)$ ir, atsižvelgiant į jų skirtumą $e(t)$ (paklaidą), kuris aprašytas (1.1) lygtimi, artina sistemos išėjimo signalą prie nustatytos vertės:

$$e(t) = r(t) - y(t). \quad (1.1)$$



1.2 pav. PID reguliatoriaus struktūrinė schema

Standartinio PID reguliatoriaus (1.2 pav.), skirtu SISO procesams, išėjimo signalas aprašomas [1]:

$$U(s) = C(s) \cdot E(s), \quad (1.2)$$

čia $U(s)$ – reguliatoriaus išėjimo signalas; $C(s)$ – reguliatoriaus perdavimo lygtis; $E(s)$ – paklaida, išreikšta Laplaso lygtimi.

Tokio PID reguliatoriaus perdavimo funkcija:

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right). \quad (1.3)$$

Iš (1.3) lygties matyti, kad reguliatoriaus perdavimo funkcija yra aprašoma trijų pasvertų parametų suma, kurie yra: proporcinis perdavimo koeficientas (K_p), kuris nusako esamos paklaidos įtaką valdymo sistemai; integravimo laiko pastovioji (T_i), kuri nulemia reakciją, priklausomai nuo paklaidos kreivės ploto, taip atsižvelgiant į ankstesnes paklaidos vertes; diferencijavimo laiko pastovioji

(T_d), kuri veikia sistemą priklausomai nuo paklaidos pokyčio greičio laike [3]. Šių trijų parametru parinkimas nulemia valdymo mechanizmo poveikį proceso užduoties vykdymo (angl. *Performance*) kokybei. Tiriamų derinimo metodų tikslas ir yra surasti šių trijų parametru vertes, atsižvelgiant į sistemos modelį ir proceso parametrus.

1.2. Reguliatorių derinimo uždaviniai

Pagrindiniai du regulatoriaus derinimo uždaviniai yra nuostato sekimas (angl. *setpoint tracking*) ir trikdžio kompensavimas (angl. *disturbance rejection*). Kaip derinti reguliatorių priklauso nuo valdomo proceso ir nuo jo valdymo būdo:

- Reguliatorius suderinamas nuostato sekimui, kai yra numatoma, kad nuostato signalas bus keičiamas dažnai, dėl to proceso reguliatorius turi gebėti atitinkamai mažinti arba didinti proceso išėjimo reikšmę.
- Reguliatorius suderinamas trikdžio kompensavimui, kai proceso nuostato signalas nekinta ir reikia, kad proceso išėjimas visada būtų jam kuo artimesnis. Dėl šios priežasties proceso reguliatorius turi gebėti gražinti proceso išėjimo signalą kuo arčiau nuostato signalo vertės, kai procesą veikia trikdžiai ar atsiranda apkrovos pakitimų, kurie sukelia nuokrypį nuo paskirto nuostato signalo [22].

Nuostato sekimui ir trikdžio kompensavimui suderinti regulatoriai gali veikti abejais atvejais, kai keičiamas nuostato signalas ir kai procesą veikia trikdžiai, tačiau norint pasiekti geresnius rezultatus reikia parinkti tinkamą derinimo uždavinį. Ši problema labiausiai jaučiasi tada, kai valdymo sistemos proceso vėlinimas (τ_m) yra didesnis už proceso laiko konstantą (T_m). Jei tokia valdymo sistema yra suderinta trikdžio kompensavimui ir nuostato signalas yra pakeičiamas – atsiranda perreguliavimas. Jei valdymo sistema yra suderinama nuostato sekimui, taip, kad nebūtų perreguliavimo pakeičiant nuostato signalą, tada reakcija į trikdžius būna uždelsta [23].

1.3. Procesų modeliai

Procesai su vėlavimu gali būti modeliuojami įvairiais būdais. Parinkta modelio sudarymo strategija daro didelę įtaką modelio parametru vertėms, kurios atitinkamai paveiks regulatoriaus parametru reikšmes, parinktas atsižvelgiant į derinimo taisykles. Procesų modeliai gali būti klasifikuojami į savireguliacinius (angl. *self-regulating*) ir ne savireguliacinius (angl. *non-self-regulating*) [1]. Savireguliaciniai yra tokie procesai, kurie visada stabilizuojasi tam tikrame pusiausvyros taške, o ne savireguliaciniai neturi tokio taško ir atitinkamai nevaldant sistema tampa nestabili [4]. Šiame darbe bus tiriami pirmos ir antros eilės savireguliaciniai procesai su vėlavimu.

1.3.1. Pirmos eilės aperiodinė grandis su vėlavimu

Pirmos eilės aperiodinė grandis su vėlavimu (angl. *First Order Plus Dead Time, FOPDT*) yra bendra daugelio stabilių dinaminų procesų aprašymo forma [5]. FOPDT procesų diferencialinė lygtis:

$$T_m \frac{dy(t)}{dt} = -y(t) + K_m u(t - \tau_m). \quad (1.4)$$

FOPDT proceso modelio perdavimo funkcija:

$$G_m(s) = \frac{K_m e^{-s\tau_m}}{1 + sT_m}. \quad (1.5)$$

Šioje lygtyse yra trys nežinomi parametrai:

- K_m – proceso modelio perdavimo koeficientas. Tai pasikeitimas objekto išėjime y pagal tam tikrą paduoto įėjimo u pokytį. Proceso modelio perdavimo koeficientą galima apskaičiuoti išėjimo signalo $y(t)$ pokytį padalinus iš įėjimo signalo $u(t)$ pokyčio, esant nusistovėjusiose būsenose (angl. *Steady State*) pradinėse ir galutinėse sąlygose (1.6). Šis parametras parodo sistemos reakcijos dydį nepriklausomai nuo jos greičio.

$$K_m = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{y_{gal} - y_{prad}}{u_{gal} - u_{prad}}. \quad (1.6)$$

- T_m – proceso modelio laiko konstanta. Atsižvelgiant į $u(t)=\Delta u$ pokytį, tiesinės pirmos eilės diferencialinės lygties (be vėlavimo) sprendimas tampa:

$$y(t) = e^{-\frac{t}{T_m}} \cdot y(0) + \left(1 - e^{-\frac{t}{T_m}}\right) K_m \Delta u. \quad (1.7)$$

Kai pradinės sąlygos $y(0)=0$ ir $t=T_m$, lygtį galima supaprastinti:

$$y(T_m) = \left(1 - e^{-\frac{T_m}{T_m}}\right) K_m \Delta u = (1 - e^{-1}) K_m \Delta u \approx 0.632 K_m \Delta u. \quad (1.8)$$

Iš (1.8) lygties galima spręsti, kad proceso modelio laiko konstanta T_m yra laikas, reikalingas išėjimui pasiekti apie 63.2 % $(1 - e^{-1})$ nusistovėjusios išėjimo reikšmės. Šis parametras parodo reakcijos greitį.

- τ_m – proceso modelio vėlavimas. Tai laiko postūmis įėjimo kintamajame $u(t)$ (1.9). Į objektą padavus vienetinį įėjimo signalą $u(t)$, išėjimo signalas $y(t)$ sureaguos ne iš karto, o tik praėjus tam tikram laiko tarpui, kuris ir yra vadinamas vėlavimu τ_m .

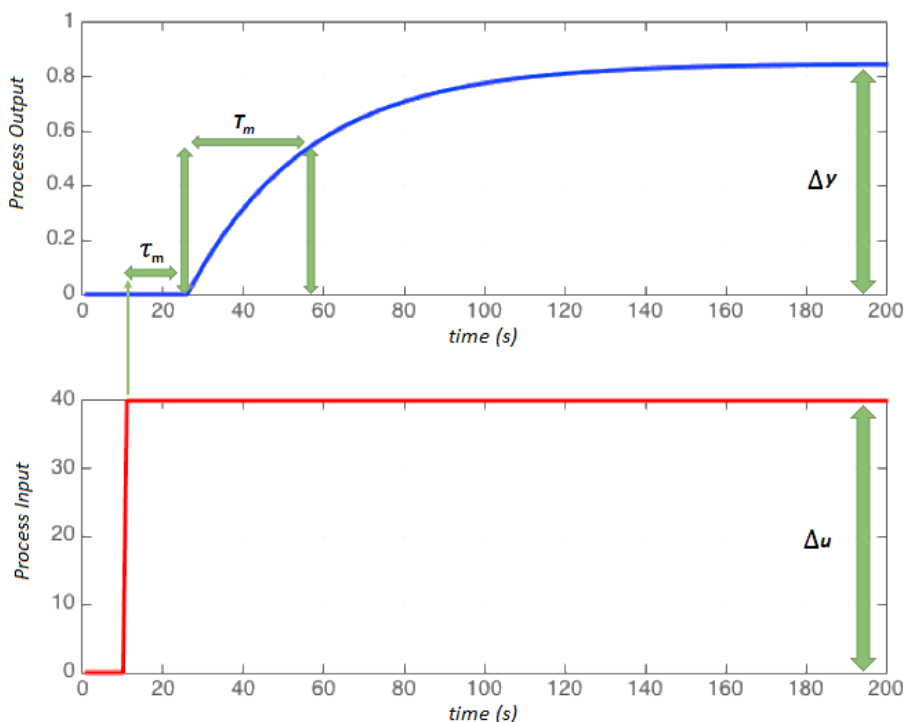
$$u(t - \tau_m). \quad (1.9)$$

Pirmos eilės diferencialinės lygties su vėlavimu sprendinys (1.11) yra gaunamas įėjime pakeitus visus laiko kintamuosius t į $t - \tau_m$ ir pritaikius sąlygą:

$$y(t < \tau_m) = y(0), \quad (1.10)$$

$$y(t \geq \tau_m) = \left(e^{-\frac{(t-\tau_m)}{T_m}} \right) y(0) + \left(1 - e^{-\frac{(t-\tau_m)}{T_m}} \right) K_p \Delta u. \quad (1.11)$$

Šiuos parametrus galima rasti iš grafikų, į objekto įėjimą padavus vienetinį signalą ir stebint jo išėjimą, kaip pavaizduota pavyzdyje (1.3 pav.).



1.3 pav. FOPDT proceso parametrų radimo grafikai [6]

1.3.2. Antros eilės aperiodinė grandis su vėlavimu

Antros eilės aperiodinė grandis su vėlavimu (angl. *Second Order Plus Time Delay, SOPTD*) taip pat aprašo daugelį stabilių dinaminių procesų [7]. SOPTD procesų diferencialinė lygtis:

$$T_m^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + 2\xi T_m \frac{dy}{dt} + y = K_m u(t - \tau_m). \quad (1.12)$$

SOPTD proceso modelio su vėlavimu perdavimo funkcija:

$$G_m(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_m}{T_m^2 s^2 + 2\xi T_m s + 1} \cdot e^{-\tau_m s} \quad (1.13)$$

arba

$$G_m(s) = \frac{K_m}{(1 + T_{m1}s)(1 + T_{m2}s)} \cdot e^{-\tau_m s}. \quad (1.14)$$

Šiose lygtyse yra keturi nežinomi parametrai:

- K_m – proceso modelio perdavimo koeficientas. Čia jis toks pat kaip ir pirmos eilės proceso (FOPDT) modelyje ir yra aprašomas (1.6) lygtimi.

- ζ – proceso modelio slopinimo koeficientas (angl. *Damping factor*). Antros eilės sistemos reakcija į vienetinį signalą priklauso nuo to ar sistema yra perslopinta (angl. *Overdamped*), kritiškai prislopinta (angl. *Critically damped*) ar apslopinta (angl. *Underdamped*).

- *Perslopinta* – sistema, kurios slopinimo koeficientas $\zeta > 1$. Tokios sistemos sprendimas, atsižvelgiant į M didumo proceso reakciją, ją veikiant vienetiniam signalui:

$$y(t) = K_m M \left(1 - e^{-\frac{\zeta t}{T_m}} \left[\cosh \left(\frac{t}{T_m} \sqrt{\zeta^2 - 1} \right) + \frac{\zeta}{\sqrt{\zeta^2 - 1}} \sinh \left(\frac{t}{T_m} \sqrt{\zeta^2 - 1} \right) \right] \right). \quad (1.15)$$

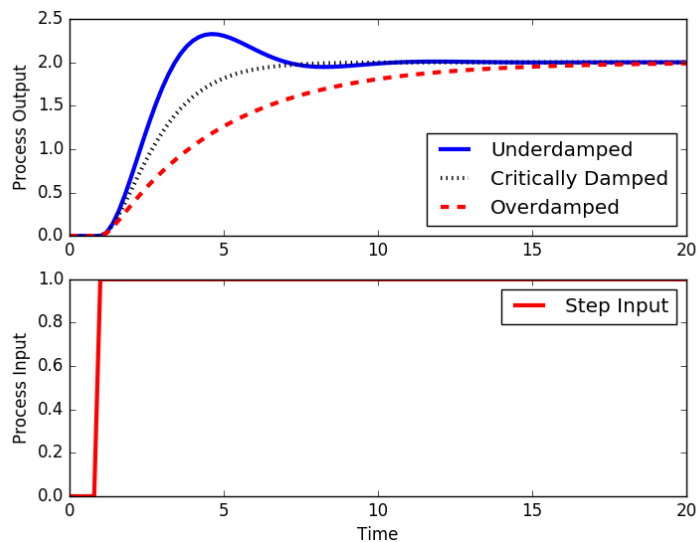
- Kritiškai prislopinta – sistema, kurios slopinimo koeficientas $\zeta = 1$. Tokios sistemos sprendimas:

$$y(t) = K_m M \left[1 - \left(1 + \frac{t}{T_m} \right) e^{-\frac{t}{T_m}} \right]. \quad (1.16)$$

- Apslopinta – sistema, kurios slopinimo koeficientas $0 \leq \zeta < 1$. Tokios sistemos sprendimas:

$$y(t) = K_m M \left(1 - e^{-\frac{\zeta t}{T_m}} \left[\cos \left(\frac{t}{T_m} \sqrt{1 - \zeta^2} \right) + \frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin \left(\frac{t}{T_m} \sqrt{1 - \zeta^2} \right) \right] \right). \quad (1.17)$$

Kaip antros eilės sistemos reakcija į vienetinį įėjimo signalą priklauso nuo slopinimo koeficiento galima matyti iš 1.4 pav.



1.4 pav. Proceso įėjimo ir išėjimo reakcijos priklausomybės nuo slopinimo koeficiento grafikai

- T_m – proceso modelio laiko konstanta (T_{m1} , T_{m2} – pirmos ir antros eilės procesų modelių laiko konstantos). Tai laikas, per kurį antros eilės sistemos išėjimo signalas pasiekia naują nusistovėjusią būseną. Perslopinta antros eilės sistema gali būti sudaryta iš dviejų pirmos eilės sistemų:

$$T_{m1} \frac{dx}{dt} = -x + K_p u; \quad (1.18)$$

$$\frac{X(s)}{U(s)} = \frac{K_p}{T_{m1}s + 1}; \quad (1.19)$$

$$T_{m2} \frac{dy}{dt} = -y + x; \quad (1.20)$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{T_{m2}s + 1}. \quad (1.21)$$

Šias sistemas sudauginame:

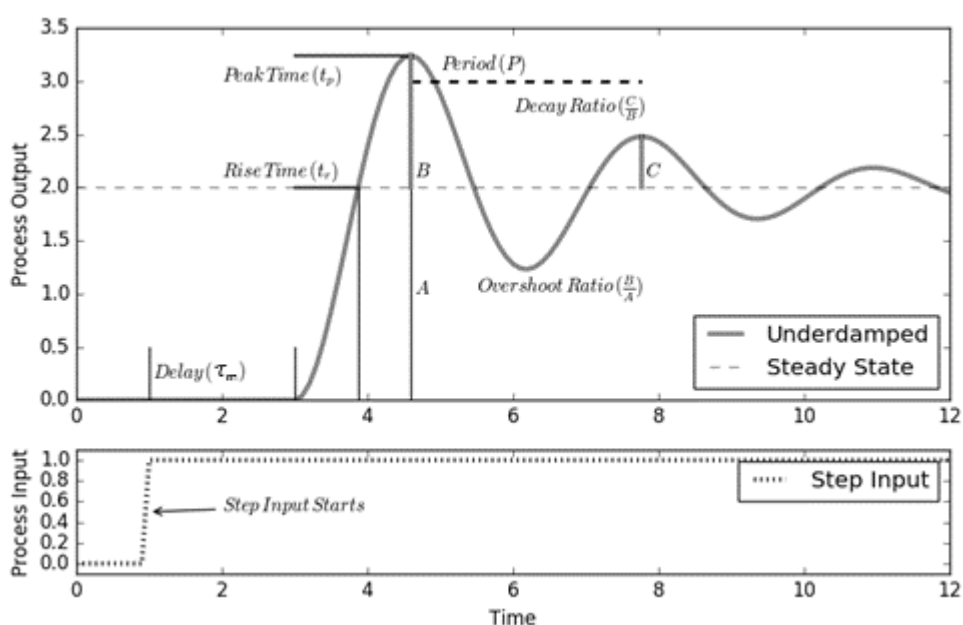
$$\begin{aligned} \frac{X(s)}{U(s)} \cdot \frac{Y(s)}{X(s)} &= \frac{Y(s)}{U(s)} = \left(\frac{K_p}{T_{m1}s + 1} \right) \left(\frac{1}{T_{m2}s + 1} \right) = \\ &= \frac{K_p}{T_{m1}T_{m2}s^2 + (T_{m1} + T_{m2})s + 1}. \end{aligned} \quad (1.22)$$

Prilyginus $T_{m1}T_{m2} = T_m^2$ ir $T_{m1} + T_{m2} = 2\xi T_m$, gauname perdavimo lygtį (be vėlinimo):

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_p}{T_m^2 s^2 + 2\xi T_m s + 1}. \quad (1.23)$$

- τ_m – proceso modelio vėlavimas. Čia jis toks pat kaip ir pirmos eilės proceso (FOPDT) modelyje, tačiau antros eilės proceso modelio perdavimo funkcijoje prisideda $e^{-\tau_m s}$ (1.13) ir laikinėse lygtyse visi laiko kintamieji t yra pakeičiami $t - \tau_m$ (1.12).

Šiuos parametrus galima rasti iš grafikų, į objekto įėjimą padavus vienetinį signalą ir stebint jo išėjimą, kaip pavaizduota pavyzdyje (1.5 pav.).



1.5 pav. SOPTD proceso parametrų radimo grafikai

Slopinimo koeficientą ζ galima apskaičiuoti žinant perreguliavimą OS (angl. *Overshoot*) [8]:

$$\zeta = \sqrt{\frac{\ln(OS)^2}{\pi^2 + \ln(OS)^2}}. \quad (1.24)$$

Perreguliavimas (OS) – pirmo svyravimo amplitudė, kuri viršija nusistovėjusią būseną, šios nusistovėjusios reikšmės atžvilgiu.

Proceso laiko konstantą T_m galima apskaičiuoti žinant svyravimų periodą P ir slopinimo koeficientą ζ :

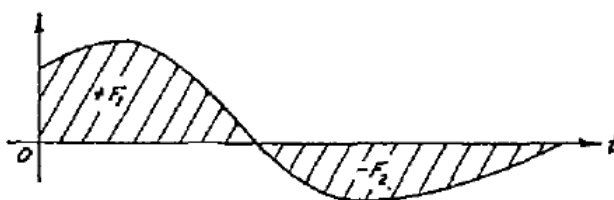
$$T_m = \sqrt{\frac{1 - \zeta^2}{2\pi}} \cdot P. \quad (1.25)$$

Periodas (P) – laiko tarpas tarp dviejų svyravimų.

1.4. ITAE kriterijus

Vienas pagrindinių PID reguliatorių derinimo tikslų yra sistemos stabilumas, tačiau vien stabilumas, nors tai yra būtina gerai sistemai, neužtikrina, kad sistema bus tinkama naudoti. Taip pat turi būti pasiektas tam tikras užduoties vykdymo tikslumas ir greitis. Šiuos parametrus yra sunkiau įvertinti nei stabilumą, nes nėra paprasto sprendimo kaip stabili arba nestabili sistema. Norint įvertinti užduoties vykdymo parametrų kokybę, turi būti gaunamas tam tikras skaičius, arba grupė skaičių, nusakančių paklaidą [9]. Remiantis šiomis vertėmis turi būti galima nusakyti ar suprojektuota sistema atitinka keliamus reikalavimus.

Visų pirma, skaičius apibūdinantis užduoties vykdymo parametrų kokybę, turi būti nustatytas iš paklaidos, todėl, remiantis (1.1) lygtimi, turi būti apskaičiuotas plotas tarp nuostato signalo $n(t)$ ir objekto išėjimo signalo $y(t)$ funkcijų. Tai padaryti galima apskaičiuavus šių funkcijų integralą (1.26). Tada galima gauti parametą - plotą tarp šių funkcijų (1.6 pav.), kuris nusako sistemos paklaidą. Kuo mažesnis šis plotas – tuo geresnė sistema.



1.6 pav. Paklaidos ploto grafikas

$$E = \int_0^{\infty} (F_1(t) - F_2(t)) dt = \int_0^{\infty} (r(t) - y(t)) dt = \int_0^{\infty} e(t) dt. \quad (1.26)$$

Vienas iš pagrindinių kriterijų yra paklaidos kvadrato integralas (angl. *Integral of Square of Error*, *ISE*). Toks kriterijus yra aprašomas (1.27) lygtimi:

$$E = \int_0^{\infty} e^2(t) dt. \quad (1.27)$$

Iš čia matome, kad, priešingai nei (1.26) lygyje, paklaidos integralo E vertė gali būti tik teigiamas arba lygus nuliui skaičius, tačiau tokiu atveju sistemos paklaida $e(t)$ nuo pat pradžios iki galo turi būti lygi nuliui. Tai yra vienas šio kriterijaus trūkumų, nes beveik visose sistemose yra pradinė paklaida. Kitas trūkumas yra toks, kad didelės paklaidos atsirandančios trumpam laikui (kaip pradinė paklaida), daro didelę įtaką užduoties vykdymui, nes visos paklaidos yra pasveriamos vienodai. Sistemos reakcija dažnai turi mažą perreguliavimą, bet taip pat ir ilgą nusistovėjimo laiką. [10]. Tačiau realiose sistemose šis kriterijus dar yra dažnai naudojamas dėl paprastumo tiesiogiai išmatuojant paklaidos vertę (dažniausiai nereikalauja papildomos įrangos) ir ISE yra patogiu matematiškai apskaičiuoti [9].

Pagrindinis paklaidos integralo (1.26) kriterijaus trūkumas yra tai, kad jei sistemos reakcija yra svyruojanti, teigiami ir neigiami plotai vienas kitą kompensuoja ir todėl negalima teigti, kad gaunama integralo vertė yra tinkamai atvaizduojama. Tai galima pakeisti taikant paklaidos modulio svertinės laiko funkcijos integralo (ITAE) kriterijų (1.28):

$$E = \int_0^{\infty} t|e(t)| dt. \quad (1.28)$$

Pagrindinis svertinės laiko funkcijos panaudojimo privalumas yra toks, kad pradinė paklaidos vertė stipriai neįtakoja paklaidos integralo. Tai yra gerai, nes daugelyje sistemų pradinė paklaida yra sunkiai išvengiama dėl proceso inercijos. O kadangi prie mažų laiko t verčių integralas yra palyginti mažas, galima teigti, kad pradinei paklaidai kriterijus yra nejautrus. Taip pat didėjant laiko t vertei, didėja jautrumas vėlesnėms paklaidoms, kas taip pat yra gera savybė. Projektuojant PID reguliatorių, maža ITAE kriterijaus vertė yra laikoma geru užduoties vykdymo kriterijumi [11].

ITAE kriterijus buvo aprašytas *Graham 'o* ir *Latrop 'o* (*Graham* ir *Lathrop*, 1953m.). Šis kriterijus yra dažnai naudojamas kaip užduoties vykdymo kriterijus valdymo sistemų modeliavime. Optimizuojant reguliatorių pagal šį kriterijų, sistema įgyja didelės apkrovos trikdžio kompensavimą ir sumažina sistemos perreguliavimą tuo pačiu palaikant sistemos robastiškumą (angl. *Robustness*) [12].

Standartiniai kriterijai teikia greitą ir lengvą būdą optimalios dinaminės reakcijos sintezei skirtą įvairių objektų pritaikymui. ITAE kriterijus gali būti sėkmingai pritaikomas net ir aukštos eilės tiesinėms, netiesinėms arba daugelio įėjimų – daugelio išėjimų sistemoms, o tai leidžia atlikti greitus ir tikslius eksperimentinius sistemos pakeitimus [13].

1.5. Tiriamieji PID reguliatoriaus derinimo metodai

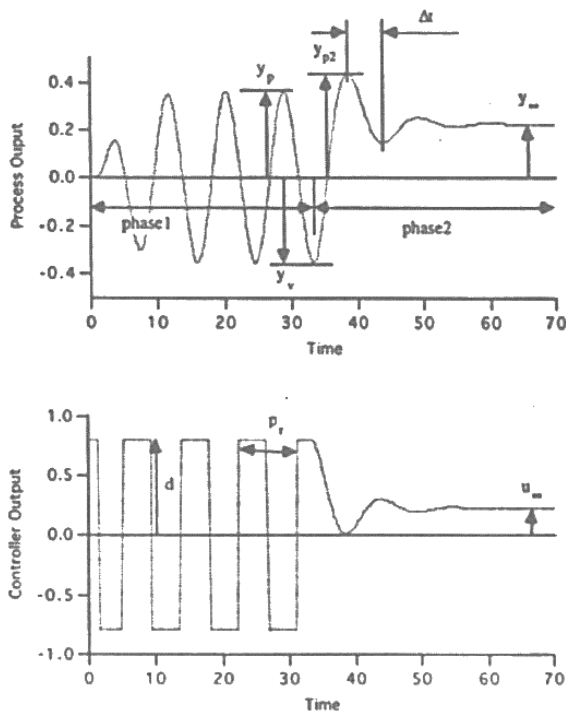
PID reguliatoriaus derinimo metodo tikslas yra panaudojant gautus eksperimentinius rezultatus apskaičiuoti PID reguliatoriaus parametrus: reguliatoriaus proporcinį perdavimo koeficientą (K_p), integravimo laiko pastoviąją (T_i) ir diferencijavimo laiko pastoviąją (T_d). Iš *Odvaer 'io* (*O'Dwyer*,

2009m.) PID reguliatorių derinimo metodų žinyno [1] buvo išrinkti keturi metodai atitinkantys iškeltas tyrimo sąlygas: metodas turi būti skirtas PID reguliatoriui derinti pagal ITAE kriterijų. Šie metodai yra skirti pirmos ir antros eilės modelių su vėlinimu derinimui, mažinant ITAE kriterijaus vertę. *Sung'o* (*Sung*, 1996m.), *Hasan'o* (*Hassan*, 1993m.) ir *Hvang'o* (*Hwang*, 1995m.) metodai naudoja antros eilės sistemos su vėlinimu modelį, o *Roviros* (*Rovira*, 1969m.) metodas pirmos eilės sistemos su vėlinimu modelį. Tyrimo metu bus atliekama išrinktų metodų palyginamoji analizė.

1.5.1. *Sung* (1996) metodas

Sung'o straipsnyje [14] pateikiamas naujas procesų identifikacijos metodas, panaudojant antros eilės su vėlinimu modelį ir derinimo metodą PID reguliatoriui. Proceso identifikavimui yra naudojamas kombinuotas dviejų stadijų testas, kurį sudaro:

- Relės panaudojimas (*phase 1*)
- Proporcinio reguliatoriaus panaudojimas (*phase 2*):



1.7 pav. *Sung'o* metodo parametrų radimo grafikai

Panaudojus iš identifikavimo proceso gautus duomenis, galima apskaičiuoti reikiamus parametrus, reikalingus reguliatoriaus derinimui:

$$\xi_c = \frac{-\ln\left(\frac{y_p^2 - y_{\infty}}{y_{\infty} + y_v}\right)}{\sqrt{\pi^2 + \left[\ln\left(\frac{y_p^2 - y_{\infty}}{y_{\infty} + y_v}\right)\right]^2}} \quad (1.29)$$

čia ξ_c – reguliatoriaus slopinimo koeficientas; kiti parametrai randami iš grafiko.

$$T_c = \Delta t \sqrt{\frac{1 - \xi_c^2}{\pi}}, \quad (1.30)$$

čia T_c – regulatoriaus laiko konstanta.

$$\tau_c = \frac{\pi + \arctan 2(-2\pi\omega_r\xi_c, 1 - T_c\omega_r^2)}{\omega_r}, \quad (1.31)$$

čia: τ_c – regulatoriaus vėlinimas; $\omega_r = \frac{2\pi}{p_r}$.

K_c parenkamas toks, kad atitiktų $0.3K_{cu} < K_c < 0.5K_{cu}$.

$$K_{cu} = \frac{4d}{\pi a}; \quad (1.32)$$

$$a = \frac{y_v + y_p}{2}. \quad (1.33)$$

Turint šiuos parametrus, galima apskaičiuoti reikiamus antros eilės modelio su vėlinimu parametrus:

$$K_m = \frac{y_\infty}{u_\infty}; \quad (1.34)$$

$$\tau_m = \tau_c; \quad (1.35)$$

$$T_m = \sqrt{(1 + K_c K_m) T_c^2 - \frac{K_c K_m \tau_c^2}{2}}; \quad (1.36)$$

$$\xi_m = \frac{2(1 + K_c K_m) T_c \xi_c + K_c K_m \tau_c}{2T_m}. \quad (1.37)$$

Atlikus skaičiavimus, šiuos parametrus galima įsistatyti į PID regulatoriaus derinimo lygtis. *Sung* 'o metodas gali būti naudojamas sistemos nuostato sekimui ir trikdžio kompensavimui, todėl yra naudojami du atskiri lygčių rinkiniai.

Nuostato sekimo lygtys:

Regulatoriaus proporcinis perdavimo koeficientas K_c :

$$K_c = \frac{1}{K_m} \left[-0.04 + \left[0.333 + 0.949 \cdot \left(\frac{\tau_m}{T_{m1}} \right)^{-0.983} \right] \cdot \xi_m \right], \text{ kai } \xi_m \leq 0.9 \quad (1.38)$$

arba

$$K_c = \frac{1}{K_m} \left[-0.544 + 0.308 \cdot \frac{\tau_m}{T_{m1}} + 1.408 \cdot \left(\frac{\tau_m}{T_{m1}} \right)^{-0.832} \cdot \xi_m \right], \text{ kai } \xi_m > 0.9. \quad (1.39)$$

Regulatoriaus integravimo laiko pastovioji T_i :

$$T_i = T_{m1} \cdot \left[2.055 + 0.072 \cdot \left(\frac{\tau_m}{T_{m1}} \right) \right] \cdot \xi_m, \text{ kai } \frac{\tau_m}{T_{m1}} \leq 1 \quad (1.40)$$

arba

$$T_i = T_{m1} \cdot \left[1.768 + 0.329 \cdot \left(\frac{\tau_m}{T_{m1}} \right) \right] \cdot \xi_m, \text{ kai } \frac{\tau_m}{T_{m1}} > 1. \quad (1.41)$$

Regulatoriaus diferencijavimo laiko pastovioji T_d prie bet kokių parametų verčių:

$$T_d = \frac{T_{m1}}{\left[1 - e^{-\frac{\left(\frac{\tau_m}{T_{m1}}\right)^{1.06} \cdot \xi_m}{0.87}} \right] \cdot \left[0.55 + 1.683 \cdot \left(\frac{T_{m1}}{\tau_m}\right)^{1.09} \right]}. \quad (1.42)$$

Trikdžio kompensavimo lygtys:

Regulatoriaus proporcinis perdavimo koeficientas K_c :

$$K_c = \frac{1}{K_m} \left[-0.67 + 0.297 \left(\frac{T_{m1}}{\tau_m}\right)^{2.001} + 2.189 \left(\frac{T_{m1}}{\tau_m}\right)^{0.766} \xi_m \right], \text{ kai } \frac{\tau_m}{T_{m1}} < 0.9 \quad (1.43)$$

arba

$$K_c = \frac{1}{K_m} \left[-0.365 + 0.26 \left(\frac{\tau_m}{T_{m1}} - 1.4\right)^2 + 2.189 \left(\frac{T_{m1}}{\tau_m}\right)^{0.766} \xi_m \right] \text{ kai } \frac{\tau_m}{T_{m1}} \geq 0.9. \quad (1.44)$$

Regulatoriaus integravimo laiko pastovioji T_i :

$$T_i = T_{m1} \left[2.212 \left(\frac{\tau_m}{T_{m1}}\right)^{0.52} - 0.3 \right], \text{ kai } \frac{\tau_m}{T_{m1}} < 0.4 \quad (1.45)$$

arba

$$T_i = T_{m1} \left\{ -0.975 + 0.91 \left(\frac{\tau_m}{T_{m1}} - 1.845\right)^2 + x_1 \right\}, \text{ kai } \frac{\tau_m}{T_{m1}} \geq 0.4, \quad (1.46)$$

čia

$$x_1 = \left[1 - e^{-\frac{\xi_m}{0.15 + 0.33 \frac{\tau_m}{T_{m1}}}} \right] \left[5.25 - 0.88 \left(\frac{\tau_m}{T_{m1}} - 2.8\right)^2 \right]. \quad (1.47)$$

Regulatoriaus diferencijavimo laiko pastovioji T_d :

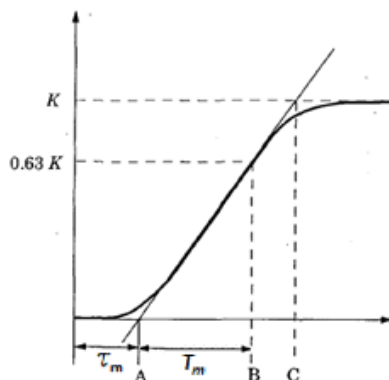
$$T_d = \frac{T_{m1}}{\left[1 - e^{-\frac{\xi_m}{-0.15 + 0.939 \left(\frac{T_{m1}}{\tau_m}\right)^{1.121}}} \right] \left[1.45 + 0.969 \left(\frac{T_{m1}}{\tau_m}\right)^{1.171} \right] - 1.9 + 1.576 \left(\frac{T_{m1}}{\tau_m}\right)^{0.53}}. \quad (1.48)$$

Pagal gautus parametrus reikia suderinti PID reguliatorių. *Sung'o* straipsnyje teigiama, kad pritaikius pateikiamą metodą, gaunami rezultatai yra beveik tokie pat, kaip su optimaliais derinimo parametrais.

1.5.2. *Hassan* (1993) metodas

Vienas iš metodų, su kuriuo bus lyginamas *Sung'o* metodas, yra *Hasan'o* metodas. PID regulatoriaus derinimui reikalingi parametrai yra nustatomi iš objekto reakcijos į šuolinį signalą, pagal *Astrom'o* ir *Haglund'o* (*Åström ir Hägglund*, 1995m.) metodą, antros eilės modeliui, panaudojant *Honeywell UDC 6000* reguliatorių [1]. Šiuo metodu, pagal gautą nešvytuojančios sistemos reakcijos į

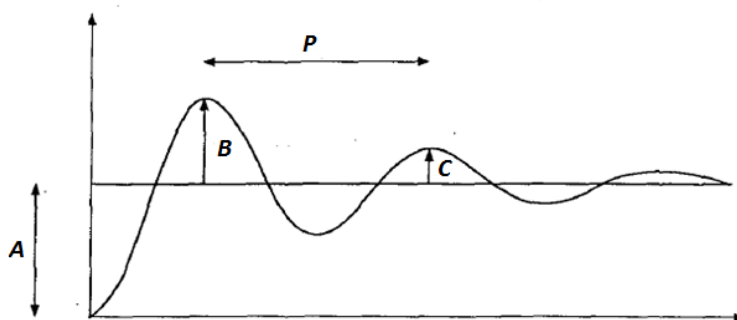
šulinį signalą grafiką (1.8 pav.), galime apskaičiuoti reikiamus parametrus, kur K_m galima nustatyti iš nusistovėjusios reikšmės; modelio vėlinimą τ_m brėžiant liestinę, ties didžiausio nuolaidumo tašku arba randant laiką, tarp šulinio signalo pradžios iki kai proceso reakcija pasiekia kelis procentus galutinės nusistovėjusios reikšmės; T_{m1} ir T_{m2} galima apskaičiuoti iš formulės (1.49), apskaičiuojant, kada $s(t)$ pasieks 33 % ($s=0.33$) ir 67 % ($s=0.67$) nusistovėjusios reikšmės [15].



1.8 pav. Grafiškas modelio parametrų nustatymas naudojant šulinį signalą

$$s(t) = K_m \left(1 + \frac{T_{m2} e^{-\frac{(t-\tau_m)}{T_{m2}}} - T_{m1} e^{-\frac{(t-\tau_m)}{T_{m1}}}}{T_{m1} - T_{m2}} \right). \quad (1.49)$$

Jei reakcija yra švytuojanti, tada papildomi parametrai gali būti nustatyti atsižvelgiant į gautą reakcijos grafiką (1.9 pav.) paveikus šuoliniam signalui:



1.9 pav. Grafiškas modelio parametrų nustatymas esant švytuojančiai reakcijai

Parametrai ω ir ξ apskaičiuojami pagal formules:

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{\log d} \right)^2}}; \quad (1.50)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{P\sqrt{1 - \xi^2}}. \quad (1.51)$$

Hasan'o metodu norint apskaičiuoti PID reguliatoriaus vertes yra naudojamos tokios formulės [24]:

K_c apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$\begin{aligned}
\log[K_m K_c] = & 1.976337 - 0.6436825\xi_m - 5.1887660\frac{\tau_m}{T_{m1}} + 0.4375558\xi_m^2 \\
& + 2.900555\left(\frac{\tau_m}{T_{m1}}\right)^2 + 3.146801\xi_m\frac{\tau_m}{T_{m1}} \\
& - 0.1697221\xi_m^2\left(\frac{\tau_m}{T_{m1}}\right)^2 - 0.8161808\xi_m\left(\frac{\tau_m}{T_{m1}}\right)^2 \\
& - 1.204822\xi_m^2\frac{\tau_m}{T_{m1}} - 0.0810373\xi_m^3 - 0.4444091\left(\frac{\tau_m}{T_{m1}}\right)^3 \\
& + 0.0319431\xi_m\left(\frac{\tau_m}{T_{m1}}\right)^3 + 0.1054399\xi_m^2\left(\frac{\tau_m}{T_{m1}}\right)^2 \\
& + 0.1652807\xi_m^3\frac{\tau_m}{T_{m1}} + 0.1175991\xi_m^3\left(\frac{\tau_m}{T_{m1}}\right)^3 \\
& - 0.0375245\xi_m^3\left(\frac{\tau_m}{T_{m1}}\right)^3.
\end{aligned} \tag{1.52}$$

T_i gaunamas iš:

$$\begin{aligned}
\log\left[\frac{T_i}{T_{m1}}\right] = & -0.7865873 + 0.6796885\xi_m + 2.189154\frac{\tau_m}{T_{m1}} - 0.3471095\xi_m^2 \\
& - 1.900361\left(\frac{\tau_m}{T_{m1}}\right)^2 - 0.7007801\xi_m\frac{\tau_m}{T_{m1}} \\
& + 0.3077857\xi_m^2\left(\frac{\tau_m}{T_{m1}}\right)^2 + 0.8566974\xi_m\left(\frac{\tau_m}{T_{m1}}\right)^2 \\
& - 0.2535062\xi_m^2\frac{\tau_m}{T_{m1}} + 0.0412943\xi_m^3 + 0.3484161\left(\frac{\tau_m}{T_{m1}}\right)^3 \\
& - 0.1626562\xi_m\left(\frac{\tau_m}{T_{m1}}\right)^3 - 0.0661899\xi_m^2\left(\frac{\tau_m}{T_{m1}}\right)^2 \\
& + 0.2247806\xi_m^3\frac{\tau_m}{T_{m1}} - 0.2470783\xi_m^3\left(\frac{\tau_m}{T_{m1}}\right)^2 \\
& + 0.0493011\xi_m^3\left(\frac{\tau_m}{T_{m1}}\right)^3.
\end{aligned} \tag{1.53}$$

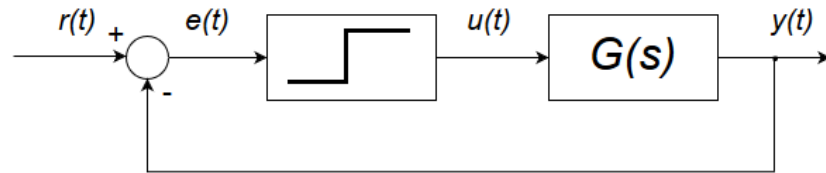
T_d gaunamas iš:

$$\begin{aligned}
\log\left[\frac{T_d}{T_{m1}}\right] = & -0.6726798 - 0.2072477\xi_m + 2.682633\frac{\tau_m}{T_{m1}} + 0.0807474\xi_m^2 \\
& - 1.770783\left(\frac{\tau_m}{T_{m1}}\right)^2 - 1.668514\xi_m\frac{\tau_m}{T_{m1}} \\
& + 0.0845958\xi_m^2\left(\frac{\tau_m}{T_{m1}}\right)^2 + 0.7159307\xi_m\left(\frac{\tau_m}{T_{m1}}\right)^2 \\
& + 0.5631447\xi_m^2\frac{\tau_m}{T_{m1}} - 0.0225269\xi_m^3 + 0.2821874\left(\frac{\tau_m}{T_{m1}}\right)^3 \\
& - 0.0616288\xi_m\left(\frac{\tau_m}{T_{m1}}\right)^3 - 0.626626\xi_m^2\left(\frac{\tau_m}{T_{m1}}\right)^2 \\
& - 0.0372784\xi_m^3\frac{\tau_m}{T_{m1}} - 0.0948097\xi_m^3\left(\frac{\tau_m}{T_{m1}}\right)^2 \\
& + 0.0272541\xi_m^3\left(\frac{\tau_m}{T_{m1}}\right)^3.
\end{aligned} \tag{1.54}$$

Gautas reikšmes reikia įstatyti į PID reguliatorių.

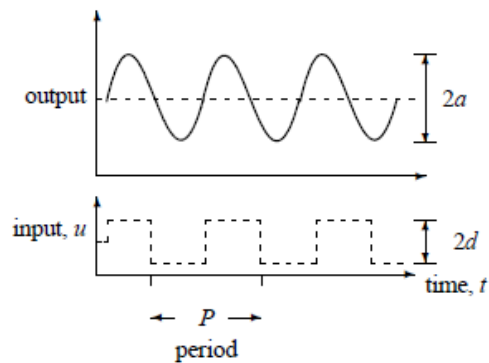
1.5.3. Hwang (1995) metodas

Hwang'o metodu PID reguliatoriaus derinimui reikalingi parametrai yra gaunami panaudojus duomenis, gautus iš bandymo atliekamo uždaroje sistemoje panaudojus nuosekliai prijungtą relę su grįžtamoju ryšiu [1](1.10 pav.).



1.10 pav. Tyrimo su rele ir grįžtamoju ryšiu struktūrinė schema

Šis metodas yra praplėstas Astrom'o ir Haglund'o (1984m.) metodas, kurio metu reguliatorius yra pakeičiamas rele [16]. Dėl to sukuriamas stačiakampis periodinis valdymo signalas proceso įėjime. Iš proceso išėjimo grafiko (1.11 pav.) galima nustatyti kritinį perdavimo koeficientą ir periodą. Pirmasis etapas Sung'o metode yra atliekamas identišškai. Pagrindinis tokio metodo privalumas yra tai, jog sistema viso proceso metu išlieka stabili, palyginti su Ziegler'io ir Nikols'o (Ziegler-Nichols, 1942m.) metodu, kuriame procesas gali lengvai prarasti stabilumą.



1.11 pav. Sistemos svyravimo panaudojant relę grafikas [17]

Gautus parametrus galima įstatyti į PID reguliatoriaus derinimo lygtis:

Reguliatoriaus koeficientai, kai $\varepsilon_2 < 2.4$:

$$K_c = K_{H2} - \frac{0.622[1 - 0.435\omega_{H2}\tau_m + 0.052\omega_{H2}^2\tau_m^2]}{\frac{K_m}{1 + K_{H2}K_m}}; \quad (1.55)$$

$$T_i = \frac{K_c(1 + K_{H2}K_m)}{\omega_{H2}K_m 0.0697(1 + 0.752\omega_{H2}\tau_m - 0.145\omega_{H2}^2\tau_m^2)}; \quad (1.56)$$

$$T_d = \frac{1.45(1 + K_u K_m)}{K_m^2 \omega_u} \left(1 - \frac{1.16}{\varepsilon_0}\right) (1 - 0.612 \omega_u \tau_m + 0.103 \omega_u^2 \tau_m^2). \quad (1.57)$$

Prie visų ε_2 integravimo laiko pastovioji T_d yra apskaičiuojama taip pat.

Regulatoriaus koeficientai, kai $2.4 \leq \varepsilon_2 < 3$:

$$K_c = K_{H2} - \frac{0.724[1 - 0.469 \omega_{H2} \tau_m + 0.0609 \omega_{H2}^2 \tau_m^2]}{\frac{K_m}{1 + K_{H2} K_m}}; \quad (1.58)$$

$$T_i = \frac{K_c(1 + K_{H2} K_m)}{\omega_{H2} K_m 0.0405(1 + 1.93 \omega_{H2} \tau_m - 0.363 \omega_{H2}^2 \tau_m^2)}. \quad (1.59)$$

Regulatoriaus koeficientai, kai $3 \leq \varepsilon_2 < 20$:

$$K_c = K_{H2} - \frac{1.26(0.506)^{\omega_{H2} \tau_m} \left[1 - \frac{1.07}{\varepsilon_2} + \frac{0.616}{\varepsilon_2^2}\right]}{\frac{K_m}{1 + K_{H2} K_m}}; \quad (1.60)$$

$$T_i = \frac{K_c(1 + K_{H2} K_m)}{\omega_{H2} K_m 0.0661(1 + 0.824 \ln[\omega_{H2} \tau_m]) \left(1 + \frac{1.71}{\varepsilon_2} - \frac{1.17}{\varepsilon_2^2}\right)}. \quad (1.61)$$

Regulatoriaus koeficientai, kai $20 \leq \varepsilon_2$:

$$K_c = K_{H2} - \frac{1.09[1 - 0.497 \omega_{H2} \tau_m + 0.0724 \omega_{H2}^2 \tau_m^2]}{\frac{K_m}{1 + K_{H2} K_m}}; \quad (1.62)$$

$$T_i = \frac{K_c(1 + K_{H2} K_m)}{\omega_{H2} K_m 0.054(-1 + 2.54 \omega_{H2} \tau_m - 0.457 \omega_{H2}^2 \tau_m^2)}. \quad (1.63)$$

Tokio metodo pagrindiniai privalumai yra [11]:

- Informacija apie procesą yra surandama aplink kritinį dažnį.
- Proceso išėjimas nenutolsta toli nuo nominalaus valdymo taško, nes yra naudojamas atgalinis ryšys.
- Toks bandymas trunka mažiau laiko taikant jį procesams su didelėmis laiko konstantomis, palyginti su šuolinio ir impulsinio signalo bandymais.

1.5.4. *Rovira* (1969) metodas

Roviros metodu parametrai gali būti randami naudojantis liestinės perlinkio taške *Muril'o* (*Murriel*, 1967m.) metodą. Čia reikalingi parametrai randami kaip pagal 1.3 pav., naudojant pirmos eilės modelį.

Pagal šį metodą sureguliuotas PID reguliatorius tinka procesams, kurie turi būti suvaldomi su mažu perreguliavimu arba visai be jo [25]. Šis metodas, kaip ir *Sung 'o* metodas, gali būti naudojamas nuostato sekimui arba trikdžio kompensavimui. *PID* reguliatoriaus derinimo parametrai apskaičiuojami pagal šias lygtis [26]:

Nuostato sekimo lygtys:

$$K_c = \frac{0.965}{K_m} \left(\frac{T_m}{\tau_m} \right)^{0.85}; \quad (1.64)$$

$$T_i = \frac{T_m}{0.796 - 0.1465 \left(\frac{\tau_m}{T_m} \right)}; \quad (1.65)$$

$$T_d = 0.308 T_m \left(\frac{\tau_m}{T_m} \right)^{0.929}. \quad (1.66)$$

Trikdžio kompensavimo lygtys:

$$K_c = \frac{1.357}{K_m} \cdot \left(\frac{T_m}{\tau_m} \right)^{0.947}; \quad (1.67)$$

$$T_i = \frac{T_m}{0.842} \cdot \left(\frac{\tau_m}{T_m} \right)^{0.738}; \quad (1.68)$$

$$T_d = 0.381 \cdot T_m \cdot \left(\frac{\tau_m}{T_m} \right)^{0.995}. \quad (1.69)$$

2. METODOLOGINĖ DALIS

2.1. Tiriamasis modelis

Tyrimui atlikti buvo pasirinkta 3 eilės perdavimo funkcija (2.1), su skirtingomis modelio parametrų variacijomis [19].

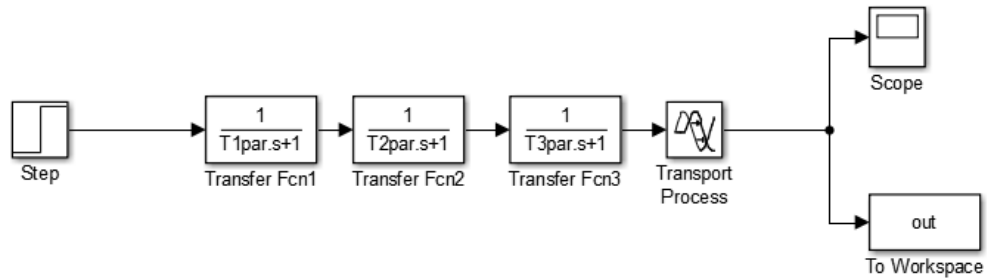
$$G_{pr}(s) = \frac{k_{pr} \exp(-\tau_{pr}s)}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)(T_3s + 1)} \quad (2.1)$$

Modelio parametrai pagal atitinkamus variantus pateikiami 2.1 lentelėje. Čia parinktas stiprinimo koeficientas visiems variantams $k_{pr} = 1$, T_1, T_2, T_3 – laiko konstantos, τ_{pr} – vėlinimas.

2.1 lentelė. Tiriamojo modelio parametrų lentelė

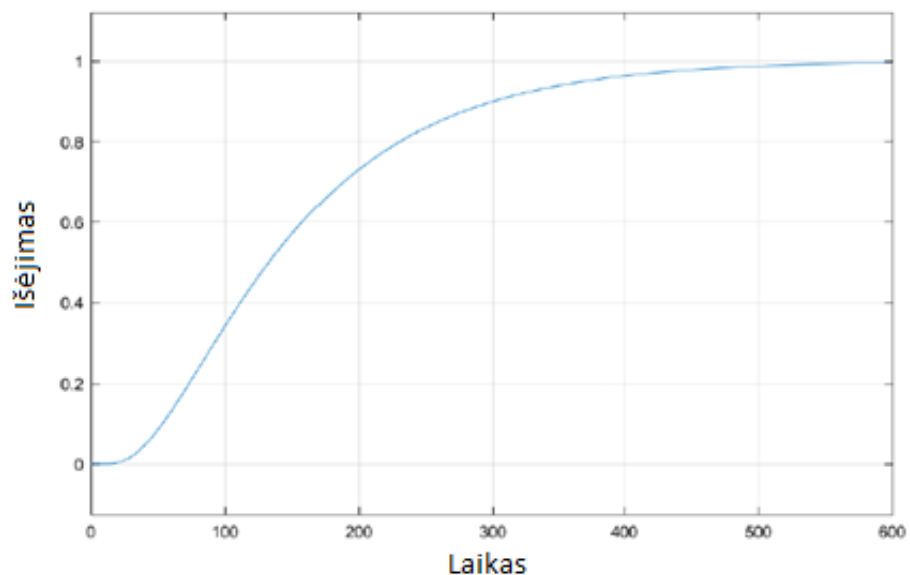
| Varianto Nr. | Modelio parametrai | | | |
|--------------|--------------------|----------------|----------------|-------------|
| | T ₁ | T ₂ | T ₃ | τ_{pr} |
| 1 | 100 | 40 | 10 | 10 |
| 2 | 50 | 40 | 10 | 10 |
| 3 | 100 | 20 | 10 | 10 |
| 4 | 50 | 20 | 10 | 10 |
| 5 | 100 | 40 | 5 | 10 |
| 6 | 50 | 40 | 5 | 10 |
| 7 | 100 | 20 | 5 | 10 |
| 8 | 50 | 20 | 5 | 10 |
| 9 | 100 | 40 | 10 | 20 |
| 10 | 50 | 40 | 10 | 20 |
| 11 | 100 | 20 | 10 | 20 |
| 12 | 50 | 20 | 10 | 20 |
| 13 | 100 | 40 | 5 | 20 |
| 14 | 50 | 40 | 5 | 20 |
| 15 | 100 | 20 | 5 | 20 |
| 16 | 50 | 20 | 5 | 20 |

Modeliavimas bus atliekamas su *Matlab/Simulink* programiniu paketu. *Matlab* darbinėje aplinkoje (*Workspace*) suvedami variantą atitinkantys modelio parametrai. *Simulink* aplinkoje iš funkcinių blokų *Transfer Fcn* ir *Transport Delay*, pagal turimą perdavimo lygtį (2.1), sudaromas tiriamasis modelis (2.1 pav.).



2.1 pav. Tiriomojo objekto modelis

Čia į objekto modelį iš bloko *Step* paduodamas vienetinis šuolinis signalas, kurio pradinė, galutinė vertė ir laikas yra aprašyti *Matlab* darbinėje aplinkoje (*Workspace*). Modelio reakcija yra siunčiama į blokus *Scope* ir *To Workspace*, kurie atitinkamai atvaizduoja reakcijos kreivę (2.2 pav.) ir siunčia reakcijos vertes tam tikru nustatytu diskretiniu dažniu į *Matlab* darbinę aplinką. Gauti duomenys yra rašomi į failą, kad kiti tyrimo etapai galėtų pasiimti duomenis.



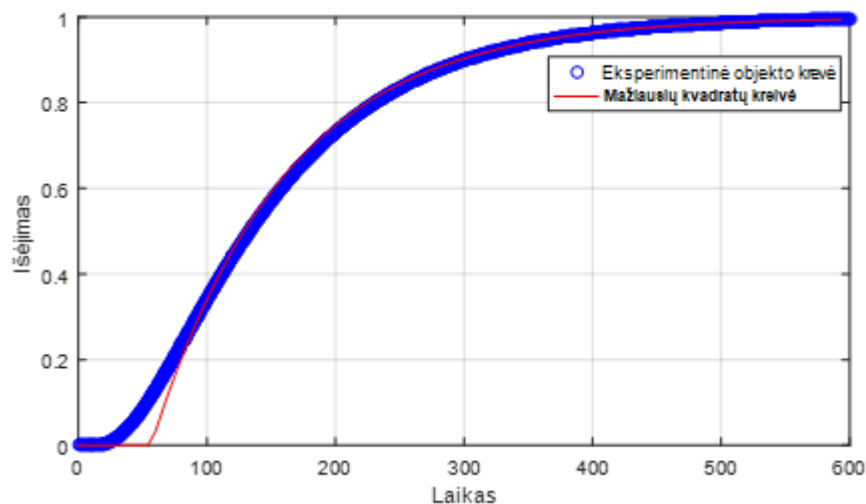
2.2 pav. Objekto reakcija į šuolinį signalą (1 variantas)

2.2. Pirmos eilės modelio su vėlinimu parametrų identifikavimas

Tiriamoji perdavimo funkcija yra trečios eilės, tačiau *Roviros* metodas PID reguliatoriaus parametrams apskaičiuoti naudoja pirmos eilės modelį su vėlinimu. Dėl šios priežasties, objekto reakcijos kreivę aproksimuojame į pirmos eilės modelį. Reikiamų parametrų (K_m , T_m , τ_m) radimui, naudojame mažiausių kvadratų (*angl. Least Square*) ir liestinės per perlinkio tašką (*angl. Second Tangent and Point*) metodus.

2.2.1. Mažiausių kvadratų metodas

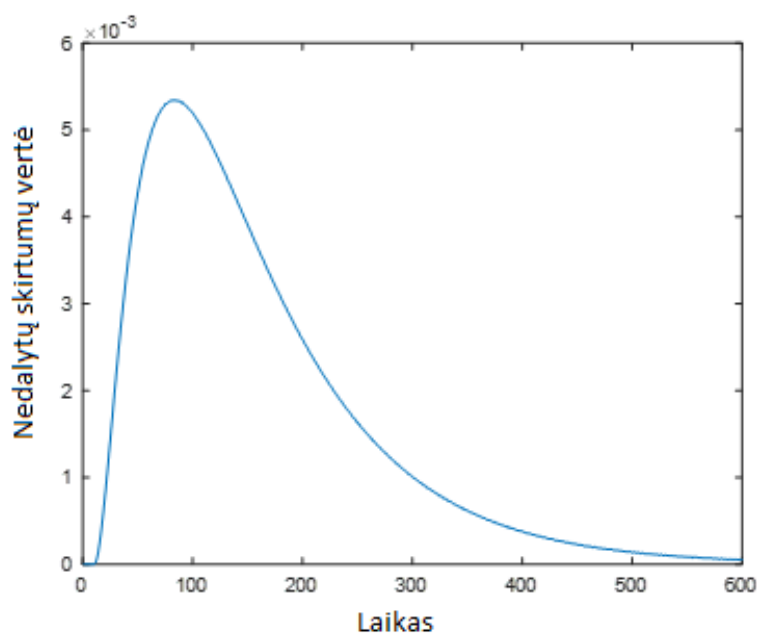
Šiuo metodu siekiama minimizuoti nuokrypių kvadratų sumą. Kadangi žinome, kad $k_{pr} = 1$, modelio stiprinimo koeficientas $K_m = 1$. Panaudojus rastus parametrus, nubraižome aproksimuotą pirmos eilės modulio kreivę (2.3 pav).



2.3 pav. Mažiausių kvadratų metodu rasta pirmos eilės modelio su vėlinimu kreivė (1 variantas)

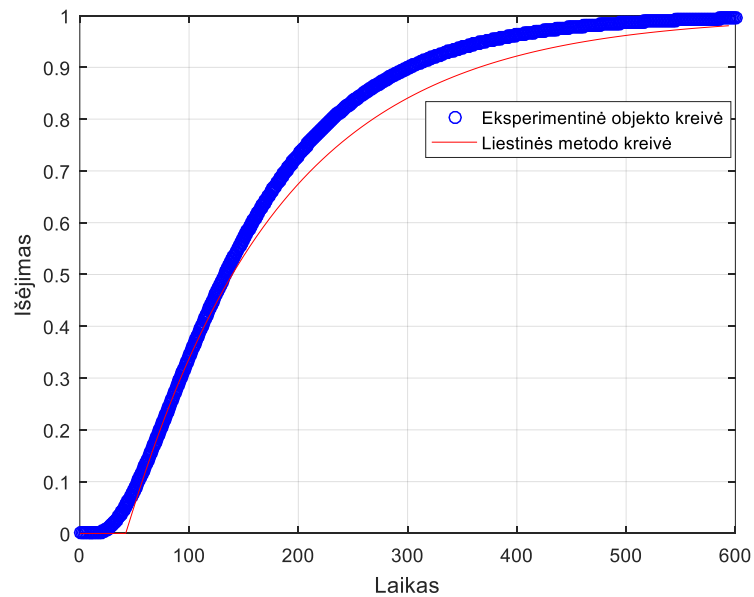
2.2.2. Liestinės per perlanko tašką metodas

Šiuo metodu parametrai randami brėžiant liestinę per objekto kreivės perlanko (lūžio) tašką (1.8 pav.). *Matlab* aplinkoje šis taškas yra randamas apskaičiuavus objekto nedalytus skirtumus ir radus didžiausią jų reikšmę. Nedalytų skirtumų grafikas, kur matoma kuriame laiko taške nedalytų skirtumų vertė yra didžiausia, yra parodytas 2.4 pav.



2.4 pav. Nedalytų skirtumų kreivė (1 variantas)

Žinant šį tašką, apskaičiuojami *Roviros* metodui reikalingi modelio parametrai ir nubraižoma pirmos eilės su vėlinimu kreivė.



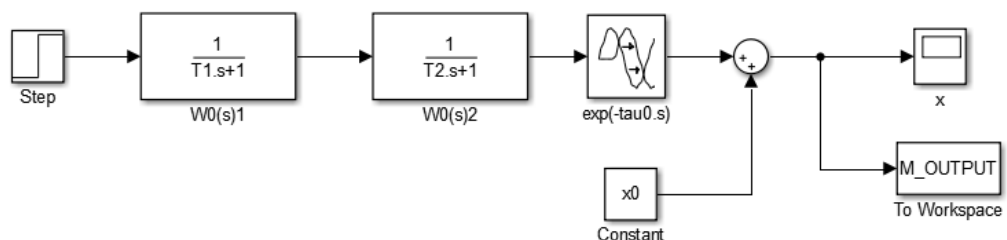
2.5 pav. Liestinės metodu rasta pirmos eilės modelio su vėlinimu kreivė (1 variantas)

2.3. Antros eilės modelio su vėlinimu parametru indentifikavimas

Sung'o, *Hasan'o* ir *Hvang'o* metodams reikalingas antros eilės modelis su vėlinimu, todėl eksperimentinės trečios eilės kreivės aproksimavimui į antros eilės modelį su vėlinimu yra naudojamas *Nelder Mead (Simplex)* algoritmas. Čia pasitelkus *fminsearch* funkciją yra randami τ_m , T_{m1} ir T_{m2} parametrai, su kuriais, pagal (2.2) lygtį, nuokrypių kvadratų suma yra mažiausia [20].

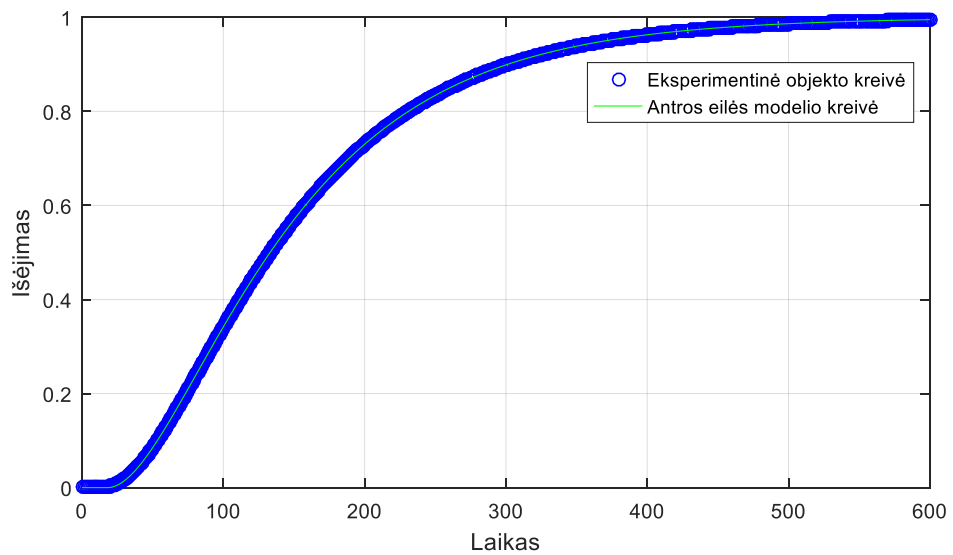
$$S = \sum_{i=1}^n (y_e(t_i) - y(t_i))^2 \rightarrow \min, \quad (2.2)$$

čia S – nuokrypių tarp eksperimentinės ir sumodeliuotos kreivės kvadratų suma, y_e – eksperimentinė objekto reakcija, y – sumodeliuota kreivė, t_i – laiko diskretizavimo taškai, n – diskretizavimo taškų skaičius. *Simulink* aplinkoje sudaromas naujas modelis, pakeitus blokų parametrus taip, kad sistemos išėjimas keistųsi tik nuo ieškomų parametru verčių.



2.6 pav. *Simulink* modelis skirtas antros eilės modelio su vėlavimu parametru ieškojimui

Atlikus tam tikrą kiekį iteracijų, randame ieškotus parametrus ir pagal juos yra nubraižomas grafikas:



2.7 pav. Antros eilės modelio su vėlinimu kreivė (1 variantas)

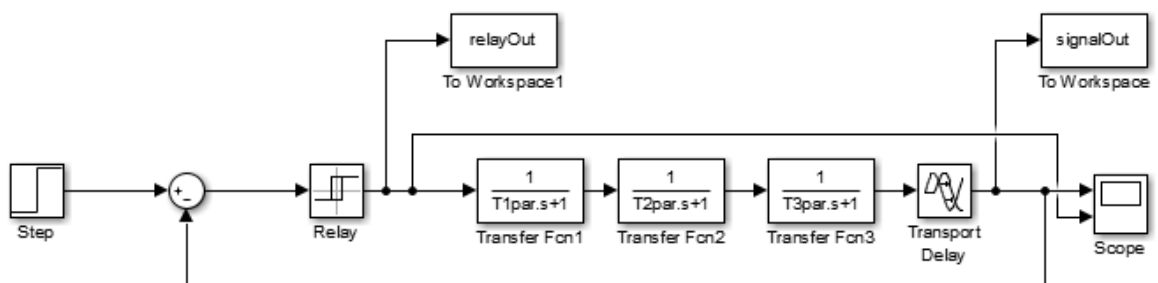
Radus ieškomus parametrus, perverčiame juos į *Sung'o*, *Hasan'o* ir *Hvang'o* metodų skaičiavimuose naudojamus parametrus, pagal (1.22) ir (1.23) lygtis:

$$T_m = \sqrt{T_{m1} \cdot T_{m2}}; \quad (2.3)$$

$$\xi = \frac{T_{m1} + T_{m2}}{2 \cdot T_m}. \quad (2.4)$$

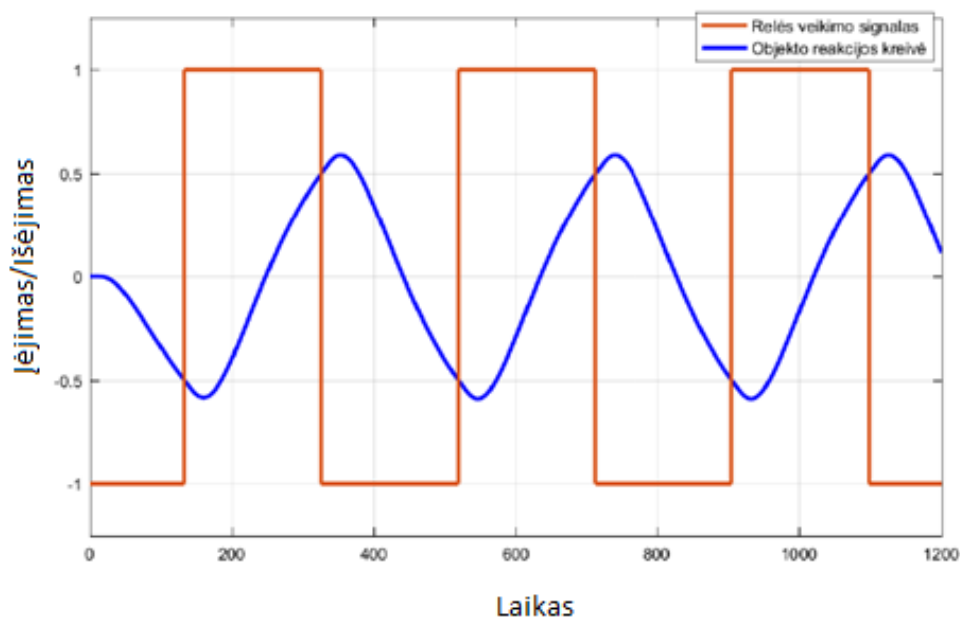
2.4. Tyrimas su rele ir neigiamu grįžtamoju ryšiu

Hvang'o metodui, norint apskaičiuoti PID reguliatoriaus parametrus, reikia atlikti tyrimą su rele ir neigiamu grįžtamoju ryšiu, kaip pavaizduota 1.10 pav. *Simulink* aplinkoje sudaromas modelis šiam tyrimui:



2.8 pav. Tyrimo su rele ir neigiamu grįžtamoju ryšiu modelis

Relay blokas įsijungia ir išsijungia paduodamas atitinkamą signalą, priklausomai nuo nustatytos paklaidos vertės. Taip gaunamas šio tyrimo grafikas:



2.9 pav. Tyrimo su rele ir neigiamu grįžtamoju ryšiu relės ir objekto reakcijos grafikas (1 variantas)

Iš gautų duomenų galima apskaičiuoti parametrus a , d ir P (1.11 pav.), kurių reikia norint apskaičiuoti ribinį stiprinimo koeficientą K_u (angl. *Ultimate Gain*) ir ribinį svyravimo dažnį ω_u (angl. *Ultimate Frequency*). Šie koeficientai apskaičiuojami pagal (2.5) ir (2.6) lygtis [21]:

$$K_u = \frac{4d}{\pi a}; \quad (2.5)$$

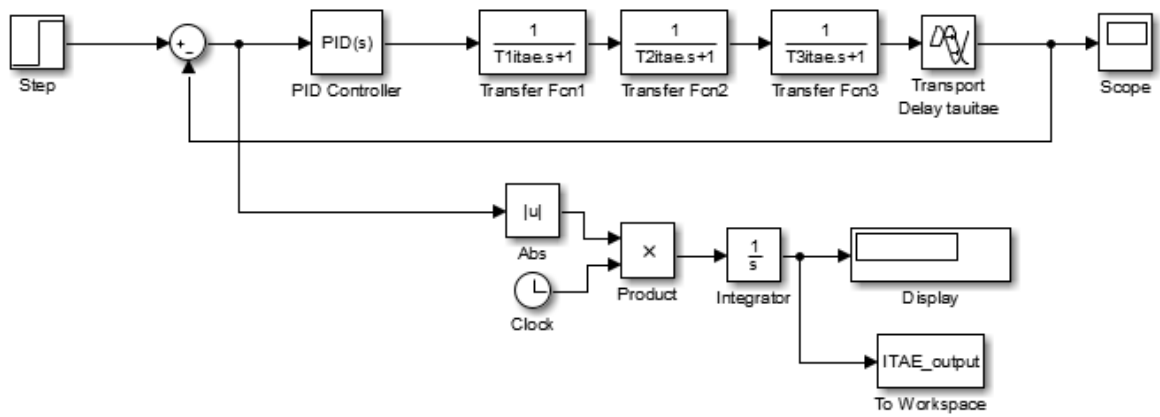
$$\omega_u = \frac{2\pi}{P}. \quad (2.6)$$

2.5. PID reguliatoriaus parametrų optimizavimas pagal ITAE kriterijų

Rezultatų palyginimui bus naudojamas pagal ITAE kriterijų optimizuotos sistemos grafikas. Norint jį gauti reikia optimizuoti PID reguliatoriaus parametrus, kad būtų gaunama minimali ITAE kriterijaus vertė. Šiam tikslui panaudojamas analogiškas antros eilės modelio su vėlinimu parametru radimo sprendimas. Šiuo atveju vietoj antros eilės modelio parametru ieškosime PID reguliatoriaus parametru ir vietoj nuokrypių kvadratų sumos minimizuosime ITAE kriterijaus vertę.

2.5.1. Nuostato sekimo sąlyga

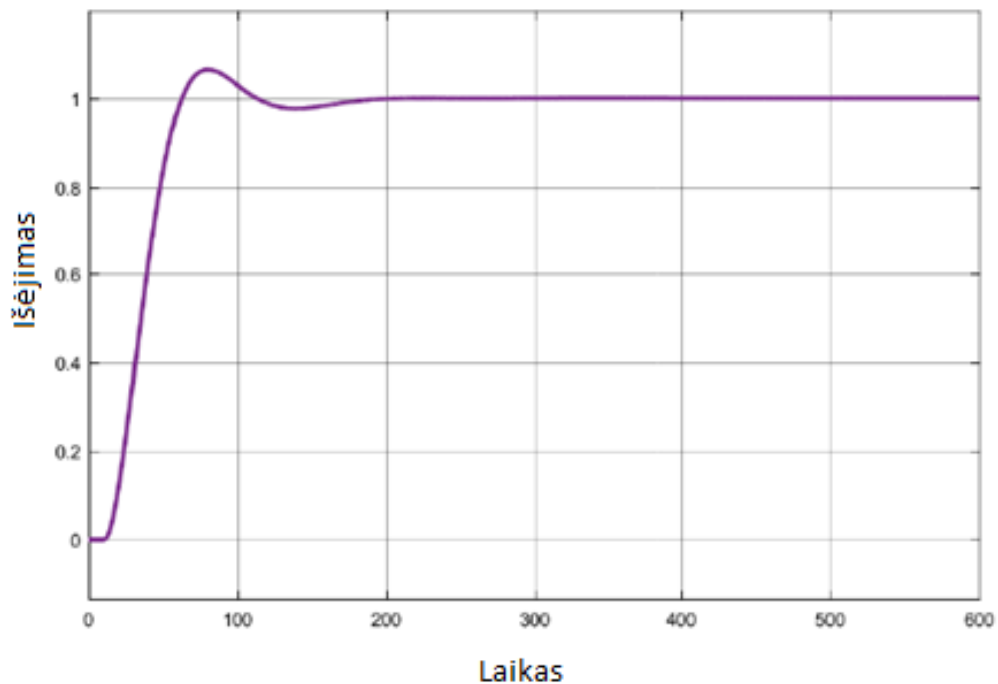
Simulink aplinkoje sudaromas modelis (2.10 pav.) reikiamų parametru radimui.



2.10 pav. PID regulatoriaus optimizavimo pagal ITAE kriterijų nuostato sekimui modelis

ITAE kriterijaus vertės radimui yra naudojama bloku struktūra, kuri atitinka (1.28) lygtį. *Abs* blokas pasiima paklaidos reikšmę tam tikru laiko momentu $e(t)$ su moduliu, *Clock* blokas duoda informaciją apie modeliavimo laiką, *Product* sudaugina paklaidos modulį su laiku, *Integrator* integruoja paklaidos ir laiko sandaugos modulį. ITAE kriterijaus vertės kiekvienu momentu yra siunčiamos į *Matlab* darbinę aplinką, o paskutinioji vertė yra atvaizduojama *Display* bloko ekrane.

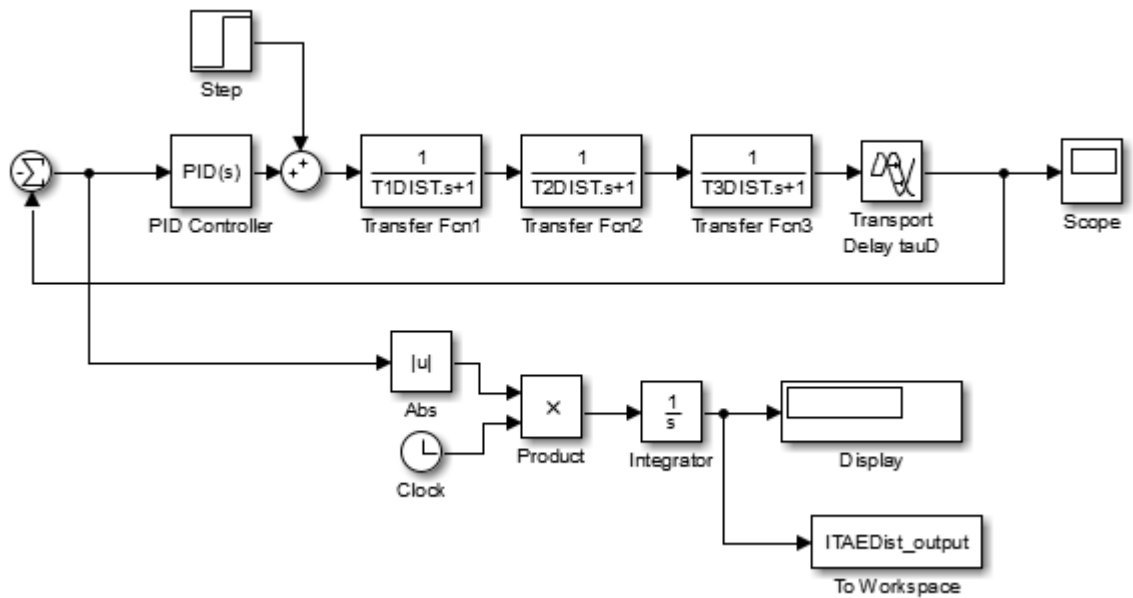
Gaunama sistemos su optimizuotu PID regulatoriumi pagal ITAE kriterijų reakcijos kreivė:



2.11 pav. Sistemos su optimizuotu PID regulatoriumi pagal ITAE kriterijų nuostato sekimui reakcijos grafikas (1 variantas)

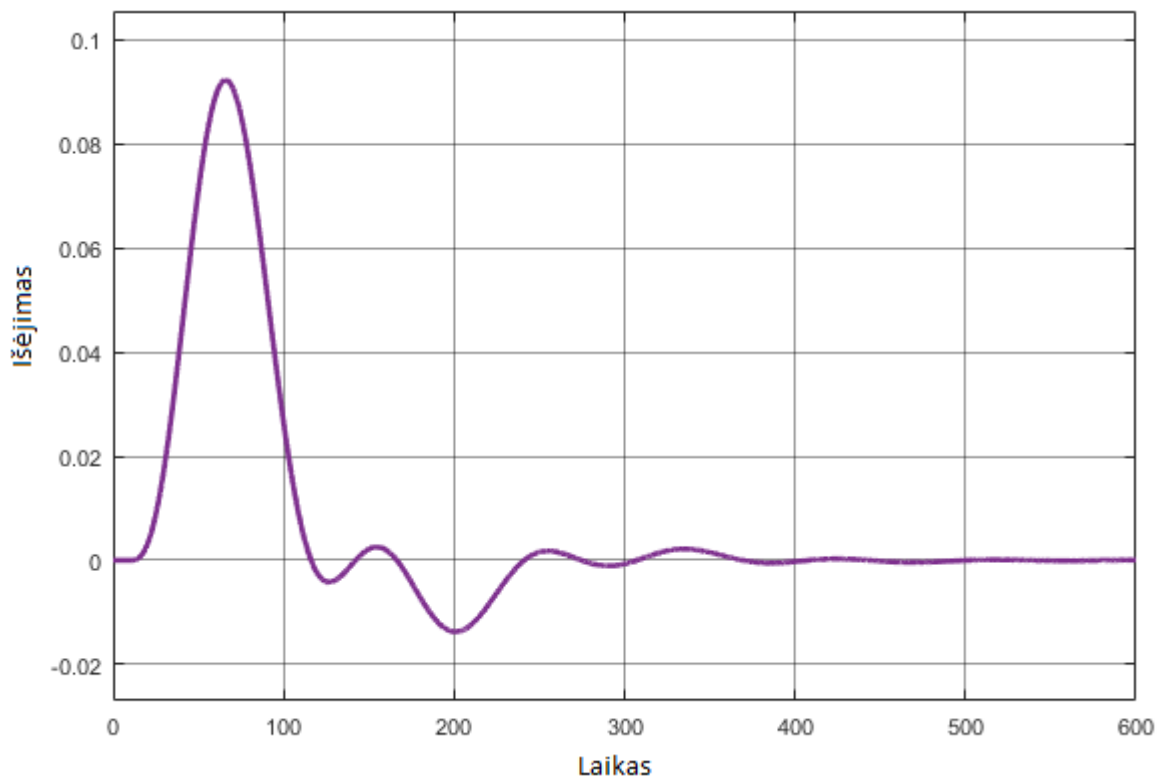
2.5.2. Trikdžio kompensavimo sąlyga

Simulink aplinkoje sudaromas modelis (2.12 pav.) reikiamų parametų radimui trikdžio kompensavimo sistemai.



2.12 pav. PID regulatoriaus optimizavimo pagal ITAE kriterijų trikdžio kompensavimui modelis

ITAE vertei rasti naudojama ta pati blokų struktūra kaip ir nuostato sekimo sistemai. Pagal šį kriterijų randami optimizuoti PID regulatoriaus parametrai ir sumodeliavus gaunama sistemos reakcijos į trikdį kreivė:



2.13 pav. Sistemos su optimizuotu PID regulatoriumi pagal ITAE kriterijų trikdžio kompensavimui reakcijos grafikas (1 variantas)

3. TYRIMO REZULTATAI

3.1. Optimalių PID reguliatoriaus parametrų radimo patikrinimas

Norint įsitikinti, kad gauti rezultatai yra optimalūs atliekamas bandymas keičiant pradines (šiam bandymui naudojami *Sung'o* metodo 1 varianto reguliatoriaus parametrai) PID reguliatoriaus koeficientų vertes $\pm 10\%$ nuo pradinės įvestos vertės panaudojant *Matlab rand* funkciją.

3.1 lentelė. Optimalių PID reguliatoriaus parametrų radimo patikrinimo lentelė

| Bandymo Nr. | Pradiniai parametrai | | | Optimizuoti parametrai | | | ITAE | ITAE skirtumas nuo vidurkio |
|-------------|----------------------|----------------|----------------|------------------------|----------------|----------------|---------|-----------------------------|
| | K _c | T _i | T _d | K _c | T _i | T _d | | |
| 1 | 3,990 | 136,601 | 33,578 | 4,152 | 145,176 | 32,377 | 1082,77 | -0,032% |
| 2 | 4,074 | 133,873 | 33,622 | 4,224 | 145,435 | 32,589 | 1084,02 | 0,082% |
| 3 | 4,240 | 137,117 | 30,401 | 4,126 | 145,130 | 32,293 | 1083,19 | 0,006% |
| 4 | 4,415 | 147,192 | 29,779 | 4,329 | 145,707 | 32,883 | 1083,90 | 0,072% |
| 5 | 4,256 | 162,910 | 28,825 | 4,140 | 145,160 | 32,370 | 1081,57 | -0,144% |
| 6 | 4,225 | 140,175 | 34,648 | 4,138 | 145,195 | 32,342 | 1084,31 | 0,110% |
| 7 | 3,888 | 134,354 | 34,430 | 4,081 | 144,995 | 32,171 | 1081,06 | -0,191% |
| 8 | 3,789 | 137,203 | 33,146 | 3,975 | 144,722 | 31,941 | 1085,78 | 0,245% |
| 9 | 4,446 | 161,862 | 30,467 | 4,190 | 145,207 | 32,411 | 1083,25 | 0,012% |
| 10 | 3,918 | 134,513 | 32,747 | 4,112 | 145,174 | 32,366 | 1081,40 | -0,159% |
| Vidurkis | | | | 4,147 | 145,195 | 32,379 | 1083,13 | |

Iš gautų duomenų matome, kad sistemos su optimizuotais PID reguliatoriaus parametrais ITAE kriterijaus vertė prie įvairių pradinių reikšmių nuo šio parametro vidurkio prasčiausiu atveju skiriasi 0,245 %, o skirtumas tarp didžiausios ir mažiausios gautos ITAE kriterijaus vertės yra 0,435 %. Iš šių duomenų galima daryti išvadą, kad nuo skirtingų pradinių reikšmių ITAE kriterijaus vertė kinta nežymiai, todėl galima teigti, jog tyrime naudoti šį metodą optimalių PID reguliatoriaus parametrų radimui yra priimtina.

3.2. Pirmos eilės modelio su vėlinimu parametrų radimo metodų palyginimas

Pirmos eilės modelio su vėlinimu parametrų radimui naudojami mažiausių kvadratų ir liestinės perlinkio taške metodai. Atlikus 2.2 skyriaus bandymus, gaunami pirmos eilės modelių su vėlinimu parametrai, kurie surašyti 3.2 lentelėje. Bandymo supaprastinimui proceso modelio stiprinimo koeficientas K_m visiems variantams buvo prilyginamas vienetui.

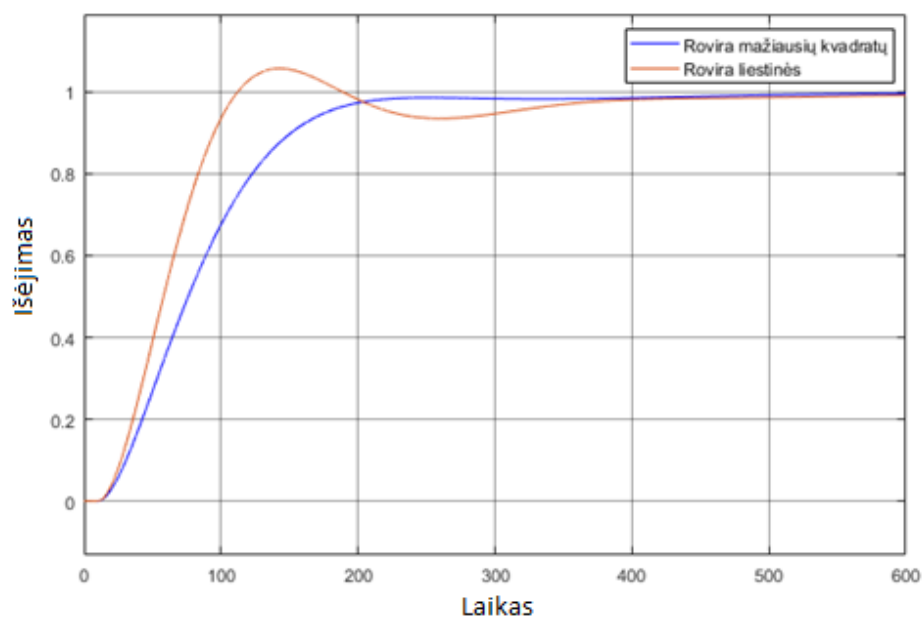
3.2 lentelė. Pirmos eilės modelio su vėlinimu parametrai gauti panaudojus mažiausių kvadratų ir liestinės perlinkio taške metodus

| Varianto Nr. | Mažiausių kvadratų metodu gauti modelio parametrai | | | Liestinės perlinkio taške metodu gauti parametrai | | | Santykis (mažiausių kvadratų/liestinės) | |
|--------------|--|--------|----------|---|--------|----------|---|----------|
| | K_m | T_m | τ_m | K_m | T_m | τ_m | T_m | τ_m |
| 1 | 1,00 | 104,15 | 56,52 | 1,00 | 140,40 | 42,20 | 0,74 | 1,34 |
| 2 | | 60,87 | 49,22 | | 90,58 | 36,58 | 0,67 | 1,35 |
| 3 | | 100,90 | 39,47 | | 119,59 | 33,58 | 0,84 | 1,18 |
| 4 | | 52,00 | 38,43 | | 70,38 | 30,76 | 0,74 | 1,25 |
| 5 | | 103,83 | 52,08 | | 139,60 | 37,55 | 0,74 | 1,39 |
| 6 | | 60,16 | 45,37 | | 90,25 | 31,92 | 0,67 | 1,42 |
| 7 | | 100,72 | 34,73 | | 118,58 | 29,02 | 0,85 | 1,20 |
| 8 | | 51,59 | 34,07 | | 69,56 | 26,36 | 0,74 | 1,29 |
| 9 | | 104,28 | 66,32 | | 140,37 | 52,18 | 0,74 | 1,27 |
| 10 | | 61,29 | 58,66 | | 90,53 | 46,55 | 0,68 | 1,26 |
| 11 | | 100,94 | 49,41 | | 119,58 | 43,57 | 0,84 | 1,13 |
| 12 | | 52,12 | 48,23 | | 70,37 | 40,75 | 0,74 | 1,18 |
| 13 | | 103,96 | 61,89 | | 139,58 | 47,54 | 0,74 | 1,30 |
| 14 | | 60,54 | 54,85 | | 90,21 | 41,90 | 0,67 | 1,31 |
| 15 | | 100,74 | 44,68 | | 118,57 | 39,01 | 0,85 | 1,15 |
| 16 | | 51,68 | 43,91 | | 69,55 | 36,35 | 0,74 | 1,21 |
| Vidurkis | | | | | | | 0,75 | 1,26 |

Iš gautų rezultatų matosi, kad proceso modelio laiko konstanta T_m mažiausių kvadratų metodu gaunama vidutiniškai 25 % mažesnė, nei liestinės perlinkio taške metodu, o proceso modelio vėlavimas τ_m didesnis vidutiniškai 26 %. Radus PID reguliatoriaus parametrus abejais metodais, sistemos sumodeliuojamos su visų variantų parametrais pagal sistemos užduoties sekimo ir trikdžio kompensavimo sąlygas.

3.2.1. Nuostato sekimo sąlyga

3.1 pav. atvaizduotos 1 varianto sistemos reakcijos kreivės su *Roviros* PID reguliatoriaus parametrais, gautais panaudojant mažiausių kvadratų ir liestinės metodus. 3.3 lentelėje surašyti gauti PID reguliatoriaus parametrai ir ITAE kriterijaus vertės visais variantais panaudojus atitinkamus modelio parametrų identifikavimo metodus. Apskaičiuotas liestinės metodo pranašumas (kiek procentų liestinės metodo ITAE kriterijaus vertė yra mažesnė už mažiausių kvadratų metodo) iš vieneto atimant liestinės metodu gautą ITAE kriterijaus vertę padalintą iš gautos mažiausių kvadratų metodu. Neigiama vertė reiškia, kad mažiausių kvadratų metodas buvo pranašesnis.



3.1 pav. *Roviros* PID reguliatoriaus derinimo metodo palyginimas pagal nuostato sekimo sąlygą, randant parametrus mažiausių kvadratų ir liestinės metodais

3.3 lentelė. Mažiausių kvadratų ir liestinės perlinkio taške metodais gautų *Roviros* parametru užduoties sekimo sąlygai tenkinti rezultatai

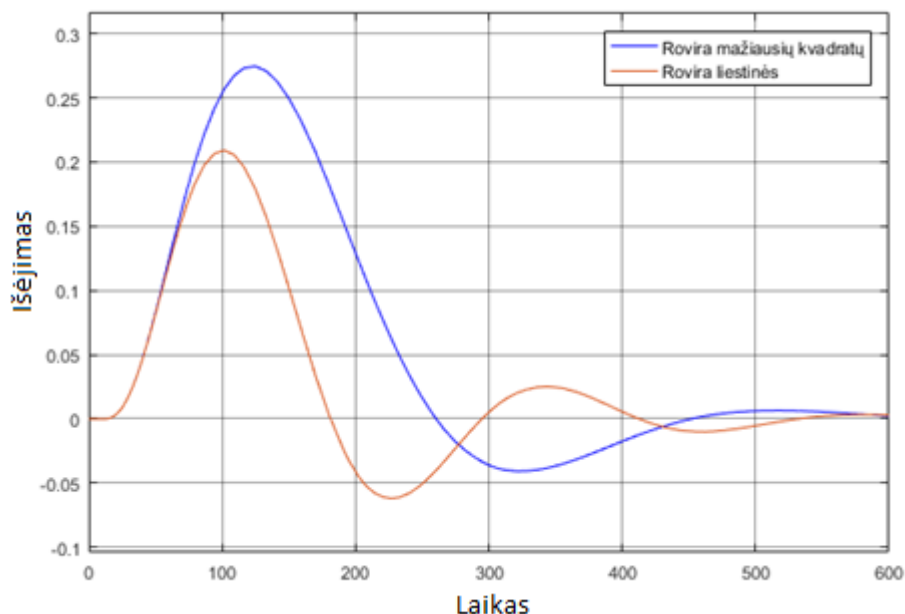
| Varianto Nr. | <i>Rovira</i> PID reguliatoriaus parametrai gauti panaudojus mažiausių kvadratų metodą | | | | <i>Rovira</i> PID reguliatoriaus parametrai gauti panaudojus liestinės perlinkio taške metodą | | | | Liestinės metodo pranašumo koeficientas |
|--------------|--|--------|-------|---------|---|--------|-------|---------|---|
| | K_c | T_i | T_d | ITAE | K_c | T_i | T_d | ITAE | |
| 1 | 1,62 | 145,36 | 18,18 | 6345,65 | 2,68 | 186,71 | 14,16 | 6277,64 | 1,1% |
| 2 | 1,16 | 89,84 | 15,39 | 4141,72 | 2,09 | 122,93 | 12,02 | 3696,81 | 10,7% |
| 3 | 2,14 | 136,60 | 12,99 | 3668,54 | 2,84 | 158,43 | 11,32 | 3942,38 | -7,5% |
| 4 | 1,25 | 75,61 | 12,09 | 2704,40 | 1,95 | 96,16 | 10,05 | 2571,81 | 4,9% |
| 5 | 1,73 | 143,71 | 16,85 | 5609,92 | 2,95 | 184,51 | 12,70 | 5440,82 | 3,0% |
| 6 | 1,23 | 87,76 | 14,26 | 3622,73 | 2,33 | 121,27 | 10,58 | 3143,62 | 13,2% |
| 7 | 2,39 | 135,10 | 11,54 | 3068,24 | 3,19 | 156,00 | 9,88 | 3263,82 | -6,4% |
| 8 | 1,37 | 73,78 | 10,81 | 2213,12 | 2,20 | 93,94 | 8,70 | 2120,43 | 4,2% |
| 9 | 1,42 | 148,37 | 21,09 | 8183,90 | 2,24 | 189,30 | 17,24 | 7992,33 | 2,3% |
| 10 | 1,00 | 93,46 | 18,12 | 5720,76 | 1,70 | 125,62 | 15,03 | 4978,77 | 13,0% |
| 11 | 1,77 | 139,36 | 16,01 | 5099,56 | 2,28 | 161,03 | 14,42 | 5401,45 | -5,9% |
| 12 | 1,03 | 78,92 | 14,94 | 4075,79 | 1,54 | 98,95 | 13,05 | 3644,43 | 10,6% |
| 13 | 1,50 | 146,67 | 19,78 | 7336,16 | 2,41 | 187,07 | 15,80 | 7098,47 | 3,2% |
| 14 | 1,05 | 91,28 | 17,01 | 5086,81 | 1,85 | 123,92 | 13,63 | 4343,11 | 14,6% |
| 15 | 1,93 | 137,81 | 14,58 | 4391,29 | 2,48 | 158,56 | 13,00 | 4647,54 | -5,8% |
| 16 | 1,11 | 76,96 | 13,68 | 3437,95 | 1,68 | 96,68 | 11,72 | 3160,52 | 8,1% |
| Vidurkis | | | | 4669,16 | | | | 4482,75 | 4,0% |

Iš gautų duomenų matome, jog daugeliu atveju nuostato sekimo sistemos reakcijos į vienetinį šuolį ITAE kriterijaus vertė yra mažesnė, kai pirmos eilės modelio su vėlinimu parametrams rasti buvo naudojamas liestinės perlinkio taške metodas. Tačiau negalima teigti, jog parametru identifikavimas šiuo metodu yra efektyvesnis, nes vis tiek pasitaiko atvejų, kai naudojant mažiausių kvadratų metodą

gaunama mažesnė ITAE kriterijaus vertė. Iš grafiko (3.1 pav.) taip pat matome, kad liestinės perlinkio taške metodu gautos sistemos reakcijos kreivė yra labiau inertiška, nei gautos mažiausių kvadratų metodu ir dėl to atsiranda perreguliavimas, kuris gali būti neleistinas kai kurioms sistemoms. Naudojant mažiausių kvadratų metodu gautus modulio parametrus galima gauti reakciją be perreguliavimo, tačiau sistemos reakcija yra lėtesnė.

3.2.2. Trikdžio kompensavimo sąlyga

Tokiu pačiu principu randamos ITAE kriterijaus vertės trikdžio kompensavimo sąlygai:



3.2 pav. *Roviros* PID reguliatoriaus derinimo metodo palyginimas pagal trikdžio kompensavimo sąlygą, randant parametrus mažiausių kvadratų ir liestinės perlinkio taške metodais (1 variantas)

3.4 lentelė. Mažiausių kvadratų ir liestinės perlinkio taške modelio parametrų identifikavimo metodais gautų *Roviros* parametrų trikdžio kompensavimo sąlygai tenkinti rezultatai

| Varianto Nr. | <i>Rovira</i> PID reguliatoriaus parametrai gauti panaudojus mažiausių kvadratų metodą | | | | <i>Rovira</i> PID reguliatoriaus parametrai gauti panaudojus liestinės perlinkio taške metodą | | | | Liestinės metodo pranašumo koeficientas |
|--------------|--|-------|-------|---------|---|-------|-------|---------|---|
| | K_c | T_i | T_d | ITAE | K_c | T_i | T_d | ITAE | |
| 1 | 2,42 | 78,78 | 21,60 | 6779,95 | 4,24 | 68,67 | 16,18 | 4099,22 | 39,5% |
| 2 | 1,66 | 61,80 | 18,77 | 5773,50 | 3,20 | 55,10 | 14,00 | 3296,07 | 42,9% |
| 3 | 3,30 | 59,94 | 15,11 | 2754,94 | 4,52 | 55,63 | 12,88 | 2064,95 | 25,0% |
| 4 | 1,81 | 49,40 | 14,66 | 3336,41 | 2,97 | 45,38 | 11,77 | 2259,72 | 32,3% |
| 5 | 2,61 | 74,11 | 19,91 | 5562,91 | 4,71 | 62,91 | 14,40 | 3073,75 | 44,7% |
| 6 | 1,77 | 58,02 | 17,31 | 4794,58 | 3,63 | 49,78 | 12,23 | 2533,78 | 47,2% |
| 7 | 3,72 | 54,51 | 13,30 | 1978,04 | 5,15 | 49,84 | 11,13 | 1409,27 | 28,8% |
| 8 | 2,01 | 45,11 | 13,01 | 2517,07 | 3,40 | 40,37 | 10,09 | 1623,33 | 35,5% |
| 9 | 2,08 | 88,68 | 25,32 | 9451,51 | 3,46 | 80,32 | 19,98 | 6342,03 | 32,9% |
| 10 | 1,41 | 70,48 | 22,36 | 8001,26 | 2,55 | 65,82 | 17,80 | 5282,52 | 34,0% |
| 11 | 2,67 | 70,76 | 18,89 | 4541,57 | 3,53 | 67,42 | 16,68 | 3601,24 | 20,7% |
| 12 | 1,46 | 58,45 | 18,38 | 5404,72 | 2,28 | 55,85 | 15,57 | 3836,24 | 29,0% |

| | | | | | | | | | |
|----------|------|-------|-------|---------|------|-------|-------|---------|-------|
| 13 | 2,22 | 84,20 | 23,64 | 8080,17 | 3,76 | 74,86 | 18,21 | 5117,95 | 36,7% |
| 14 | 1,49 | 66,85 | 20,91 | 6982,72 | 2,81 | 60,83 | 16,02 | 4309,77 | 38,3% |
| 15 | 2,93 | 65,66 | 17,09 | 3521,28 | 3,89 | 62,00 | 14,95 | 2730,50 | 22,5% |
| 16 | 1,58 | 54,42 | 16,74 | 4327,60 | 2,51 | 51,17 | 13,90 | 3074,48 | 29,0% |
| Vidurkis | | | | 5238,01 | | | | 3415,93 | 34,8% |

Atsižvelgiant į gautus duomenis, galima teigti, jog liestinės perlinkio taške metodas derinant PID reguliatorių trikdžio kompensavimo sistemai yra akivaizdžiai naudingesnis. ITAE kriterijaus vertė vidutiniškai yra apie trečdaliu mažesnė, nei radus parametrus mažiausių kvadratų metodu, taip pat iš grafiko (3.2 pav.) matome, kad trikdis sistemą paveikia mažiau. Derinant trikdžio kompensavimo sistemą *Roviros* metodu, visais atvejais pirmos eilės modelio su vėlinimu parametrams identifikuoti yra naudingiau naudoti liestinės per lūžio tašką metodą.

3.3. Bendras visų metodų palyginimas

Radus visus reikiamus parametrus galima pagal kiekvieną metodą apskaičiuoti PID reguliatoriaus parametrų vertes. Apskaičiuotos reikšmės yra skirtos standartiniam PID reguliatoriui, o *Simulink* aplinka naudoja lygiagretųjį PID reguliatorių, todėl jas reikia konvertuoti į lygiagrečiam PID reguliatoriui skirtas reikšmes panaudojant šias formules [1]:

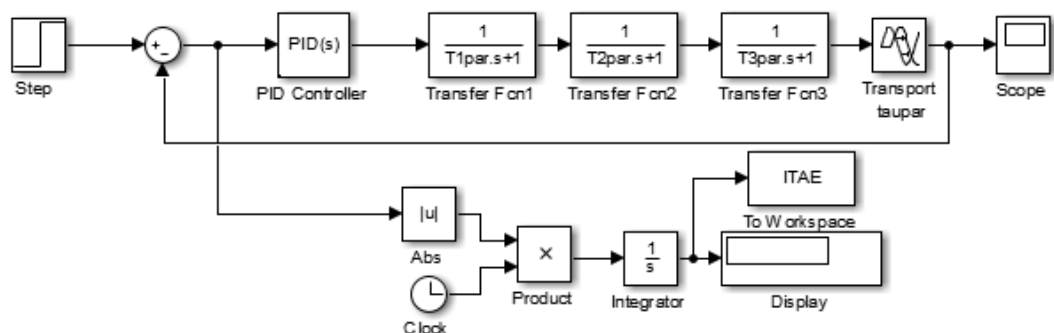
$$K_c = K_c; \quad (3.1)$$

$$K_i = \frac{K_c}{T_i}; \quad (3.2)$$

$$K_d = K_c \cdot T_d. \quad (3.3)$$

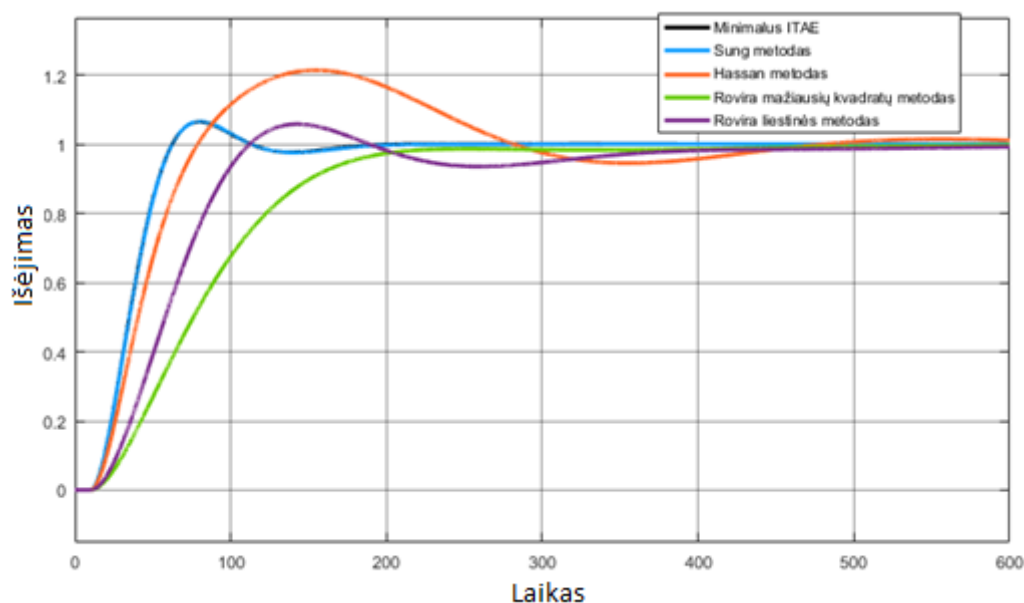
3.3.1. Nuostato sekimo sąlyga

Šios reikšmės įvedamos į *Simulink* aplinkoje sukurtą modelį (3.3 pav.) skirtą rasti ITAE kriterijaus vertę pagal nuostato sekimo sąlygą, kur stebima jo reakcija į vienetinį šuolinį signalą ir ITAE kriterijaus vertė.

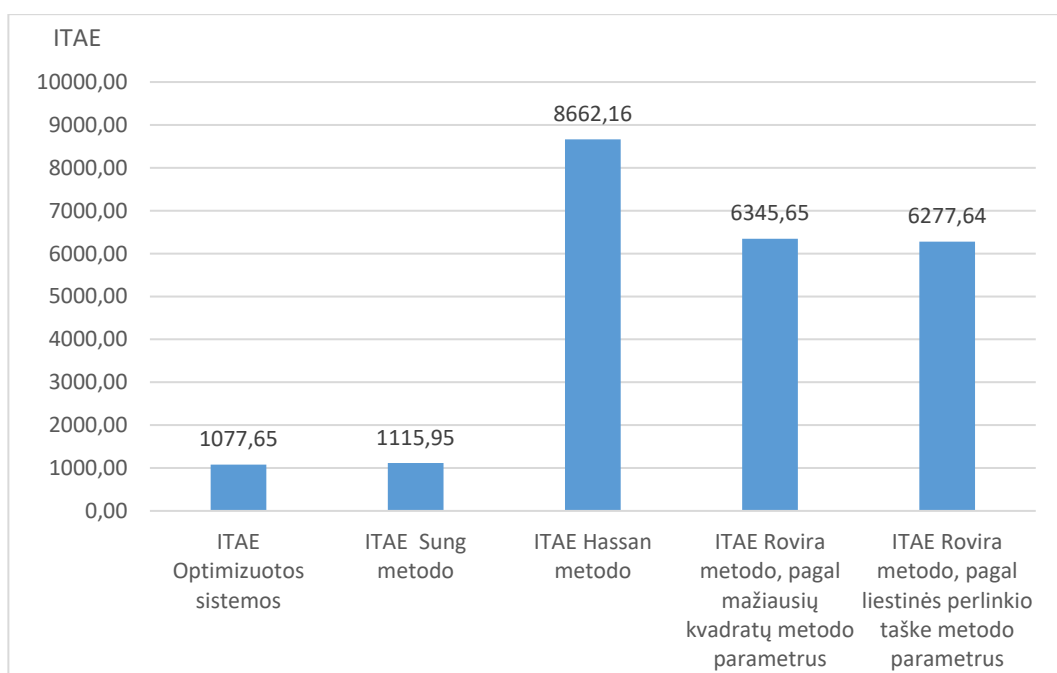


3.3 pav. Sistemos su PID reguliatoriumi nuostato sekimo bandymo modelis

Sistemos, su skirtingais metodais apskaičiuotais PID reguliatoriaus parametrais, sumodeliuojamos ir gaunami jų reakcijos grafikai (3.4 pav.) ir ITAE kriterijaus vertės (3.5 pav.).



3.4 pav. Nuostato sekimo sistemų reakcijos pagal PID reguliatoriaus parametrų nustatymo metodus (1 variantas)

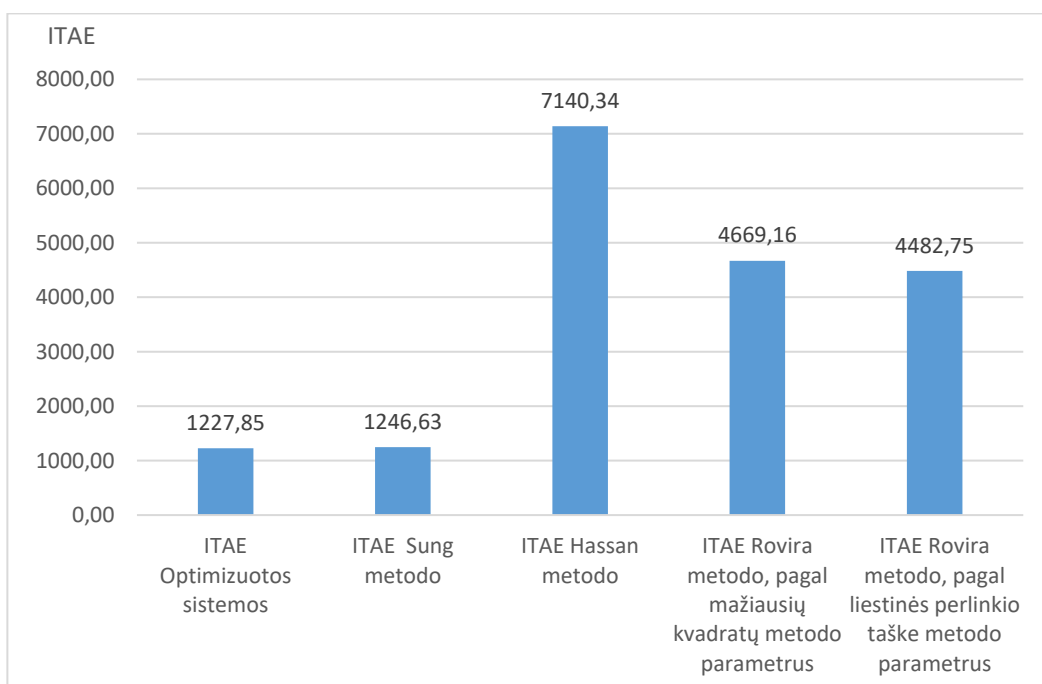


3.5 pav. ITAE kriterijaus vertės pagal PID reguliatoriaus derinimo metodus nuostato sekimo sistemai (1 variantas)

Iš sistemos reakcijų kreivių ir ITAE kriterijaus verčių galima spręsti, kad šiuo variantu *Sung* 'o metodas yra žymiai pranašesnis už kitus ITAE kriterijaus atžvilgiu. *Sung* 'o metodu gauta ITAE kriterijaus vertė nežymiai skiriasi nuo optimalios ITAE vertės (*Sung* 'o metodo kreivė beveik persidengia su optimaliai suderintos sistemos reakcijos kreive, todėl grafike jos beveik nesimato). *Hasan* 'o metodu suderintos sistemos reakcijos perreguliavimas yra pats didžiausias, kaip ir jo ITAE kriterijaus vertė.

3.5 lentelė. Nuostato sekimo sistemos ITAE kriterijaus vertės pagal derinimo metodus

| Varianto Nr. | ITAE Optimizuotas | ITAE Sung | ITAE Hassan | ITAE Rovira mažiausių kvadratų | ITAE Rovira liestinės |
|--------------|-------------------|-----------|-------------|--------------------------------|-----------------------|
| 1 | 1077,65 | 1115,95 | 8662,16 | 6345,65 | 6277,64 |
| 2 | 997,93 | 1008,70 | 4742,48 | 4141,72 | 3696,81 |
| 3 | 857,93 | 882,38 | 7378,15 | 3668,54 | 3942,38 |
| 4 | 822,43 | 835,44 | 3549,76 | 2704,40 | 2571,81 |
| 5 | 651,57 | 726,63 | 7570,16 | 5609,92 | 5440,82 |
| 6 | 624,54 | 640,48 | 3791,20 | 3622,73 | 3143,62 |
| 7 | 568,51 | 609,28 | 6399,57 | 3068,24 | 3263,82 |
| 8 | 549,40 | 556,48 | 3116,32 | 2213,12 | 2120,43 |
| 9 | 2192,32 | 2197,60 | 11635,11 | 8183,90 | 7992,33 |
| 10 | 2001,50 | 2012,12 | 6733,07 | 5720,76 | 4978,77 |
| 11 | 1783,31 | 1800,28 | 11840,94 | 5099,56 | 5401,45 |
| 12 | 1691,42 | 1695,80 | 6305,21 | 4075,79 | 3644,43 |
| 13 | 1613,06 | 1634,39 | 10442,56 | 7336,16 | 7098,47 |
| 14 | 1520,57 | 1523,93 | 5726,44 | 5086,81 | 4343,11 |
| 15 | 1367,66 | 1374,60 | 10661,13 | 4391,29 | 4647,54 |
| 16 | 1325,81 | 1332,03 | 5691,15 | 3437,95 | 3160,52 |
| Vidurkis | 1227,85 | 1246,63 | 7140,34 | 4669,16 | 4482,75 |
| Koeficientas | 1,00 | 1,02 | 5,82 | 3,80 | 3,65 |

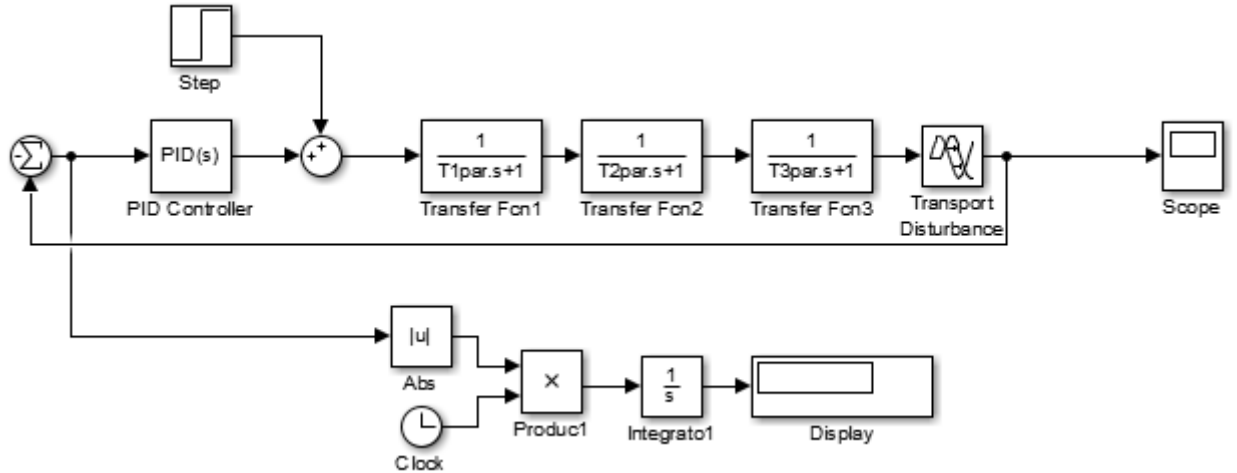


3.6 pav. Visų variantų nuostato sekimo sistemos ITAE kriterijaus verčių vidurkiai pagal derinimo metodus

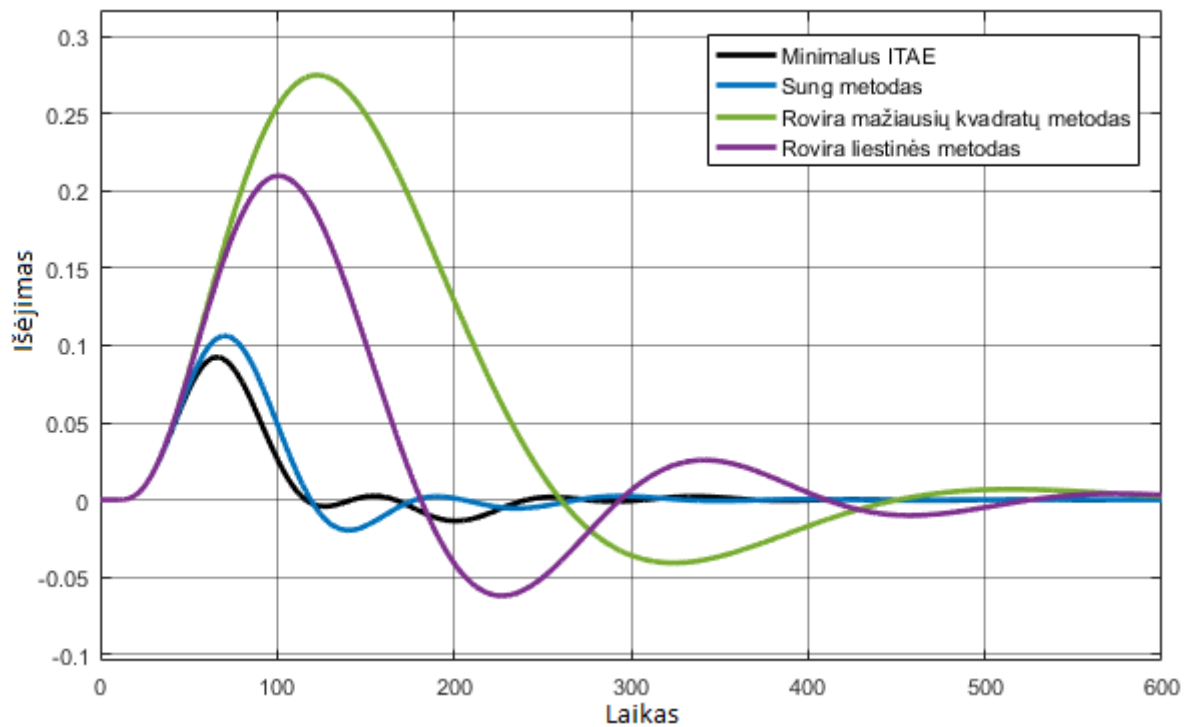
Įvertinus visų variantų ITAE kriterijaus verčių vidurkius (3.6 pav.), galima teigti, kad visų variantų atvejais rezultatai buvo gaunami panašūs ir *Sung* 'o metodu suderintos sistemos rezultatai visada yra arčiausiai optimalios ITAE kriterijaus vertės (apie 2 % didesnė nei optimali), palyginti su kitų, kurių ITAE vertė yra kelis kartus didesnė nei sistemos su optimaliais parametrais.

3.3.2. Trikdžio kompensavimo sąlyga

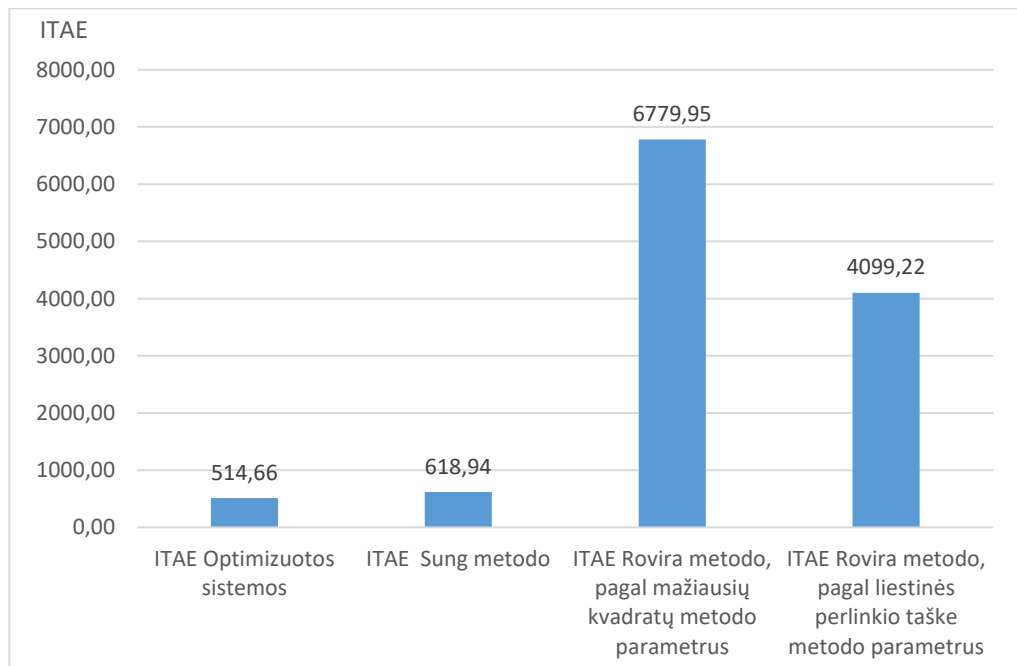
Apskaičiuotos trikdžio kompensavimo reikšmės įvedamos į *Simulink* aplinkoje sukurtą modelį (3.7 pav.) skirtą rasti ITAE kriterijaus vertę pagal trikdžio kompensavimo sąlygą, analogiškai nuostato sekimo sąlygai, kur stebima jo reakciją į vienetinį šuolinį signalą ir ITAE kriterijaus vertė.



3.7 pav. Sistemos su PID reguliatoriumi trikdžio kompensavimo bandymo modelis



3.8 pav. Trikdžio kompensavimo sistemų reakcijos pagal PID reguliatoriaus parametru nustatymo metodus (1 variantas)

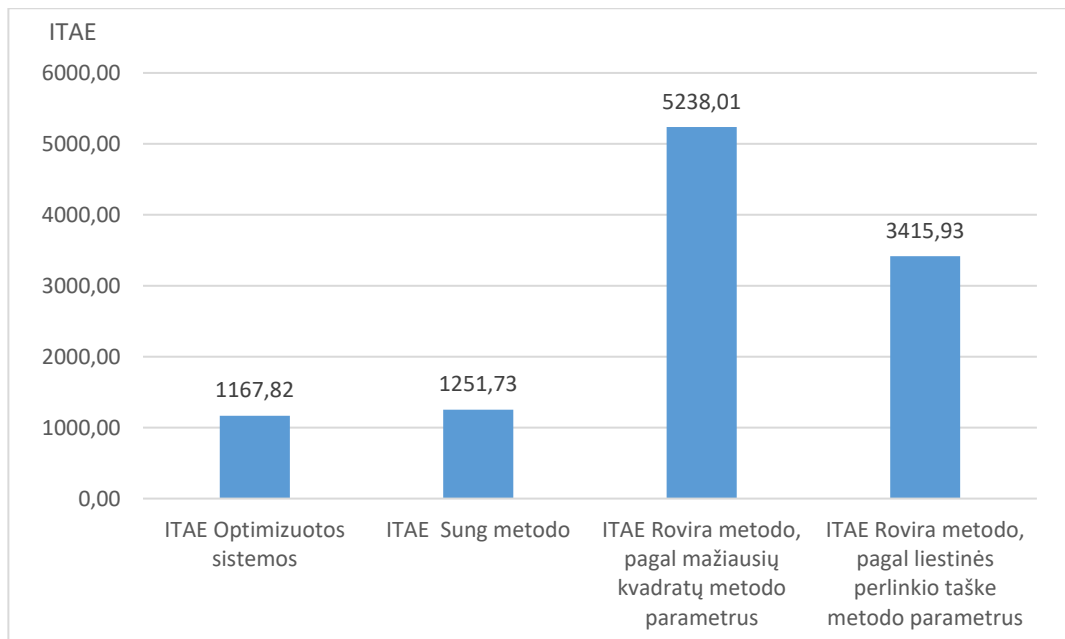


3.9 pav. ITAE kriterijaus vertės pagal PID reguliatoriaus derinimo metodus trikdžio kompensavimo sistemai (1 variantas)

Trikdžio kompensavimo bandymo rezultatai yra panašūs į nuostato sekimo bandymo rezultatus, tačiau *Rovira* metodo parametrai rasti liestinės metodu yra akivaizdžiai pranašesni už parametrus rastus mažiausių kvadratų metodu. Iš 3.8 pav. matoma, jog *Sung*’o metodu suderinta sistema trikdžio kompensavimui labiau skiriasi nuo optimaliai suderintos sistemos kreivės, nei derinant nuostato sekimui.

3.6 lentelė. Trikdžio kompensavimo sistemos ITAE kriterijaus vertės pagal derinimo metodus

| Varianto Nr. | ITAE Optimizuotas | ITAE Sung | ITAE Rovira mažiausių kvadratų | ITAE Rovira liestinės |
|--------------|-------------------|-----------|--------------------------------|-----------------------|
| 1 | 514,66 | 618,94 | 6779,95 | 4099,22 |
| 2 | 700,76 | 851,79 | 5773,50 | 3296,07 |
| 3 | 510,33 | 585,67 | 2754,94 | 2064,95 |
| 4 | 740,15 | 848,43 | 3336,41 | 2259,72 |
| 5 | 283,27 | 309,67 | 5562,91 | 3073,75 |
| 6 | 423,58 | 464,98 | 4794,58 | 2533,78 |
| 7 | 316,31 | 342,22 | 1978,04 | 1409,27 |
| 8 | 489,30 | 541,96 | 2517,07 | 1623,33 |
| 9 | 1940,61 | 2029,69 | 9451,51 | 6342,03 |
| 10 | 2358,91 | 2515,12 | 8001,26 | 5282,52 |
| 11 | 1799,97 | 1902,17 | 4541,57 | 3601,24 |
| 12 | 2364,95 | 2516,72 | 5404,72 | 3836,24 |
| 13 | 1341,88 | 1385,28 | 8080,17 | 5117,95 |
| 14 | 1746,08 | 1817,33 | 6982,72 | 4309,77 |
| 15 | 1324,71 | 1375,93 | 3521,28 | 2730,50 |
| 16 | 1829,65 | 1921,80 | 4327,60 | 3074,48 |
| Vidurkis | 1167,82 | 1251,73 | 5238,01 | 3415,93 |
| Koeficientas | 1,00 | 1,07 | 4,49 | 2,93 |



3.10 pav. Visų variantų trikdžio kompensavimo sistemos ITAE kriterijaus verčių vidurkiai pagal derinimo metodus

Sung 'o metodas išsiskiria savo artima verte optimaliai ITAE vertei., tačiau lyginant su nuostato sekimo bandymo rezultatais, gauti rezultatai prastesni (ITAE vertė apie 7 % didesnė nei optimizuotos sistemos ITAE kriterijaus vertė). Neatsižvelgiant į tai, *Sung* 'o metodas vis tiek yra pranašiausias, nes ITAE vertė yra mažesnė nei *Roviros* metodo (abejais modelio parametrų radimo metodais).

IŠVADOS

1. Šiame darbe buvo atlikta literatūros analizė, kurioje apžvelgiami PID reguliatorių veikimo pagrindai, procesų modeliai, integraliniai derinimo kriterijai ir tyrimui išrinkti PID reguliatorių derinimo metodai.
2. *Simulink* aplinkoje sudarytas proceso modelis su kintamais proceso parametrais, proceso modelio parametru radimui reikalingi *Simulink* modeliai, sistemos modelis ITAE kriterijaus vertės minimizavimui, nuostato sekimo ir trikdžio kompensavimo modeliai PID reguliatorių derinimo metodų rezultatams atvaizduoti. Šie modeliai siūsdavo arba priimdavo duomenis iš *Matlab* aplinkos, kurioje parašytas kodas naudojamas informacijos surinkimui ir apdorojimui, modelių parametru radimui, grafiku atvaizdavimui.
3. Atliekant 3.1 skyriaus bandymą, buvo keičiami pradiniai PID reguliatoriaus parametrai $\pm 10\%$ nuo pradinės vertės, kurie yra naudojami optimalių parametru radimui. Taip keičiant pradines vertes, po 10 bandymų gauti rezultatai skyrėsi nežymiai, skirtumas tarp didžiausios ir mažiausios ITAE kriterijaus vertės buvo tik 0,435 %. Tai įrodo, kad naudojamas metodas rasti pagal ITAE kriterijaus vertę optimizuotus PID reguliatoriaus parametrus yra tinkamas.
4. Atliekant 3.2 skyriaus bandymą, buvo lyginami du metodai pirmos eilės objekto modelio su vėlinimu parametrus rasti: mažiausių kvadratų ir liestinės perlinkio taške. Iš rezultatų galima spręsti, kad mažiausių kvadratų metodu gautas T_m yra mažesnis nei gautas liestinės perlinkio taške metodu, o τ_m didesnis. Gauti modelių parametrai panaudoti *Roviros* derinimo metodo skaičiavimams pagal nuostato sekimo ir trikdžio kompensavimo sąlygas.
5. Iš nuostato sekimo rezultatų (3.2.1 skyrius), kuris modelio parametru įvertinimo metodas yra geresnis pasakyti negalima, nes kartais geresnius rezultatus galima pasiekti *Roviros* metodu panaudojant mažiausių kvadratų metodą modelio parametru radimui, o kartais liestinės perlinkio taške metodą. Tačiau iš gauto reakcijos grafiko galima spręsti, kad *Roviros* metodo derinimui panaudojus parametrus gautus liestinės perlinkio taške metodu, galima gauti greitesnę reakciją į nuostato keitimo signalą, tačiau signalas būna inertiškas ir gaunamas perreguliavimas. Naudojant mažiausių kvadratų metodą modelio parametru radimui gaunami rezultatai skiriasi, šiuo atveju sistemos reakcija yra lėtesnė, tačiau nėra perreguliavimo, kas gali būti reikalinga tam tikroms sistemoms.
6. Iš trikdžio kompensavimo rezultatų (3.2.2 skyrius) matome, kad *Roviros* metodu suderinto PID reguliatorius panaudojant liestinės perlinkio taške modelio parametru identifikavimo metodą rezultatai visais variantais yra pranašesni už derinimą panaudojus mažiausių kvadratų metodą modelio parametru identifikavimui. ITAE kriterijaus vertė panaudojant liestinės perlinkio taške identifikavimo metodą yra vidutiniškai trečdaliu mažesnė už kitą lyginamą metodą.

Naudojant šį metodą gauta sistemos reakcija geriau susidoroja su trikdžiu, sistema mažiau paveikiama trikdžio. Galima daryti išvadą, kad derinant trikdžio kompensavimo sistemą *Roviros* metodu, tinkamesnis modelio parametrų identifikavimo metodas yra liestinės perlinkio taške.

7. Atlikus bendrą visų metodų nuostato sekimo tyrimą (3.3.1 skyrius) matome, jog *Sung'o* metodu suderintas PID reguliatorius parodė geriausias rezultatus pagal tyrime parinktą ITAE kriterijų. Šiuo metodu suderinto PID reguliatoriaus sistemos reakcijos ITAE kriterijaus vertė visais variantais yra mažiausia iš tiriamų metodų, o visų variantų ITAE kriterijaus vertės vidurkis yra tik apie 2 % didesnis, nei optimizuotos sistemos pagal ITAE kriterijų, kai palyginti kitų metodų ITAE kriterijaus vertės yra kelis kartus didesnės už optimizuotos sistemos.
8. Atlikus bendrą visų metodų trikdžio kompensavimo tyrimą (3.3.2 skyrius), galime teigti, kad naudojant ir šią valymo sąlygą *Sung'o* metodas išsiskiria savo pranašumu visuose variantuose. Tačiau šiuo atveju gautas ITAE kriterijaus vertės vidurkis yra 7 % didesnis, nei pagal ITAE kriterijų optimizuotos sistemos, todėl nuostato sekimo sistemos rezultatai buvo artimesni optimizuotai sistemai, nei trikdžio kompensavimo. Atsižvelgiant į gautus rezultatus, derinant PID reguliatorių pagal ITAE kriterijų, tikslingiausia yra naudoti *Sung'o* metodą.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. O'Dwyer, Aidan, *Handbook of PI and PID controller tuning rules*. Dublin Institute of Technology, Ireland, 2009
2. O'Dwyer, Aidan, *A summary of PI and PID controller tuning rules for processes with time delay. Part 1: PI controller tuning rules*. Dublin Institute of Technology, Ireland, 2000
3. D. Maiti, A. Acharya, M. Chakraborty, A. Konar and R. Janarthanan, *Tuning PID and $PI^{\lambda}D^{\delta}$ Controllers using the Integral Time Absolute Error Criterion*. 2008 4th International Conference on Information and Automation for Sustainability, Colombo, 2008
4. Lee Payne, *Tuning PID control loops for fast response* [interaktyvus]. 2014 [žiūrėta 2017-05-25]. Prieiga per: <http://www.controleng.com/single-article/tuning-pid-control-loops-for-fast-response/495b3c78823d6ccfa58f2f83d58dc85c.html>
5. J. D. Hedengren, *First Order Systems* [interaktyvus]. Brigham Young University, Provo, Utah, USA, 2016 [žiūrėta 2017-05-15]. Prieiga per: <http://apmonitor.com/pdc/index.php/Main/FirstOrderSystems>
6. *FOTDP* [interaktyvus]. Brigham Young University, Provo, Utah, USA, 2016 [žiūrėta 2017-05-15]. Prieiga per: <http://www.processcontrolstuff.net/tag/featured/>
7. J. D. Hedengren, *Second Order Systems* [interaktyvus]. Brigham Young University, Provo, Utah, USA, 2016 [žiūrėta 2017-05-15]. Prieiga per: <http://apmonitor.com/pdc/index.php/Main/SecondOrderSystems>
8. J. D. Hedengren, *Graphically Fit Second Order Response* [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2017-05-15]. Prieiga per: <http://apmonitor.com/pdc/index.php/Main/SecondOrderGraphical>
9. W. C. Schultz and V. C. Rideout, *Control system performance measures: Past, present, and future*. IRE Transactions on Automatic Control, vol. AC-6, no. 1, 1961.
10. M. Zhuang and D. P. Atherton, *Tuning PID controllers with integral performance criteria*. Control '91., International Conference on, Edinburgh, 1991.
11. G. Martins, Fernando, *Tuning PID Controllers using the ITAE Criterion*. Chemical Engineering Department, University of Porto, Porto, Portugal, 2005.
12. Ala Eldin Abdallah Awouda, *Refine PID Tuning Rule Using ITAE Criteria*. Universiti Teknologi Malaysia, Department of Mechatronics and Robotics, Faculty of Electrical Engineering, Johor, Malaysia, 2010.
13. Graham D. and Lathrop R. C., *The Synthesis of „Optimum“ Transient Response: Criteria and Standart Forms*. 1953.
14. Sung, Su Whan, *Automatic tuning of PID controllers using second-order plus time delay model*. Department of Chemical Engineering, Kyangpook National University, Taegu, Korea, 1996

15. K. Åström and T. Hägglund, *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*, 2nd edition. Instrument Society of America, 1995.
16. Hwang S. H., *Closed-Loop Automatic Tuning of Single-Input-Single-Output Systems*. Department of Chemical Engineering, National Cheng-Kung University, Tainan, Taiwan, 1995.
17. David. I. Wilson, *Relay-based PID Tuning*. Department of Electrical & Electronic Engineering, Auckland University of Technology, New Zeland, 2005.
18. Cheng-Ching Yu, *Autotuning of PID Controllers: Relay Feedback*. Department of Chemical Engineering, National Taiwan University of Science & Technology, Taipei, Taiwan, 1999.
19. D. Levišauskas, T. Tekorius, *Investigation of P and PD Controllers' Performance in Control Systems with Steady-State Error Compensation*. Process Control Department, Kaunas University of Technology, Kaunas, 2012.
20. D. Levišauskas, *Automatinio Reguliavimo Sistemų Derinimas*. Kauno Technologijos Universitetas, Vilnius, 2008.
21. Sunil A. Misal, V. S. Sathe, R.W. Gaikwad, Dharendra, *Model Identification Using Identification Tool and Estimation of Optimum Control Parameters Using Relay Tuning Method for Bioreactor*. Department of Chemical Engineering, Pravara Rural Engineering College, India, 2012.
22. V. VanDoren, *Disturbance-Rejection vs. Setpoint-Tracking Controllers* [interaktyvus]. 2011 [žiūrėta 2018-03-21]. Prieiga per: <https://www.controleng.com/single-article/disturbance-rejection-vs-setpoint-tracking-controllers/f1e71c39ed5c34634687a985f9a5d53a.html>
23. J. Smuts, *Tuning for Setpoint Tracking versus Disturbance Rejection* [interaktyvus]. 2017, OptiControls Inc. [žiūrėta 2018-03-21]. Prieiga per: <http://blog.opticontrols.com/archives/1328>
24. Hassan G.A. *Computer-aided tuning of analog and digital controllers, Control and Computers*, 1993.
25. Rovira A. A., *Control Algorithms, Tuning, and Adaptive Gain Tuning in Process Control*. The Department of Chemical Engineering, Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College, 1981.
26. Rovira A. A., Murrill P.W., Smith C.L., *Tuning controllers for setpoint changes, Instruments and Control Systems*, 1969.

PRIEDAI

Priedas Nr. 1. Pirmos eilės modelio su vėlinimu parametrų identifikavimo pagal mažiausių kvadratų metodą *Matlab* programinis kodas

```
% Paimami eksperimentiniai duomenys iš FromWorkplace.dat
fname='FromWorkspace.dat';
% Įvedama nusistovėjusi x reikšmė (x(∞))
xe_inf=1;
% Nuskaitymas iš failo
EXP=load(fname);
mu1=EXP(1,1);
mu2=EXP(1,2);
te2=EXP(2:end,1);
xe2=EXP(2:end,2);

% Ieškomos reikšmės, kurios prasideda po vėlinimo
dx=xe_inf-x0;
if dx>0,
    sim_ind=find(xe2>=(x0+0.01*dx));
else
    sim_ind=find(xe2<=(x0+0.01*dx));
end,
% Reikšmės po vėlinimo
te=te2(sim_ind);
xe=xe2(sim_ind)-x0;

%Mažiausių kvadratų motodu įvertinami modelio parametrai
log_x_rel=log((dx-xe(:))./dx);
T=[ones(length(te),1) -te];
PAR= T \ log_x_rel;
k0f=1
T0f=1/PAR(2)
tau0f=PAR(1)*T0f

%Reakcijos kreivės modeliavimas
for i=1:100,
    t_mod(i)=(i-1)*(te2(end)-te2(1))/100+te2(1);
    if (t_mod(i)>=tau0f),
        x_mod(i)=dx*(1.0-exp(-(t_mod(i)-tau0f)/T0f))+x0;
    else
        x_mod(i)=x0;
    end
end
% Braižomos eksperimentinio ir modeliuoto objekto reakcijos kreivės
plot(te2,xe2,'ob',t_mod,x_mod,'r'), grid on;
xlabel('Laikas'); ylabel('Išėjimas')
```

Priedas Nr. 2. Pirmos eilės modelio su vėlinimu parametrų identifikavimo pagal liestinės perlinkio taške metodą *Matlab* programinis kodas

```
% Paimami eksperimentiniai duomenys iš FromWorkplace.dat
fname='FromWorkspace.dat';
% Nuskaitymas iš failo
EXP=load(fname);
mu1=EXP(1,1);
```

```

mu2=EXP(1,2);
te2=EXP(2:end,1);
xe2=EXP(2:end,2);

x0=0;
xe_inf=1;
dx=xe_inf-x0;

% Ieškomi nedalyti skirtumai
for i=1:(length(te2)-1)
Nedalsk(i)=xe2(i+1)-xe2(i);
end;

% Surandamas perlinkio taškas
NedalskMax=max(Nedalsk)
NedalskMaxArray=find(Nedalsk>=(0.99*(max(Nedalsk))))
NedalskMaxIndex=ceil((NedalskMaxArray(end)-
NedalskMaxArray(1))/2+NedalskMaxArray(1))
NedalskMaxTime=te2(NedalskMaxIndex)
NedalskMaxValue=xe2(NedalskMaxIndex)
% Ieškomi dalyti skirtumai
DalSk=(xe2(NedalskMaxIndex(1)+1)-
xe2(NedalskMaxIndex(1)))/(te2(NedalskMaxIndex(1)+1)-te2(NedalskMaxIndex(1)))
% Apskaičiuojami modelio identifikavimui reikalingi parametrai
b=(NedalskMaxValue-xe2(1))/(xe2(end)-xe2(1))
A=NedalskMaxValue-DalSk*NedalskMaxTime(1)
k0a=1
tau0R=(xe2(1)-A)/DalSk
T0R=1/DalSk

% Apskaičiuojami modelio parametrai
Ta=(1-b)*T0R
taua=NedalskMaxTime-(1-b)*T0R*log(1/(1-b))

% Braižoma modelio reakcijos kreivė
for i=1:100,
t_mod(i)=(i-1)*(te2(end)-te2(1))/100+te2(1);
if (t_mod(i)>=taua),
x_mod(i)=dx*(1.0-exp(-(t_mod(i)-taua)/Ta))+x0;
else
x_mod(i)=x0;
end
end
figure(2)
plot(te2,xe2,'ob',t_mod,x_mod,'r'), grid on;
xlabel('Laikas'); ylabel('Iðėjimas')

% Braižomas nedalytų skirtumų grafikas
figure(10)
plot(Nedalsk)

```

Priedas Nr. 3. Antros eilės modelio su vėlinimu parametru identifikavimo *Matlab* programinis kodas

```

% Apsirašomi globalūs kintamieji
global TIME OBJ_INPUT OBJ_OUTPUT
% Nuskaitomas failas
fname='FromWorkspace.dat';
open IDENT_OBJ.mdl;

```



```

EXP=load(fname);
mu1=EXP(1,1);
mu2=EXP(1,2);
te=EXP(2:end,1);
xe=EXP(2:end,2);
xe_inf=xe(end);
% Ieškamos reikšmės, kurios prasideda po vėlinimo
dx=xe_inf-x0;
if dx>0,
    sim_ind=find(xe>=(x0+0.01*dx));
else
    sim_ind=find(xe<=(x0+0.01*dx));
end,

%Įvedamos pradinės k0, tau0, T2 ir T1 reikšmės
k0=1;
tau0=te(sim_ind(1)-1);
T06321_ind=find(((xe-x0)./dx)>=0.6321);
T1=(te(T06321_ind(1))-tau0)*0.5;
T2=(te(T06321_ind(1))-tau0)*0.3;
% Nurodomos glabaliųjų kintamųjų vertės
TIME=te;
OBJ_INPUT=[mu2-mu1];
OBJ_OUTPUT=xe;
% Nurodomi optimizuojami parametrai
PARAMETERS0=[tau0, T1, T2];
% Nurodomi funkcijos nustatymai (iteracijų kiekis)
OPTIONS1=optimset('MaxIter', 100);
% Vykdoma optimizacija
disp('Optimization running...')
PARAMETERS = fminsearch('IDENT_J',PARAMETERS0,OPTIONS1);
% Gautos naujos parametru reikšmės po optimizavimo
k0
tau0=max([0 PARAMETERS(1)])
T1=max([0 PARAMETERS(2)])
T2=max([0 PARAMETERS(3)])
% Apskaičiuojami skaičiavimams reikalingi parametrai
T0=(T1*T2)^0.5
xi=(T1+T2)/(2*T0)

tproc=TIME(end);
% Paleidžiamas modelis
sim('IDENT_OBJ.mdl',TIME);
% Braižomos eksperimentinio ir modeliuoto objekto reakcijos kreivės
plot(te,xe,'ob',TIME,M_OUTPUT,'g'),grid,'on';
xlabel('Laikas'); ylabel('Iðėjimas')

```

IDENT_J funkcijos programos kodas

```

function ERR = J(PAR)
% Aprašomi globalieji kintamieji
global TIME OBJ_INPUT OBJ_OUTPUT
% Ieškomi parametrai
tau0=max([0 PAR(1)]);
T1=max([0 PAR(2)]);
T2=max([0 PAR(3)]);
% Iš globaliųjų kintamųjų pasiimamos reikšmės modeliui
tproc=TIME(end);
x0=OBJ_OUTPUT(1);
% Parenkami Simulink aplinkos nustatymai
OPTIONS2=simset('DstWorkspace', 'current', ...
                'SrcWorkspace', 'current', ...

```

```

        'OutputPoints','specified', ...
        'SaveFormat', 'Array');

% Paleidžiamas modelis
sim('IDENT_OBJ.mdl',TIME,OPTIONS2);
% Ieškoma paklaidos kvadratų suma
POWER=2;
ERR=sum((abs(OBJ_OUTPUT-M_OUTPUT)).^POWER);

```

Priedas Nr. 4. Tyrimo su rele ir neigiamu grįžtamoju ryšiu *Matlab* programinis kodas

```

% Atidaromas Simulink modelis
open Relay_feedback_Auto.slx;
% Nustatomi modelio parametrai
time0=2*tproc;
step=1;
on=1.5;
off=on-step;
onOut=1;
offOut=-1;
KcR=1;
% Paleidžiamas modelis
sim('Relay_feedback_Auto.slx');
% Iš gautų reikšmių randamos įėjimo ir išėjimo amplitudės
h=max(relayOut.data)
a=max(signalOut.data)
% Ieškomas relės signalo periodas
highSignals=relayOut.data==onOut;
diffSignals= diff(highSignals);
diffSignalIndexes=find(diffSignals==1);
Pu=(relayOut.time(diffSignalIndexes(end))-
relayOut.time(diffSignalIndexes(1)))/(length(diffSignalIndexes)-1)
% Skaičiuojamas ribinis stiprinimo koeficientas Ku ir ribinis svyravimo dažnis wu
Ku=(4*h)/(pi*a)
wu=(2*pi)/Pu

```

Priedas Nr. 5. PID reguliatoriaus optimizavimo pagal ITAE kriterijų *Matlab* programinis kodas

```

% Apsirašomi globalūs kintamieji
global TIME OBJ_INPUT T1itae T2itae T3itae tauitae
% Nuskaitomas failas
fname='FromWorkspace.dat';
open IDENT_ITAE_sim.slx;
% Nurodomos glabaliųjų kintamųjų vertės
T1itae=T1par;
T2itae=T2par;
T3itae=T3par;
tauitae=taupar;
TIME=te;
OBJ_INPUT=[mu2-mu1];

EXP=load(fname);
mu1=EXP(1,1);

```

```

mu2=EXP(1,2);
te=EXP(2:end,1);
xe=EXP(2:end,2);
xe_inf=xe(end);

dx=xe_inf-x0;
if dx>0,
    sim_ind=find(xe>=(x0+0.01*dx));
else
    sim_ind=find(xe<=(x0+0.01*dx));
end,

%Įvedamos pradinės KcITAE, KiITAE ir KdITAE reikšmės
KcITAE=Kc1;
KiITAE=Kc1/Ti1;
KdITAE=Kc1*Td1;

% Nustatomos pradinės reikšmės su ±10% pokyčiu optimizavimo tyrimui
% KcITAE=Kc1*(1+0.2*(rand-0.5))
% KiITAE=Kc1/Ti1*(1+0.2*(rand-0.5))
% KdITAE=Kc1*Td1*(1+0.2*(rand-0.5))

% Nurodomi optimizuojami parametrai
PARAMETERS0=[KcITAE, KiITAE, KdITAE];
% Nurodomi funkcijos nustatymai (iteracijų kiekis)
OPTIONS1=optimset('MaxIter', 50);
% Vykdoma optimizacija
disp('ITAE Optimization running...')
PARAMETERS = fminsearch('IDENT_ITAE_mat',PARAMETERS0,OPTIONS1);
% Gautos naujos parametru reikšmės po optimizavimo
KcITAE=PARAMETERS(1)
KiITAE=PARAMETERS(2)
KdITAE=PARAMETERS(3)
% Apskaičiuojami papildomi parametrai
TiITAE=KcITAE/KiITAE;
TdITAE=KdITAE/KcITAE;

```

IDENT_ITAE_mat funkcijos programos kodas

```

function ITAE = J(PAR)
% Aprašomi globalieji kintamieji
global TIME OBJ_INPUT T1itae T2itae T3itae tauitae
% Ieškomi parametrai
KcITAE=PAR(1);
KiITAE=PAR(2);
KdITAE=PAR(3);
% Iš globaliųjų kintamųjų pasiimamos reikšmės modeliui
tproc=TIME(end);
% Parenkami Simulink aplinkos nustatymai
OPTIONS2=simset('DstWorkspace', 'current', ...
                'SrcWorkspace', 'current', ...
                'OutputPoints','specified', ...
                'SaveFormat', 'Array');

% Paleidžiamas modelis
sim('IDENT_ITAE_sim.slx',TIME,OPTIONS2);
% Ieškoma paskutinė ITAE matricos reikšmė
ITAE=ITAE_output(end);

```