



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Regimantas Krikštaponis

**ŠILUMOKAIČIO TEMPERATŪROS ADAPTYVIOS VALDYMO
SISTEMOS SUKŪRIMAS IR TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Prof. dr. Donatas Levišauskas

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
AUTOMATIKOS KATEDRA

**ŠILUMOKAIČIO TEMPERATŪROS ADAPTYVIOS VALDYMO
SISTEMOS SUKŪRIMAS IR TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas
Valdymo technologijos (kodas M3066M21)

Vadovas

(parašas) Prof. dr. Donatas Levišauskas
(data)

Recenzentas

(parašas) Prof. dr. Vytautas Galvanauskas
(data)

Projektą atliko

(parašas) Regimantas Krikštaponis
(data)

KAUNAS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Regimantas Krikštaponis

(Studento vardas, pavardė)

Valdymo technologijos, M3066M21

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Šilumokaičio temperatūros adaptyvios valdymo sistemos tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

2016 . gegužės 24 .
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Regimanto Krikštaponio** baigiamasis projektas tema „Šilumokaičio temperatūros adaptyvios valdymo sistemos 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)

Krikštaponis, R. Šilumokaičio temperatūros adaptyvios valdymo sistemos sukūrimas ir tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Donatas Levišauskas; Kauno Technologijos Universitetas, Elektros ir Elektronikos fakultetas, Automatikos katedra.

Kaunas, 2016. 45 psl.

SANTRAUKA

Darbo tikslas – ištirti šilumokaičio temperatūros automatinio reguliavimo problemas, kai šilumokaičio apkrova ir aušinančio vandens temperatūra kinta plačiose ribose, bei sukurti adaptyvią valdymo sistemą, kuri išlaikytų gerus valdymo kokybės rodiklius.

Sukurta adaptyvi valdymo sistema su stiprinimo numatymu. Kuriant valdymo sistemą, perdavimo funkcijos su vėlinimu parametrai nustatomi iš šuolinės reakcijos eksperimentų grafiniu būdu. Parametrų koregavimo mechanizmas realizuojamas antros eilės polinominiu modeliu. PID reguliatorius derinamas naudojant IAE derinimo taisyklės trikdžio kompensavimui.

Raktažodžiai:

Šilumokaitis;

Adaptyvi valdymo sistema;

Stiprinimo numatymas;

Polinomas;

PID;

IAE.

Krikštaponis, R. Development and Investigation of Adaptive Control System of Temperature in a Heat Exchanger. Master's final project / supervisor prof. dr. Donatas Levišauskas; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Automation.

Kaunas, 2016. 45 psl.

SUMMARY

The purpose of this paper – examine automatic regulation problems occurring in heat exchanger when its load and cooling water temperature is changing in wide range, also to create an adaptive control system which would preserve a good control quality index.

Created adaptive control system with amplification prediction. While creating this system, transmission function with delay parameters is determined using graphical approach applied to step response experiments. Parameter correction mechanism is implemented using second degree polynomial equation. PID regulator is adjusted using IAE adjustment rules for disturbance counterbalancing.

Keywords:

Heat exchanger;

Adaptive control system;

Gain scheduling;

Polynomial model;

PID;

IAE.

Turinys

1. VAMZDINIŲ ŠILUMOKAIČIŲ KONSTRUKCIJOS IR VEIKIMO PRINCIPAS	11
2. ADAPTYVI VALDYMO SISTEMA	15
2.1 Adaptacijos samprata.....	15
2.2 Adaptacijos metodai	16
2.3 Adaptacijos metodo parinkimas	18
2.4 Adaptyvios valdymo sistemos projektavimo etapai	19
3. PID REGULIATORIAUS SU STIPRINIMO NUMATYMU PROJEKTAVIMAS	20
3.1 Eksperimentinių tyrimų plano sudarymas	20
3.2 Aušinančio vandens srauto nustatymas	21
3.3 Pirmos eilės perdavimo funkcijos su vėlavimu parametų nustatymas	22
3.4 Antros eilės polinomo modelio koeficientų nustatymas.....	27
3.5 Regulatoriaus derinimas	32
3.6 Diskrečiojo PID regulatoriaus realizavimas	34
4. TYRIMŲ REZULTATAI	35
IŠVADOS.....	39
LITERATŪRA.....	40
Priedas 1. Proceso stiprinimo koeficiento koregavimo modelis.....	41
Priedas 2. Proceso atstojamosios laiko pastoviosios koregavimo modelis	42
Priedas 3. Proceso atstojamosios vėlavimo trukmės koregavimo modelis	43
Priedas 4. IAE derinimo taisyklių realizavimas	44
Priedas 5. Diskretinio PID realizavimo modelis	45

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Vamzdinio šilumokaičio principinė veikimo schema	12
1.2 pav. Labiausiai paplitę vamzdinio šilumokaičio tipai.....	12
2.1 pav. Atvira valdymo sistema.....	15
2.2 pav. Uždara valdymo sistema	15
2.3 pav. Adaptyvi valdymo sistema	15
2.4 pav. Stiprinimo numatymo principinė schema	17
2.5 pav. Etaloninio modelio adaptyvios valdymo sistemos principinė schema.....	18
2.6 pav. Adaptacijos metodo parinkimo schema	18
3.1 pav. Eksperimentinių tyrimų planas.....	21
3.2 pav. Modelis, aušinančio vandens srauto nustatymui	22
3.3 pav. Vandens srauto vertės eksperimentinių tyrimų plano taškuose.....	22
3.4 pav. Modelis, perdavimo funkcijos parametrams nustatyti ir patikrinti	24
3.5 pav. Parametrų nustatymas iš šuolinės reakcijos kreivės pirmame tyrimų plano taške, kai $\Delta u = -2,778$	25
3.6 pav. Tyrės temperatūros šilumokaičio ir jos aproksimacijos reakcijos į teigiamą šuolinį vandens pokytį palyginimas	27
3.7 pav. Tyrės temperatūros šilumokaičio ir jos aproksimacijos reakcijos į neigiamą šuolinį vandens pokytį palyginimas	27
3.8 pav. Stiprinimo koeficiento eksperimentinių ir modeliavimo rezultatų palyginimas	31
3.9 pav. Atstojamosios laiko pastoviosios eksperimentinių ir modeliavimo rezultatų palyginimas ..	31
3.10 pav. Stiprinimo koeficiento reakcijos paviršius izolinijomis.....	32
3.11 pav. Derinimo metodų palyginimas	33
4.1 pav. Šilumokaičio temperatūros adaptyvios valdymo sistemos modelis.....	35
4.2 pav. Proceso reguliavimo efektyvumo palyginimas, kai $Tv.in = 18$ (°C), $Ft = 10$ (m ³ /h) ..	35
$\Delta Ft = 3$ (m ³ /0,5h).....	35
4.3 pav. Proceso reguliavimo efektyvumo palyginimas, kai $Tv.in = 11$ (°C), $Ft = 10$ (m ³ /h) ..	36

$\Delta Ft = 3 (m^3/0,5h)$	36
4.4 pav. Proceso reguliavimo efektyvumo palyginimas, kai $Tv.in = 4 (^\circ C)$, $Ft = 10 (m^3/h)$	36
$\Delta Ft = 3 (m^3/0,5h)$	36
4.5 pav. Proceso reguliavimo efektyvumo palyginimas, kai $Tv.in = 4 (^\circ C)$, $Ft = 20 (m^3/h)$	36
$\Delta Ft = 3 (m^3/0,5h)$	36
4.6 pav. Proceso reguliavimo efektyvumo palyginimas, kai $Tv.in = 18 (^\circ C)$, $Ft = 30 (m^3/h)$..	37
$\Delta Ft = -3 (m^3/0,5h)$	37
4.7 pav. Proceso reguliavimo efektyvumo palyginimas, kai $Tv.in = 11 (^\circ C)$, $Ft = 30 (m^3/h)$..	37
$\Delta Ft = -3 (m^3/0,5h)$	37
4.8 pav. Proceso reguliavimo efektyvumo palyginimas, kai $Tv.in = 18 (^\circ C)$, $Ft = 30 (m^3/h)$..	37
$\Delta Ft = -10 (m^3/0,5h)$	37

Lentelių sąrašas

3.1 lentelė. Konstantų ir parametrų nominalios vertės.....	20
3.2 lentelė. Šuolio amplitudės vertės eksperimentinių tyrimų plano taškuose	23
3.3 lentelė. Pirmos eilės su vėlavimu perdavimo funkcijos parametrų vertės atitinkamuose tyrimo plano taškuose	26
3.4 lentelė. Kompozicinis planas antros eilės polinominiam modeliui.....	28
3.5 lentelė. Stiprinimo koeficiento eksperimentiniai ir modeliavimo rezultatai	29
3.6 lentelė. Antros eilės polinominio modelio koeficientai	30
3.7 lentelė. Eksperimentiniai ir modeliavimo rezultatai	30
3.8 lentelė. Reguliatoriaus parametrų vertės	34
4.1 lentelė. Kokybės rodiklių palyginimas.....	38

IVADAS

Vykstant etilo alkoholio gamybos procesui, tyrėi atvėsinti iki reikiamos temperatūros naudojamas šilumokaitis. Suskaldyti grūdai, fermentai ir vanduo sumaišomi technologinėje talpoje, kurioje paruošiama reikiamos koncentracijos pH ir temperatūros tyrė. Toliau tyrė perpilama į virinimo talpą, iš kurios pasitelkus siurbli perpilama į išlaikymo talpą. Išlaikius nustatytą laiką, iš pastarosios talpos tyrė patenka į šilumokaitį, kuriame yra atvėsinama. Iš šilumokaičio atvėsinta tyrė patenka į fermentacijos talpas, kuriose vyksta etilo alkoholio fermentacijos procesas. Pasibaigus fermentacijos procesui, raugas patenka į distiliacijos kolonas, kuriose atskiriamas etilo alkoholis.

Šilumokaičio veikimo ypatumai, kurie apsunkina šaldomos tyrės tikslų temperatūros palaikymą (pagal technologinius reikalavimus $25\text{ }(^{\circ}\text{C})$), yra aušinamos tyrės srauto ir aušinančio vandens temperatūros variacijos plačiuose diapazonuose. Aušinamos tyrės srautas kinta nuo $10\text{ (m}^3/\text{h)}$ iki $30\text{ (m}^3/\text{h)}$, o aušinančio vandens temperatūra kinta nuo $4(^{\circ}\text{C})$, kai naudojamas tik šaltinio vanduo, iki $18(^{\circ}\text{C})$, kai naudojamas upės ir/arba šaltinio vanduo. Dėl šių variacijų plačiose ribose keičiasi valdomo objekto dinaminės savybės ir įprasta vienkontūrė temperatūros automatinio reguliavimo sistema su pastoviai suderintu PID reguliatoriumi negali palaikyti tyrės temperatūros šilumokaičio išėjime reikiamu tikslumu. Besikeičiančias objekto dinamines savybes reikia įvertinti ir kompensuoti atitinkamai keičiant PID reguliatoriaus parametrus.

Šio darbo tikslas yra atlikti šilumokaičio temperatūros adaptyvios valdymo sistemos tyrimą, parinkti adaptacijos algoritmą ir sukurti modelį, kuris keičiantis aušinamos tyrės srautui ir aušinančio vandens temperatūrai gebėtų palaikyti pastovią $25\text{ }(^{\circ}\text{C})$ tyrės temperatūrą šilumokaičio išėjime.

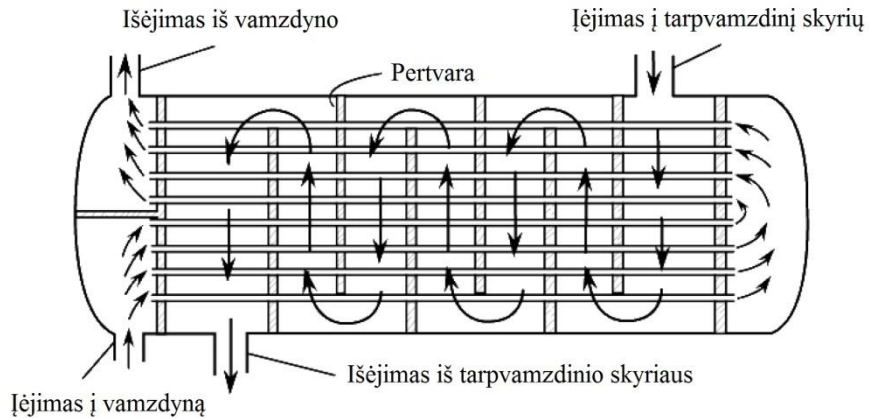
1. VAMZDINIŲ ŠILUMOKAIČIŲ KONSTRUKCIJOS IR VEIKIMO PRINCIPAS

Šilumokaičiai priskiriami prie labiausiai paplitusių įrenginių. Jie naudojami šilumos perdavimui tarp skysčių, garų ir dujų nekeičiant arba keičiant agregatines būsenas. Šilumokaičiai pradėti naudoti 20 a. pradžioje, atsiradus šiluminėms stotims, kaip vandens šildytuvai, arba garo kondensatoriai, kurie dirbdavo esant santykinai dideliam slėgiui. Dabartinais laikais šilumokaičiai naudojami kaip kondensatoriai, šildytuvai ir garintuvai.

Eksplotacijos metu jų konstrukcija kito dėl mokslo atradimų ir tapo tobulesnė nei pirmųjų šilumokaičių. Kiek vėliau nuo jų atsiradimo, šilumokaičiai pradėti naudoti naftos perdirbimo pramonėje, kurioje ypač specifinės darbo sąlygos: aukštos temperatūros, dideli slėgiai, užterštos perdirbimo medžiagos. Todėl iškilo būtinybė keisti jų konstrukciją taip, kad valymą bei remontą būtų galima padaryti kuo paprastesnius, lengvesnius ir pigesnius. Tobulėjant konstrukcijoms ir didėjant variantų pasirinkimui bei paprastėjant eksploatacijai, šilumokaičiai tapo vis labiau naudojami pramonėje ir buityje. Šilumokaičių paplitimą lėmė šios savybės[4]:

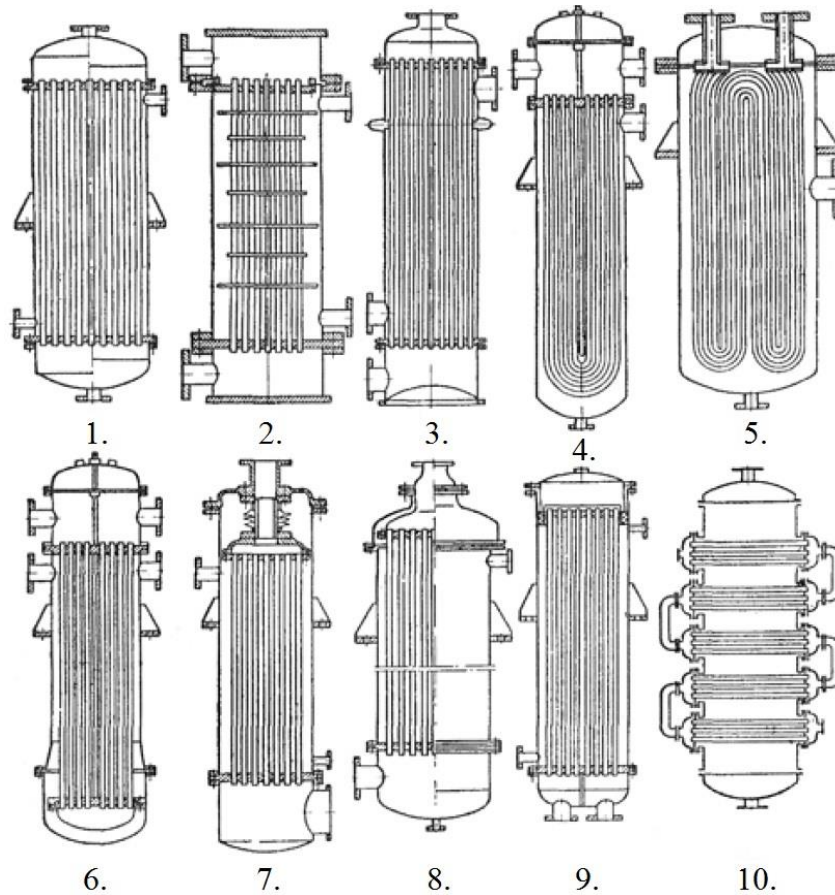
1. Vienfaziai srantai, virimas ir kondensavimasis abiejose šilumokaičio pusėse, galimas tiek vertikalus, tiek horizontalus variantas;
2. Slėgio diapazonas nuo vakuumo iki labai didelių slėgių abiejose šilumokaičio pusėse (dėl konstrukcijų variantų gausos);
3. Terminio režimo reikalavimai nelabai keičia aparato kainą;
4. Dydžiai – nuo mažų iki itin didelių (iki 5000 m³ ir didesni);
5. Konstrukcinių medžiagų įvairovė leidžia keisti kainos ir kokybės santykį;
6. Galimybė nedidelėmis darbo ir medžiagų sąnaudomis remontuoti, valyti ir prižiūrėti įrenginius.

Vamzdiniai šilumokaičiai susideda iš vamzdžių konstrukcijos, sumontuotos vamzdžių plokštėje, kameros, įvadų ir atramų. Vamzdinė ir tarpvamzdinė erdvė šiuose įrenginiuose atskirta ir gali būti padalinta dar į atskirus skyrius. Klasikinė vamzdinio šilumokaičio principinė veikimo schema parodyta 1.1 paveiksle.



1.1 pav. Vamzdinio šilumokaičio principinė veikimo schema

Šilumą perduodantis paviršiaus plotas gali būti nuo kelių šimtų kvadratinų centimetrų iki keleto tūkstančių kvadratinų metrų. Pavyzdžiui, garo turbinos, kurios galia yra 150 MW, kondensatorius sudarytas iš 17000 vamzdžių, o paviršiaus plotas yra apie 9000 m². Labiausiai paplitę vamzdinio šilumokaičio tipai parodyti 1.2 paveiksle[4].



1.2 pav. Labiausiai paplitę vamzdinio šilumokaičio tipai

Vamzdinio šilumokaičio korpusas yra vamzdžio formos, suvirintas iš plieno lakštų. Korpusai skiriasi priklausomai nuo sujungimo su vamzdine sekcija ir dangčiais. Korpuso sienelės storį lemia darbinis slėgis ir korpuso diametras. Dažniausiai naudojamas ne mažesnis nei 4 mm storio plienas. Vidinis vamzdynas daromas iš tiesių arba lenktų (U arba W) 12 – 57 mm diametro vamzdžių. Vidinis vamzdynas patikimiausias tuomet, kai gaminamas iš besiūlių vamzdžių. Vamzdiniame šilumokaityje tarpvamzdinė erdvė 2 – 3 kartus didesnė už vamzdinę dalį. Todėl esant vienodiems skysčių greičiams, šilumos perdavimo koeficientas yra nedidelis, o tai savo ruožtu sumažina šilumokaičio naudingumo koeficientą. Kad to būtų galima išvengti, vamzdinio šilumokaičio viduje montuojamos pertvaros (1.2 pav. 2), kurios padidina šilumos nešėjo greitį, o tuo pačiu ir įrenginio efektyvumą.

Vamzdžiai sujungiami į sekcijas naudojant jungiamąsias plokštes. Jie įpresuojami, įvirinami arba įlituojami. Vamzdžių plokštės privirinamos prie vamzdinio šilumokaičio korpuso (1.2 pav. 1 ir 3), prispaudžiami varžtais tarp korpuso flančų dangčių (1.2 pav. 2 ir 4) arba sujungiami varžtais su kameros flančiais (1.2 pav. 5 ir 6). Vamzdžių sujungimo plokštės gaminamos iš lakštinio plieno, ne mažesnio nei 20 mm storio.

Skysčių tekėjimas vamzdiniame šilumokaityje gali būti priešpriešinis, vienkryptis, vertikalus, horizontalus, nuožulnus. 1.2 paveiksle 1 numeriu pavaizduotas vamzdinis šilumokaitis su tiesiais vamzdžiais ir tvirtu jungimu tarp vamzdžių ir plokštės. Tokių vamzdynų šilumokaičių konstrukcija labai paprasta, tačiau jie naudojami esant tik ne didesniai nei 50(°C) temperatūrų skirtumui tarp skysčių. Jų šilumos perdavimo koeficientas nedidelis dėl mažo skysčio tekėjimo greičio tarpvamzdinėje erdvėje. Įmontavus pertvaras (1.2 pav. 2), skysčio tekėjimo greitis padidėja. Garo-skysčio vamzdiniame šilumokaityje garai eina tarpvamzdine erdve, o skystis vamzdžiais. Tokioje sistemoje temperatūrų skirtumas didelis, todėl pradeda veikti šiluminio pailgėjimo reiškinys. Tam, kad jį kompensuotų, montuojami linziniai (1.2 pav. 3), riebokšliniai (1.2 pav. 8 ir 9) arba silfoniniai (1.2 pav. 7) kompensatoriai.

Siekiant išvengti įtampų metalo konstrukcijose, kurias sukelia metalų šiluminis pailgėjimas, gaminami vienkameriniai vamzdiniai šilumokaičiai su lenktu U arba W formos vamzdynu. Juos tikslinga naudoti esant dideliems slėgiams, nes pagaminti vamzdyną, kuris dirbs tokiomis sąlygomis, yra brangu ir sudėtinga. Kompensaciniai įrenginiai sudėtingi gaminant (membraniniai, silfoniniai arba lenktais vamzdžiais) arba nepatikimi eksploatuojant (linziniai, riebokšliniai). Geresnė konstrukcija gaunama naudojant tiesų vamzdyną su nejudriu tvirtinimu viename vamzdinio šilumokaičio gale, o kitame gale vamzdyno plokštė tvirtinama laisvai, kartu su vidiniu sistemos

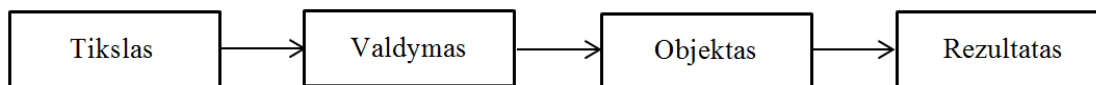
dangčiu (1.2 pav. 6). Pabrangimas dėl nežymiai padidėjusio įrenginio diametro ir papildomai antro dugno atsiperka dėl eksploatacijos paprastumo ir patikimumo. Šie įrenginiai vadinami „su plaukiojančia galva“. Vamzdinis šilumokaitis su skersine srove (1.2 pav. 10) išsiskiria dėl gero šilumos perdavimo koeficiento išorinėje vamzdyno dalyje, nes šilumos nešėjas juda skersai vamzdyno.

2. ADAPTYVI VALDYMO SISTEMA

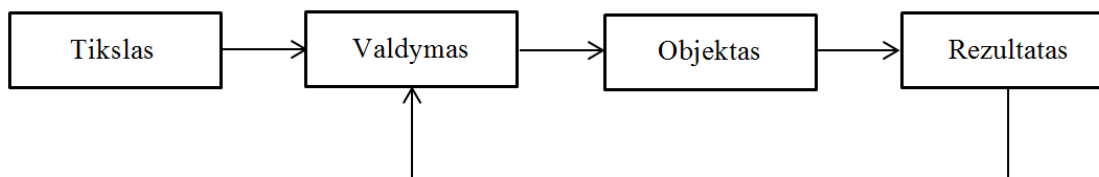
2.1 Adaptacijos samprata

Siekiant suprasti adaptacijos terminą valdymo teorijoje, būtina suprasti valdymo sistemų tipus. Valdymo procesų modeliavime išskiriami trys sistemos tipai[5]:

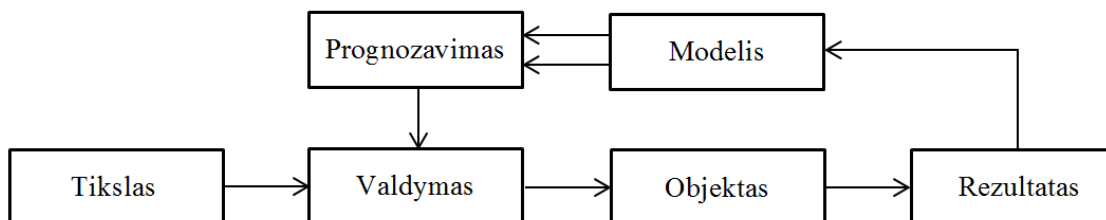
1. Atvira (2.1 pav.);
2. Uždara (su grįžtamoju ryšiu) (2.2 pav.);
3. Adaptyvi (2.3 pav.).



2.1 pav. Atvira valdymo sistema



2.2 pav. Uždara valdymo sistema



2.3 pav. Adaptyvi valdymo sistema

Pirmo tipo valdymo sistemoje iškeliamas tikslas ir naudojamas poveikis objektui, kad būtų pasiektas numatytasis rezultatas. Atviro valdymo struktūra labai paprasta, nes grįžtamojo ryšio nebuvimas supaprastina sistemą. Jeigu negaunamas norimas rezultatas – atliekama analizė, kuri paaiškina nukrypimus, bet neturi tikslo, ką nors pakeisti sistemos valdyme.

Uždaras valdymas (valdymas su grįžtamu ryšiu), kuriame galimas valdymo pakeitimas priklausomai nuo galutinio tikslo. Ši metodika pritaikoma tik nedideliems laiko tarpams. Jeigu valdymo pasėkmės pasireiškia po kur kas ilgesnio laiko intervalo, tuomet toks valdymas darosi neefektyvus.

Adaptyvus valdymas skiriasi nuo uždaro valdymo tuo, kad jame yra valdomo objekto modelis, kuriame analizuojamos valdymo pasėkmės (atliekama prognozė). Tikslus reagavimas galimas tik

esant maksimaliai tiksliam valdomo objekto modeliui, adekvačiai atspindinčiam funkcionavimo aplinką ir patį valdomą objektą.

Su adaptacijos terminu susijęs adaptacinis valdymas, adaptyvios sistemos ir adaptyvaus modelio supratimas. Adaptacija – tai sistemos parametrų struktūros pasikeitimai, o galimai ir valdymo poveikio pasikeitimai, paremti einamo momento informacija, kad pasiektų optimalią numatytą sistemos būseną. Adaptyvia valdymo sistema vadinama tokia sistema, kuri geba prisitaikyti prie vidinių ir išorinių sąlygų pasikeitimų. Adaptyvi sistema geba išlaikyti darbingumą esant nenumatytiems valdomo objekto būsenos pasikeitimams: pasikeitus valdymo tikslams arba aplinkos poveikiui dėl savo funkcionuojančių algoritmų pakeitimo, programos elgesio arba optimalių sprendinių paieškos. Samprata valdymas su adaptacija – tai sistemos valdymas su nepilna išankstine informacija apie valdomą procesą, kuriame informacija kaupiama ir pritaikoma sistemos darbo kokybei gerinti. Adaptyvios sistemos valdymo modeliu vadinamas toks modelis, kuris pasikeitus išorinėms ir vidinėms sistemos charakteristikoms keičia regulatoriaus struktūros ir parametrų valdymą taip, kad būtų užtikrintas objekto funkcionavimas numatytų parametrų ribose.

2.2 Adaptacijos metodai

Išskiriami trys pagrindiniai adaptacijos metodai: automatinis derinimas (reguliavimas), stiprinimo numatymas, adaptyvusis valdymas.

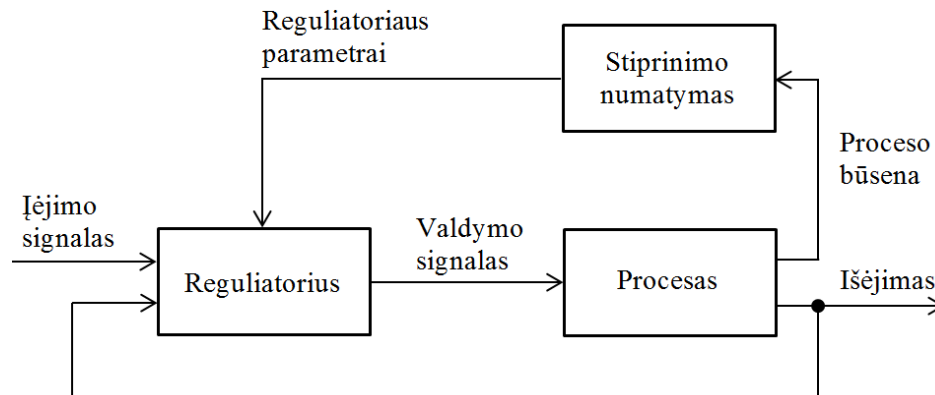
Automatinis derinimas. Visos automatinio derinimo rūšys praeina tris etapus:

1. Identifikaciją;
2. Regulatoriaus parametrų nustatymą;
3. Galutinį reguliavimą.

Dažnai trečias etapas pratęsiamas ir parametrai optimizuojami. Optimizuoti reguliatorių būtina, nes jo parametrų apskaičiavimas pagal formules yra supaprastintas, dėl to neįtraukiami „nežinomi“ parametrai, o objekto parametrų identifikacija atliekama su paklaidomis. Regulatoriaus papildomas reguliavimas gali būti be objekto identifikacijos, tik atrandant optimalius parametrus ir su identifikuojamu objektu. Paieškinė identifikacija remiasi tam tikromis taisyklėmis arba algoritmais, ieškant minimumo kriterinių funkcijų. Labiausiai paplitęs optimalių parametrų paieškos būdas yra gradientinis metodas. Pagal regulatoriaus parametrus randamos funkcijos, kurios ir yra gradiento vektorius. Parametrai keičiami priklausomai nuo gradiento vektoriaus krypties. Šio metodo problema yra ta, kad net vykdant parametrų optimizavimą reguliavimas gali neduoti reikiamos kokybės dėl priežasčių, nesusijusių su valdymo algoritmais (blogas projektavimas, netinkami

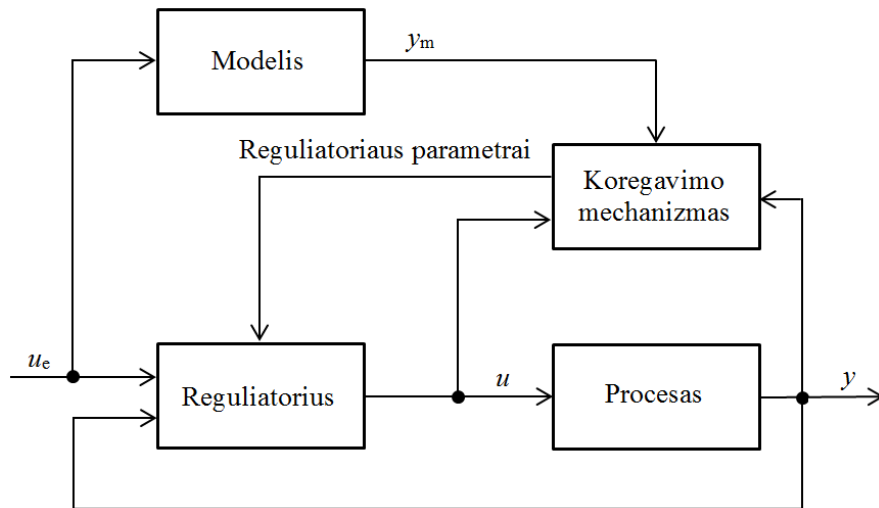
davikliai, netinkamas jų išdėstymas, blogi kontaktai ir t.t.). Todėl realizuojant automatinę derinimą reikia įsitikinti, kad pašalinių problemų nebus.

Stiprinimo numatymas [7]. Šis metodas taikomas tiek tiesiniams, tiek ir netiesiniams bei nestacionariems procesams priklausomai nuo poreikio keisti parametrus pasikeitus objekto darbo sąlygoms. 2.4 paveiksle pavaizduota stiprinimo numatymo blokinė schema. Stiprinimo numatymo principas labai paprastas. Žinant iš anksto galimus sistemos darbo režimo pasikeitimus, atliekama objekto identifikacija keletui skirtingų darbo režimų ir kiekvienam iš jų nustatomi regulatoriaus parametrai. Stiprinimo numatymo sistema traktuojama kaip sistema su dviem reguliavimo kontūrais. Kontūras, formuojantis adaptaciją, yra atviras, todėl stiprinimo numatymui būdinga greita veikla, be to, šis metodas pasižymi tuo, kad jame nebūna klaidų ir adaptacijos algoritmų neatitikimų. Stiprinimo numatymą naudoti tikslinga tais atvejais, kada iš anksto yra žinomi destabilizavimo faktoriai ir dydžiai, kuriuos galima išmatuoti.



2.4 pav. Stiprinimo numatymo principinė schema

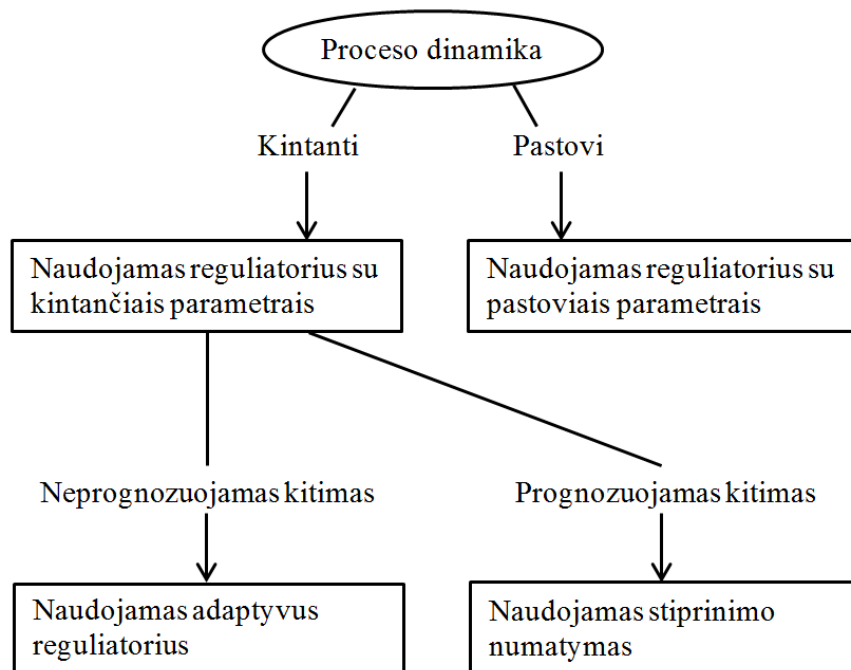
Adaptyvusis valdymas. Remiantis [6] šaltiniu tai toks valdymas, kuriame parametrai derinami nepertraukiamai, prisitaikant prie pakitusių proceso dinamikos ir trikdančių poveikių sąlygų. Regulatorius derinamas netiesiogiai arba tiesiogiai, realiu laiku įvertinamais parametrais. Netiesioginio derinimo metu naudojamas objekto etaloninis modelis (2.5 pav.). Tiesioginio regulatoriaus derinimo principas yra požymių, kurie apibūdina uždaros sistemos savybes ir regulatoriaus parametrų keitimo būdus, radimas.



2.5 pav. Etaloninio modelio adaptyvios valdymo sistemos principinė schema

2.3 Adaptacijos metodo parinkimas

2.6 paveiksle pavaizduota adaptacijos metodo parinkimo schema. Schema sukurta remiantis [6] šaltiniu. Šilumokaičio dinamika yra kintanti, tačiau yra žinomi ir prognozuojami darbo režimo pasikeitimai, todėl šilumokaičio temperatūros adaptyvios valdymo sistemos tyrime bus naudojamas stiprinimo numatymas.



2.6 pav. Adaptacijos metodo parinkimo schema

2.4 Adaptyvios valdymo sistemos projektavimo etapai

Adaptyvios valdymo sistemos projektavimas skirstomas į keturis etapus [6]:

1. Išskirti uždaros sistemos parametrus, kurie lemia sistemos savybes;
2. Sukurti parametrų koregavimo mechanizmą;
3. Apibrėžti tinkamas reguliatoriaus taisykles;
4. Realizuoti reguliatorių.

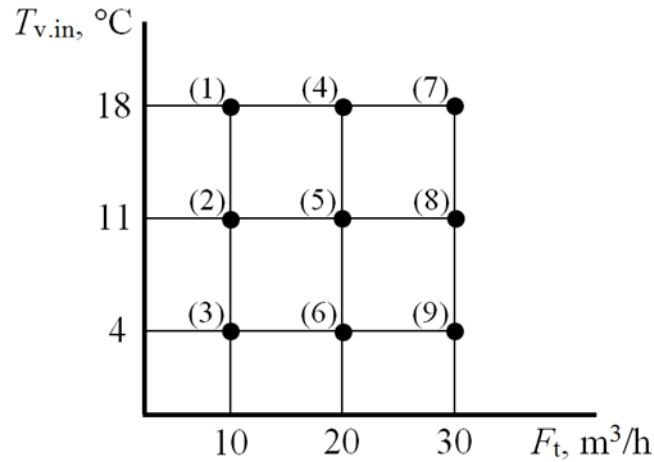
3. PID REGULIATORIAUS SU STIPRINIMO NUMATYMU PROJEKTAVIMAS

3.1 Eksperimentinių tyrimų plano sudarymas

Pagal technologines objekto charakteristikas sudaromas eksperimentinių tyrimų planas. Tyrės aušinimo procese tyrės temperatūra šilumokaičio išėjime priklauso nuo dviejų objekto darbo metu kintančių parametru, t. y. vandens temperatūros šilumokaičio įėjime ir tyrės tūrinio srauto per šilumokaitį. Aušinamos tyrės srautas kinta nuo $10 \text{ (m}^3/\text{h)}$ iki $30 \text{ (m}^3/\text{h)}$, o aušinančio vandens temperatūra nuo $4 \text{ (}^\circ\text{C)}$ iki $18 \text{ (}^\circ\text{C)}$. Keičiant F_t žingsniu $10 \text{ (m}^3/\text{h)}$, o $T_{v,in}$ žingsniu $7 \text{ (}^\circ\text{C)}$, sudaromas eksperimentinių tyrimų planas, atsižvelgiant į šaltinyje [8] aprašytus metodus.. Planas pavaizduotas 3.1 paveiksle. Objekto konstantų ir parametru nominalios vertės pateiktos 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Konstantų ir parametru nominalios vertės

Žymėjimas	Paaiškinimas	Vertė	Matavimo vienetai
hS	Šilumos pernešimo per S paviršių koeficientas	$42 \cdot 10^7$	$J/h \cdot ^\circ\text{C}$
ρ_t, ρ_v	Tyrės ir vandens tankiai	1000	kg/m^3
c_t, c_v	Tyrės ir vandens specifinės šilumos	4200	$J/h \cdot ^\circ\text{C}$
V_t	Tyrės tūris šilumokaityje	1,5	m^3
V_v	Vandens tūris šilumokaityje	20	m^3
$T_{t,in}$	Tyrės temperatūra šilumokaičio įėjime	50	$^\circ\text{C}$
$T_{v,in}$	Vandens temperatūra šilumokaičio įėjime	8	$^\circ\text{C}$
T_t	Tyrės temperatūra šilumokaičio išėjime	25	$^\circ\text{C}$
T_v	Vandens temperatūra šilumokaičio išėjime	20	$^\circ\text{C}$
F_t	Tyrės tūrinis srautas per šilumokaitį	20	m^3/h
F_v	Vandens tūrinis srautas per šilumokaitį	20	m^3/h



3.1 pav. Eksperimentinių tyrimų planas

3.2 Aušinančio vandens srauto nustatymas

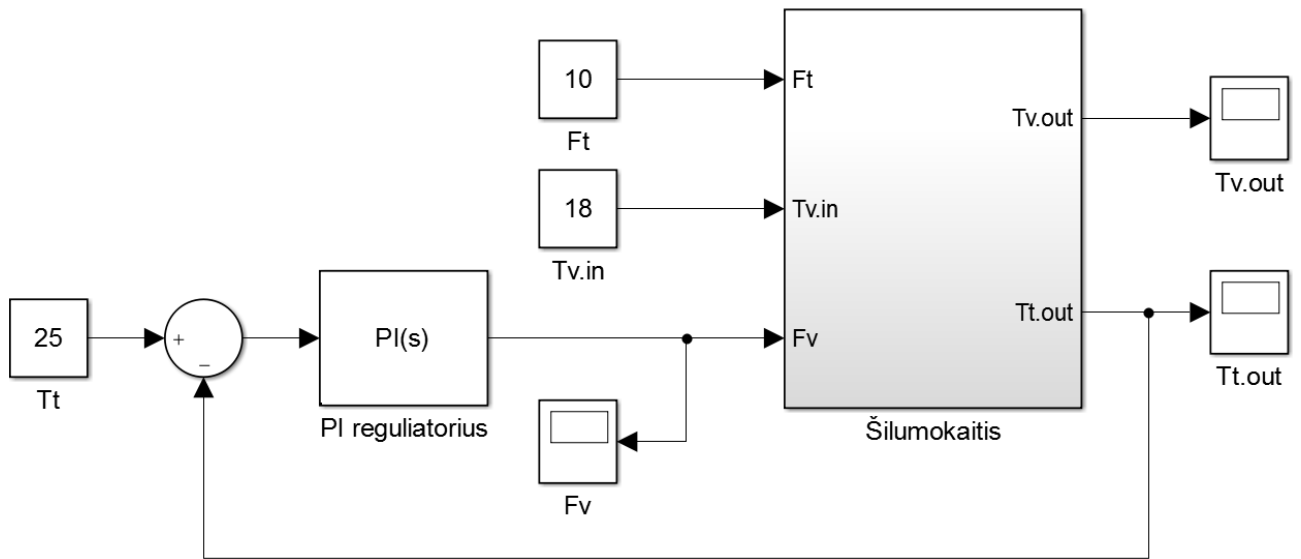
Galimi šilumokaičio darbo režimai pavaizduoti eksperimentinių tyrimų plane (3.1 pav.). Siekiant atlikti proceso identifikaciją, pirmiausia nustatomas aušinančio vandens srautas, kuris kiekviename eksperimentinių tyrimų plano taške yra skirtingas, nes keičiantis parametrams reikalingas vis kitoks aušinančio vandens srautas tam, kad būtų palaikoma pastovi tyrės temperatūra šilumokaičio išėjime. Vandens srauto nustatymui naudojamas *MATLAB* paketo *SimuLink* aplinkoje sukurtas modelis, kuris pateiktas 3.2 paveiksle. Šilumokaitis *SimuLink* aplinkoje realizuojamas diferencialinėmis lygtimis (1 ir 2) [9], *Differential Equation Editor* bloke.

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_t \cdot c_t \cdot V_t \cdot \frac{dT_t}{dt} = \rho_t \cdot c_t \cdot F_t (T_{t,in} - T_t) - hS(T_t - T_v), \\ \rho_v \cdot c_v \cdot V_v \cdot \frac{dT_v}{dt} = \rho_v \cdot c_v \cdot F_v (T_{v,in} - T_v) + hS(T_t - T_v). \end{array} \right. \quad (1)$$

Pertvarkius (1) ir (2) lygtis, į išraiškas, tinkančias realizavimui *Differential Equation Editor* bloke, gaunamos tolesnės lygtys:

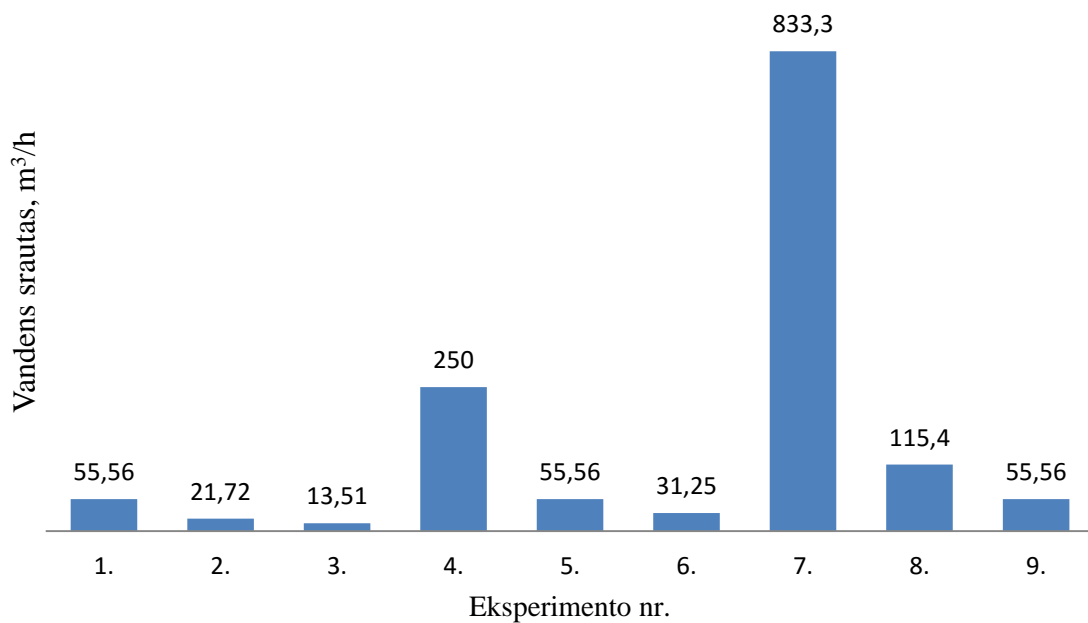
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dT_t}{dt} = \frac{F_t}{V_t} (T_{t,in} - T_t) - \frac{hS}{\rho_t \cdot c_t \cdot V_t} (T_t - T_v), \\ \frac{dT_v}{dt} = \frac{F_v}{V_v} (T_{v,in} - T_v) + \frac{hS}{\rho_v \cdot c_v \cdot V_v} (T_t - T_v). \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dT_t}{dt} = \frac{F_t}{V_t} (T_{t,in} - T_t) - \frac{hS}{\rho_t \cdot c_t \cdot V_t} (T_t - T_v), \\ \frac{dT_v}{dt} = \frac{F_v}{V_v} (T_{v,in} - T_v) + \frac{hS}{\rho_v \cdot c_v \cdot V_v} (T_t - T_v). \end{array} \right. \quad (4)$$



3.2 pav. Modelis, aušinančio vandens srauto nustatymui

Gauti rezultatai pateikti 3.3 paveiksle.



3.3 pav. Vandens srauto vertės eksperimentinių tyrimų plano taškuose

3.3 Pirmos eilės perdavimo funkcijos su vėlavimu parametru nustatymas

Parametru nustatymas atliekamas pagal [10] šaltinyje aprašytą metodą. Kiekviename eksperimentų plano taške nustatomi proceso pirmos eilės su vėlavimu perdavimo funkcijos parametrai: stiprinimo koeficientas K_{pr} , atstojamoji laiko pastovioji T_{pr} , atstojamoji vėlavimo trukmė τ_{pr} . Tam tikslui atliekami šuolinės reakcijos eksperimentai. Atliekant eksperimentus, šuoliškai keičiamas aušinančio vandens srautas. Vykdamt šuolinius eksperimentus, pagrindine problema yra

šulio amplitudės parinkimas, nes parenkant didesnę šulį lengviau identifikuoti proceso parametrus, bet labai dažnai didelis šulis iškreipia proceso dinamiką. Darbe priimta, kad optimali šulio amplitudė yra 5% nuo nominalios vandens srauto vertės kiekviename plano taške. Šulio dydis eksperimentų plano taškuose apskaičiuojams pagal 5 formulę.

$$\Delta F_{v,i} = \frac{F_v \cdot 5\%}{100\%}, \quad (5)$$

čia, $i = 1, 2, \dots, 9$.

Pirmo eksperimentinių tyrimų plano taško šulio amplitudės dydis:

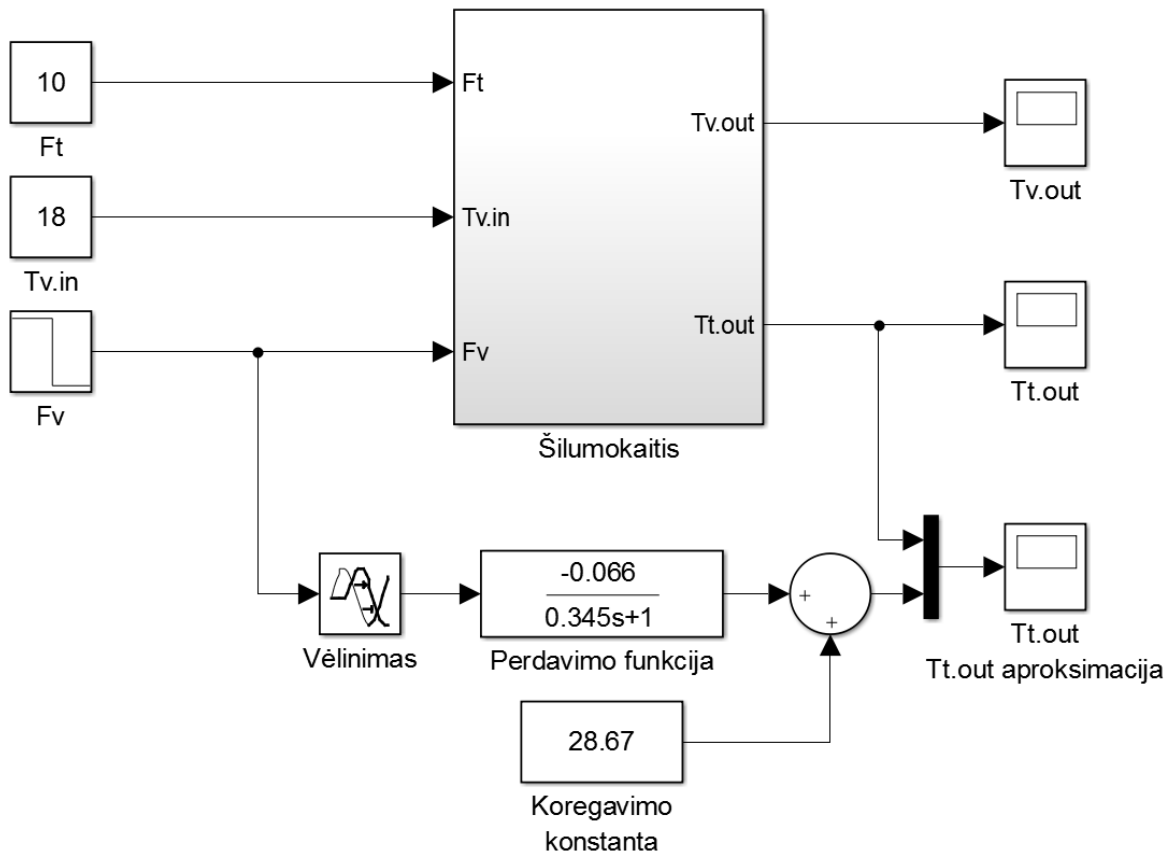
$$\Delta F_{v,1} = \frac{55,56 \cdot 5}{100} = 2,778 \text{ (m}^3/\text{h)}.$$

Kitų plano taškų šulio amplitudės vertės pateiktos 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. Šulio amplitudės vertės eksperimentinių tyrimų plano taškuose

Plano taškas	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Šulio amplitudės vertės, (m ³ /h)	2,778	1,086	0,676	12,500	2,778	1,563	41,665	5,770	2,778

Kadangi proceso dinamika yra netiesinė, plano taškuose atliekama po du eksperimentus: pirmas, kai šulinės funkcijos pokytis yra teigiamas, antras, kai neigiamas. Šulinės reakcijos eksperimentams atlikti naudojamas *MATLAB* paketo *SimuLink* aplinkoje sukurtas modelis, pateiktas 3.4 paveiksle. Pavaizduotas modelis skirtas ir pirmos eilės su vėlavimu perdavimo funkcijos nustatytų parametrų korektiškumui patikrinti.



3.4 pav. Modelis, perdavimo funkcijos parametrus nustatyti ir patikrinti

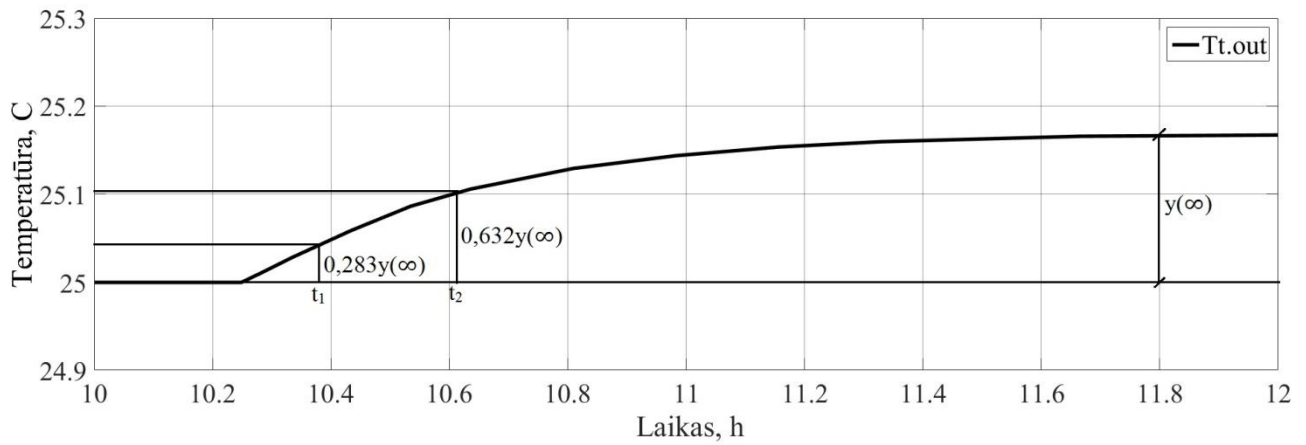
Pirmos eilės su vėlavimu modelio parametrų nustatymas iš šuolinės reakcijos kreivės atliekamas C. L. Smith metodu. Stiprinimo koeficientas apskaičiuojamas pagal 6 išraišką, atstojamoji laiko pastovioji pagal 7, o atstojamoji vėlavimo trukmė pagal 8 [10]:

$$K_{pr} = \frac{y(\infty)}{\Delta u}, \quad (6)$$

$$T_{pr} = \frac{3}{2}(t_2 - t_1), \quad (7)$$

$$\tau_{pr} = t_2 - T_{pr}. \quad (8)$$

čia: $y(\infty)$ – nusistovėjusi vertė, Δu – šuolio amplitudė, t_1, t_2 – laikai, nustatomi iš grafiko (3.5 pav.)



3.5 pav. Parametrų nustatymas iš šuolinės reakcijos kreivės pirmame tyrimų plano taške, kai $\Delta u = -2,778$

Apskaičiuojami pirmos eilės su vėlavimu perdavimo funkcijos parametrai pirmame tyrimų plano taške, kai $\Delta u = -2,778$:

$$K_{pr} = \frac{0,1834}{-2,778} = -0,0660.$$

$$T_{pr} = \frac{3}{2}(0,605 - 0,375) = 0,345.$$

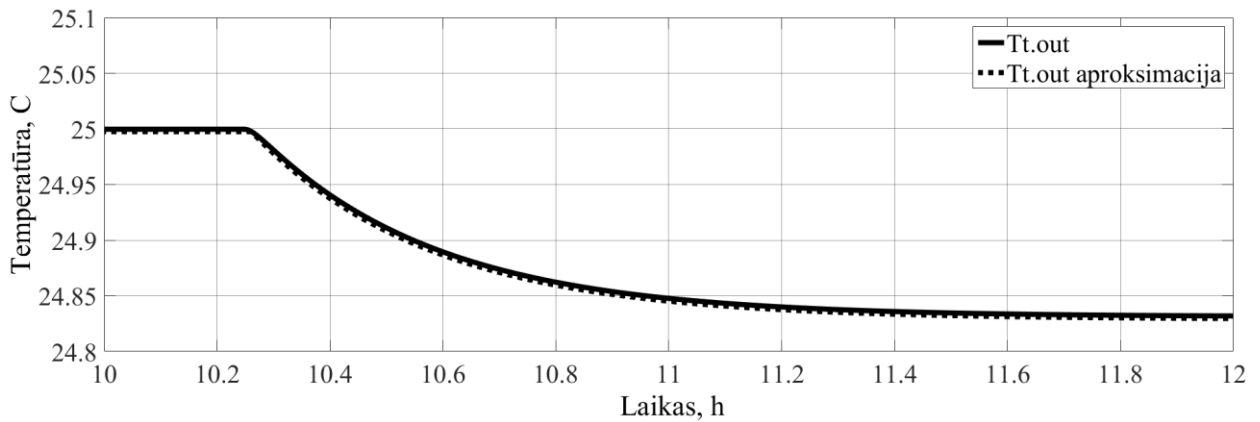
$$\tau_{pr} = 0,605 - 0,345 = 0,26.$$

Lentelėje 3.3 pateikiamos visų plano taškų perdavimo funkcijos parametru vertės.

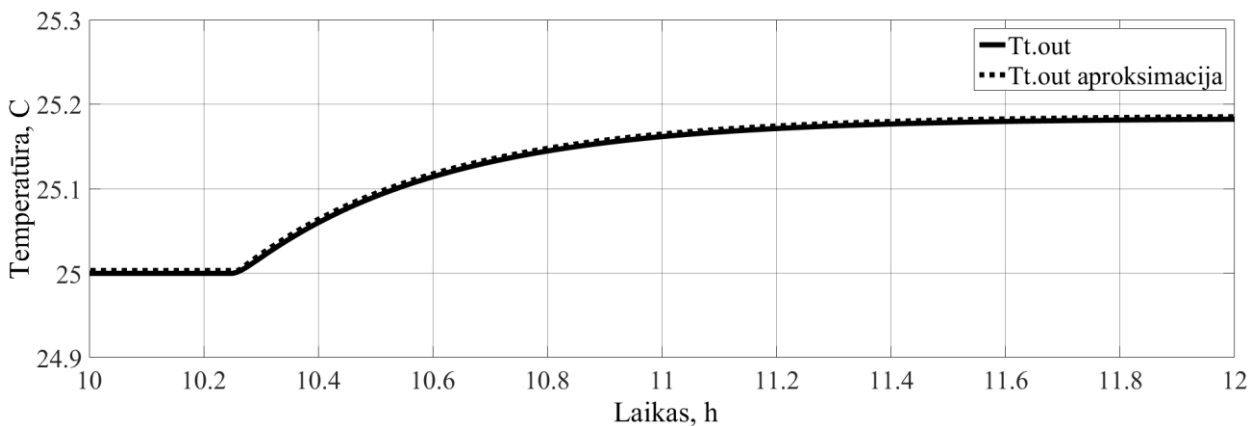
3.3 lentelė. Pirmos eilės su vėlavimu perdavimo funkcijos parametų vertės atitinkamuose tyrimo plano taškuose

Plano taškas	Vandens srauto pokytis, m ³ /h	Perdavimo funkcijos parametų vertės					
		$-K_{pr}$	$-K_{pr.vid}$	T_{pr}	$T_{pr.vid}$	τ_{pr}	$\tau_{pr.vid}$
1.	+2,778	0,0607	0,0634	0,3150	0,3300	0,2650	0,2625
	-2,778	0,0660		0,3450		0,2600	
2.	+1,086	0,3280	0,3400	0,6900	0,6975	0,2700	0,2575
	-1,086	0,3519		0,7050		0,2450	
3.	+0,676	0,7233	0,7449	0,9300	0,9450	0,2600	0,2600
	-0,676	0,7664		0,9600		0,2600	
4.	+12.500	0,0059	0,0063	0,0750	0,0825	0,2650	0,2625
	-12.500	0,0066		0,0900		0,2600	
5.	+2,778	0,1000	0,1040	0,2850	0,2963	0,2550	0,2588
	-2,778	0,1080		0,3075		0,2625	
6.	+1,563	0,2695	0,2786	0,4275	0,4425	0,2625	0,2625
	-1,563	0,2876		0,4575		0,2625	
7.	+41.665	0,0007	0,0007	0,0375	0,0360	0,2525	0,2555
	-41.665	0,0007		0,0345		0,2585	
8.	+5,770	0,0346	0,0362	0,1440	0,1523	0,2620	0,2623
	-5,770	0,0377		0,1605		0,2625	
9.	+2,778	0,1275	0,1322	0,2595	0,2685	0,2585	0,2605
	-2,778	0,1369		0,2775		0,2625	

Patikrinama, ar perdavimo funkcijos parametrai nustatyti tiksliai. Tam naudojamas 3.4 paveiksle pavaizduotas modelis. 3.6 ir 3.7 paveiksluose pavaizduotos pirmo plano taško tyrės temperatūros šilumokaičio ir tyrės temperatūros aproksimacijos reakcijos į teigiamą ir į neigiamą šuolinį vandens srauto pokytį.



3.6 pav. Tyrės temperatūros šilumokaičio ir jos aproksimacijos reakcijos į teigiamą šuolinį vandens pokytį palyginimas



3.7 pav. Tyrės temperatūros šilumokaičio ir jos aproksimacijos reakcijos į neigiamą šuolinį vandens pokytį palyginimas

Kaip matyti 3.6 – 3.7 paveiksluose, tyrės temperatūros reakcijos į šuolinį vandens srauto pokytį identiškos, vadinasi, parametrai nustatyti tiksliai. Analogiškai patikrinami ir kiti plano taškai.

3.4 Antros eilės polinomo modelio koeficientų nustatymas

Skaičiavimų supaprastinimui įvedami normuoti kintamieji:

$$x_1 = \frac{F_t - 20}{10}; \quad (9)$$

$$x_2 = \frac{T_{v.in} - 11}{7}; \quad (10)$$

Normuotojų kintamųjų kitimo diapazonas: $-1 \leq x_1, x_2 \leq 1$.

Procesui modeliuoti pasirinktas antros eilės polinomas [8]:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1^2 + a_4x_2^2 + a_5x_1x_2; \quad (11)$$

Ortogonalus kompozicinis eksperimentų planas pateiktas 3.3 lentelėje.

3.4 lentelė. Kompozicinis planas antros eilės polinominiam modeliui

Eksp. Nr.	Eksperimentų plano matrica		Eksperimentinės perdavimo funkcijos parametrų vertės		
	F_t	$T_{v.in}$	$-K_{pr.vid}$	$T_{pr.vid}$	$\tau_{pr.vid}$
1.	-1	+1	0,0634	0,3300	0,2625
2.	-1	0	0,3400	0,6975	0,2575
3.	-1	-1	0,7449	0,9450	0,2600
4.	0	+1	0,0063	0,0825	0,2625
5.	0	0	0,1040	0,2963	0,2588
6.	0	-1	0,2786	0,4425	0,2625
7.	+1	+1	0,0007	0,0360	0,2555
8.	+1	0	0,0362	0,1523	0,2623
9.	+1	-1	0,1322	0,2685	0,2605

Polinominio modelio koeficientai apskaičiuojami mažiausių kvadratų metodu, kurio matricinė forma pavaizduota 11 formulėje [11]:

$$\mathbf{A} = (\mathbf{F}^T \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{Y}; \quad (11)$$

čia \mathbf{Y} – stebėjimų matrica, \mathbf{F} – nepriklausomų kintamųjų matrica, \mathbf{A} – polinomo koeficientų matrica.

Identifikuojamas stiprinimo koeficiento polinominis modelis.

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} 0,0634 \\ 0,3400 \\ 0,7449 \\ 0,0063 \\ 0,1040 \\ 0,2786 \\ 0,0007 \\ 0,0362 \\ 0,1322 \end{bmatrix}, \mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

Tuomet antros eilės polinominio modelio koeficientai yra lygūs:

$$A = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{bmatrix} = (F^T F)^{-1} F^T Y = \begin{bmatrix} 0,1001 \\ -0,1632 \\ -0,1809 \\ 0,0899 \\ 0,0443 \\ 0,1375 \end{bmatrix}$$

Taigi identifikuotas stiprinimo koeficiento modelis atrodo taip:

$$y_{K_{pr}} = 0,1001 - 0,1632 \cdot F_t - 0,1809 \cdot T_{v.in} + 0,0899 \cdot F_t^2 + 0,0443 \cdot T_{v.in}^2 + 0,1375 \cdot F_t \cdot T_{v.in}.$$

Remiantis identifikuotu antros eilės polinominiu modeliu stiprinimo koeficientui, apskaičiuojamos stiprinimo koeficiento vertės eksperimentinių tyrimų plano taškuose ir gauti rezultatai palyginami su eksperimentiniais duomenimis. Rezultatai pateikti 3.4 lentelėje.

3.5 lentelė. Stiprinimo koeficiento eksperimentiniai ir modeliavimo rezultatai

Eks. Nr.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
$-K_{pr.vid}$	0,0634	0,3400	0,7449	0,0063	0,1040	0,2786	0,0007	0,0362	0,1322
$-K_m$	0,0791	0,3532	0,7159	0,0365	0,1001	0,3253	0,0277	0,0268	0,1145

Iš 3.4 lentelėje pateiktų duomenų matyti, kad ketvirto ir septinto eksperimento eksperimentinis ir modeliavimo metu gautas stiprinimo koeficientas ženkliai skiriasi, todėl atliekama pakartotinė antros eilės polinominio modelio koeficientų identifikacija. Pakartotinė identifikacija atliekama ne pilnam kompoziciniam planui, bet atitinkamiems taškams, kuriuose $K_{pr.vid} < 0,14$. Tuomet identifikuojamas toks modelis:

$$y_{K_{pr} < 0,14} = 0,104 - 0,0935 \cdot F_t - 0,1279 \cdot T_{v.in} + 0,0257 \cdot F_t^2 + 0,03 \cdot T_{v.in}^2 + 0,0622 \cdot F_t \cdot T_{v.in}.$$

Tuo pačiu principu identifikuojami ir atstojamosios laiko pastoviosios bei atstojamosios vėlavimo trukmės polinominio modelio koeficientai. Rezultatai pateikti 3.5 lentelėje.

3.6 lentelė. Antros eilės polinominio modelio koeficientai

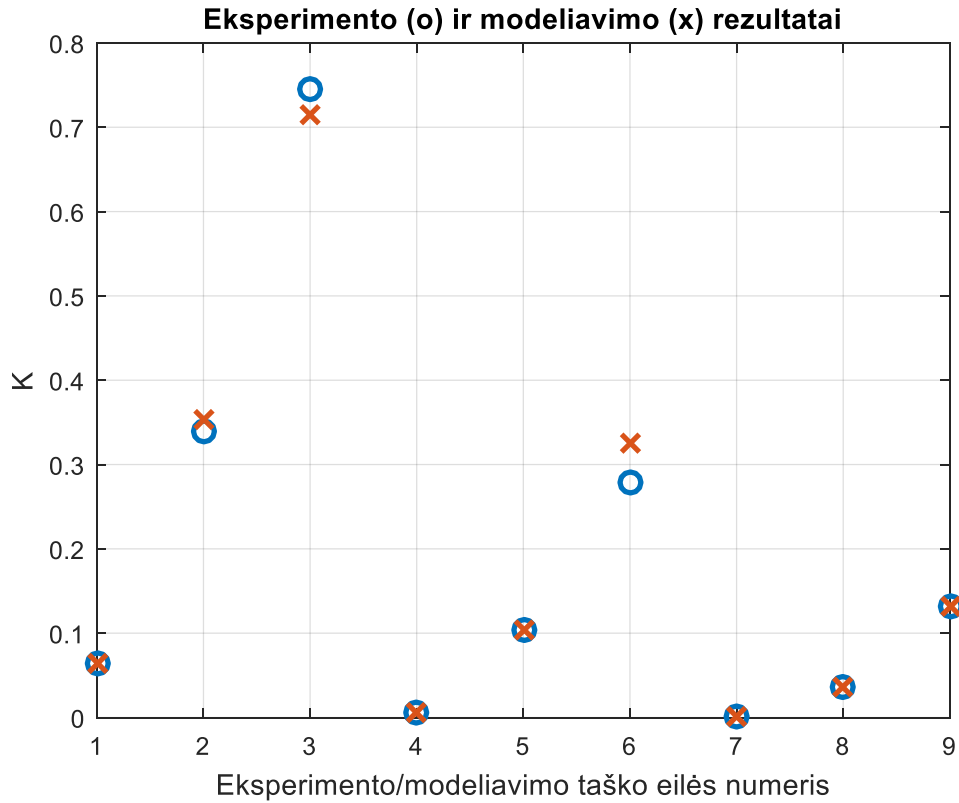
Polinomo koeficientas	Polinomo koeficientų vertės				
	$K_{pr.vid} > 0,14$	$K_{pr.vid} < 0,14$	$T_{pr.vid} > 0,34$	$T_{pr.vid} < 0,34$	τ
	K		T		
a_0	0,1001	0,1040	0,2781	0,2963	0,2603
a_1	-0,1632	-0,0935	-0,2526	-0,2445	-0,0007
a_2	-0,1809	-0,1279	-0,2136	-0,2137	0
a_3	0,0899	0,0257	0,1559	0,1005	-0,0011
a_4	0,0443	0,0302	-0,0437	-0,0001	0,0015
a_5	0,1375	0,0622	0,0956	0,0975	-0,0025

Remiantis identifikuotais polinomo modeliais, apskaičiuojamos stiprinimo koeficiento atstojamosios laiko pastoviosios ir atstojamosios vėlavimo trukmės vertės kiekviename eksperimento plano taške. Gauti rezultatai palyginami su eksperimentiniais rezultatais. Eksperimentiniai ir modeliavimo rezultatai pateikti 3.6 lentelėje.

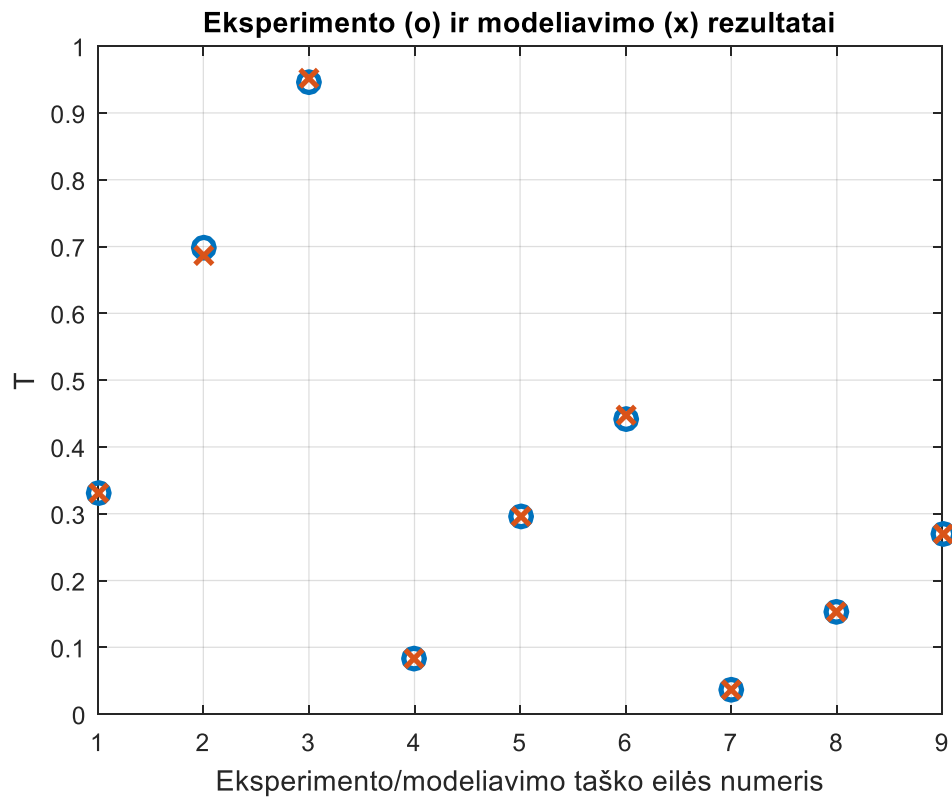
3.7 lentelė. Eksperimentiniai ir modeliavimo rezultatai

Eksp. Nr.	Eksperimentų ir modeliavimų rezultatai					
	$-K_{pr.vid}$	$-K_m$	$T_{pr.vid}$	T_m	$\tau_{pr.vid}$	τ_m
1.	0,0634	0,0634	0,3300	0,3300	0,2650	0,2639
2.	0,3400	0,3532	0,6975	0,6866	0,2575	0,2599
3.	0,7449	0,7159	0,9450	0,9521	0,2600	0,2589
4.	0,0063	0,0063	0,0825	0,0825	0,2625	0,2618
5.	0,1040	0,1040	0,2963	0,2963	0,2588	0,2603
6.	0,2786	0,3253	0,4425	0,4480	0,2625	0,2618
7.	0,0007	0,0007	0,0360	0,0360	0,2555	0,2575
8.	0,0362	0,0362	0,1523	0,1523	0,2623	0,2585
9.	0,1322	0,1322	0,2685	0,2685	0,2605	0,2625

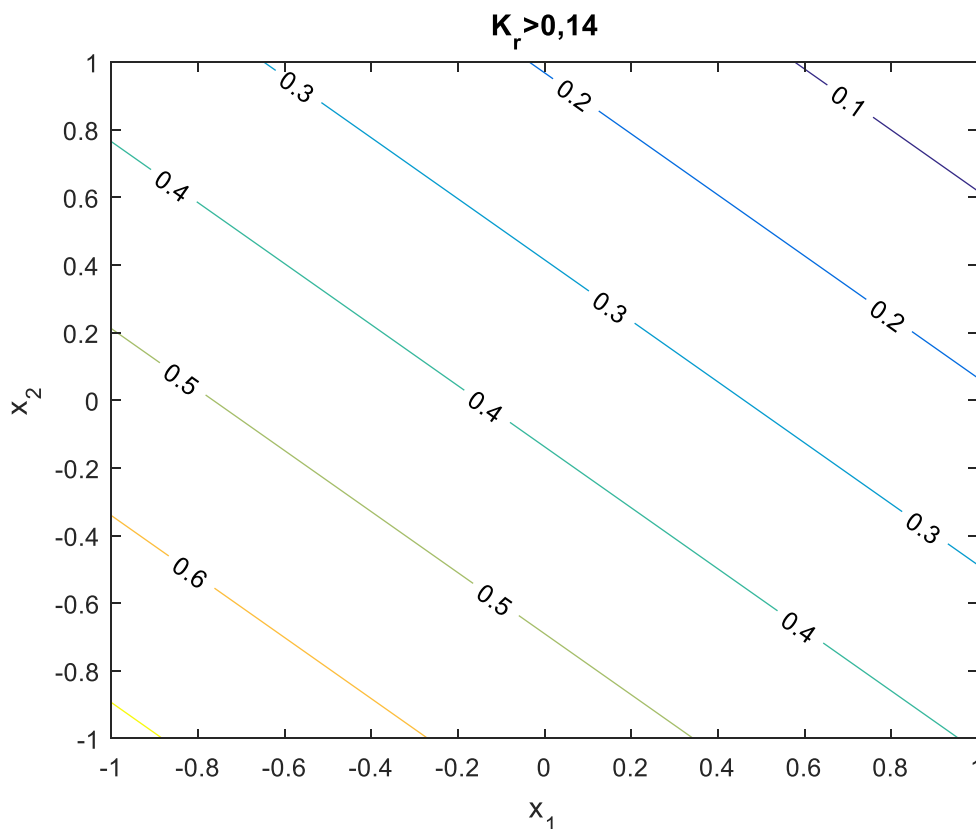
Eksperimentinių ir modeliavimo rezultatų palyginimai pateikti 3.8 ir 3.9 paveiksluose.



3.8 pav. Stiprinimo koeficiento eksperimentinių ir modeliavimo rezultatų palyginimas



3.9 pav. Atstojamosios laiko pastoviosios eksperimentinių ir modeliavimo rezultatų palyginimas



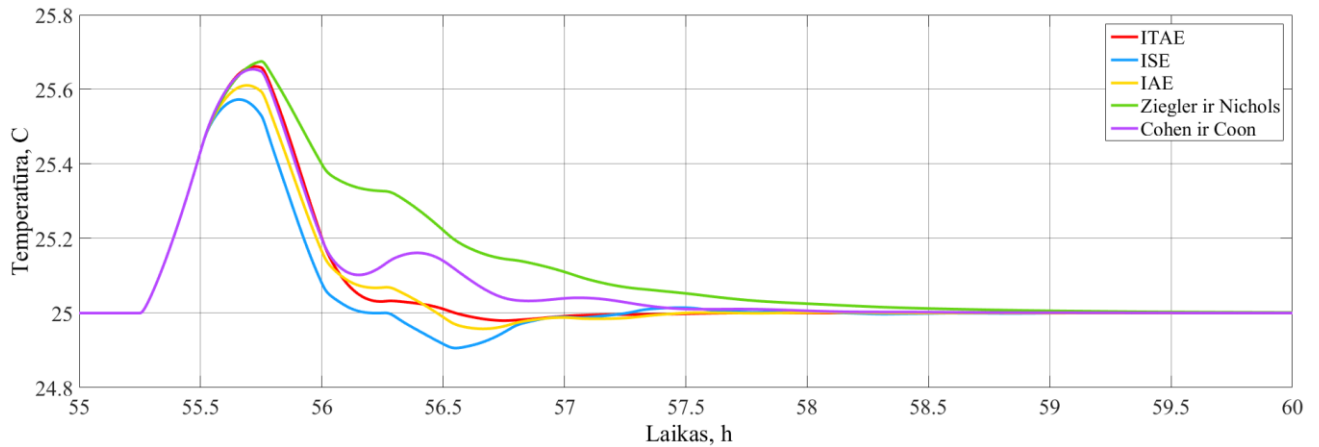
3.10 pav. Stiprinimo koeficiento reakcijos paviršius izolinijomis

Pagal [8] šaltinyje pateiktą informaciją, izolinijomis pavaizduojamas stiprinimo koeficiento reakcijos paviršius (3.10 pav.).

3.5 Regulatoriaus derinimas

Žinoma keliolika regulatoriaus derinimo taisyklių. Plačiai naudojami metodai paremti integravimo kriterijų optimizavimu (*ITAE*, *IAE*, *ISE*) bei valdomojo proceso savybėmis (*Ziegler* ir *Nichols* ir jo modifikacijos). Atliekamas tyrimas, kuriame nustatoma, pagal kurias derinimo taisykles suderintas regulatorius, tiriamame procese dirba efektyviausiai. 3.10 paveiksle pateikiamas šiomis derinimo taisyklėmis: *ITAE*, *IAE*, *ISE*, *Ziegler* ir *Nichols*, *Cohen* ir *Coon* suderintų regulatorių veiklos palyginimas. Mažiausia dinaminė nuokrypa gauta regulatorių suderinus pagal *ISE*, didžiausia pagal *Ziegler* ir *Nichols*. Trumpiausias proceso nusistovėjimo laikas gautas naudojant *ITAE* derinimo taisykles, o didžiausias *Ziegler* ir *Nichols*.

Regulatorius darbe bus derinamas pagal *IAE* derinimo taisykles, nes dinaminė nuokrypa palyginus su regulatoriu suderintu pagal *ISE* yra tik $\approx 7.5\%$ didesnė (antra mažiausia), o nusistovėjimo laikas, praktiškai vienodas, su regulatoriaus suderintu pagal *ITAE* derinimo taisykles laiku, tačiau ženkliai geresnis nei derinimo pagal *ISE* taisykles.



3.11 pav. Derinimo metodų palyginimas

Regulatorius derinamas pagal minimalią integruotą absoliučiąją paklaidą (*IAE*), trikdžio kompensavimui. PID regulatoriaus derinimo formulės pateiktos 12, 13, 14 išraiškose [14]:

$$K_r = \frac{1,435}{K_m} \cdot \left(\frac{T_m}{\tau_m}\right)^{0,921}, \quad (12)$$

$$T_i = \frac{T_m}{0,878} \cdot \left(\frac{\tau_m}{T_m}\right)^{0,749}, \quad (13)$$

$$T_d = 0,482 \cdot T_m \cdot \left(\frac{\tau_m}{T_m}\right)^{1,137}. \quad (14)$$

Pagal 12, 13, 14 formules apskaičiuojami regulatoriaus parametrai tyrimų plano taškuose. Apskaičiuojami regulatoriaus parametrai pirmame tyrimų plano taške:

$$K_{r1} = \frac{1,435}{-0,0634} \cdot \left(\frac{0,3300}{0,2639}\right)^{0,921} = -27,88.$$

$$T_{i1} = \frac{0,3300}{0,878} \cdot \left(\frac{0,2639}{0,3300}\right)^{0,749} = 0,319.$$

$$T_{d1} = 0,482 \cdot 0,3300 \cdot \left(\frac{0,2639}{0,3300}\right)^{1,137} = 0,124.$$

Regulatoriaus parametrų vertės visuose tyrimų plano taškuose pateiktos 3.7 lentelėje.

3.8 lentelė. Regulatoriaus parametrų vertės

Eksp. Nr.	$-K_r$	T_i	T_d
1.	27,88	0,319	0,124
2.	9,94	0,378	0,110
3.	6,65	0,409	0,104
4.	78,63	0,223	0,148
5.	15,55	0,306	0,123
6.	7,24	0,341	0,117
7.	334,80	0,179	0,163
8.	24,35	0,258	0,134
9.	11,08	0,301	0,126

MATLAB/SimuLink aplinkoje realizuotos derinimo taisyklės pateiktos ketvirtame priede.

3.6 Diskrečiojo PID regulatoriaus realizavimas

Diskrečiųjų reguliatorių algoritmai gaunami iš tolydinių algoritmų. Labai dažnai reguliavimo algoritmai išreiškiami valdančiojo poveikio pokyčiais (15) [13]:

$$u_n = u_{n-1} + \Delta u_n; \quad (15)$$

čia: u_n – valdantis poveikis, u_{n-1} – prieš tai buvęs valdantis poveikis, Δu_n – valdančio poveikio pokytis.

Valdančio poveikio pokytis randamas iš pateiktos (16) išraiškos [13]:

$$\Delta u_n = K_r \cdot \left[\left(1 + \frac{T_d}{T} + \frac{T}{T_i} \right) e_n - \left(1 + \frac{2T_d}{T} \right) e_{n-1} + \frac{T_d}{T} e_{n-2} \right]; \quad (16)$$

čia T yra diskretizavimo žingsnis.

Diskretizavimo žingsnis parenkamas pagal išraišką(17) [XX]:

$$T = T_{pr} \cdot 0,1; \quad (17)$$

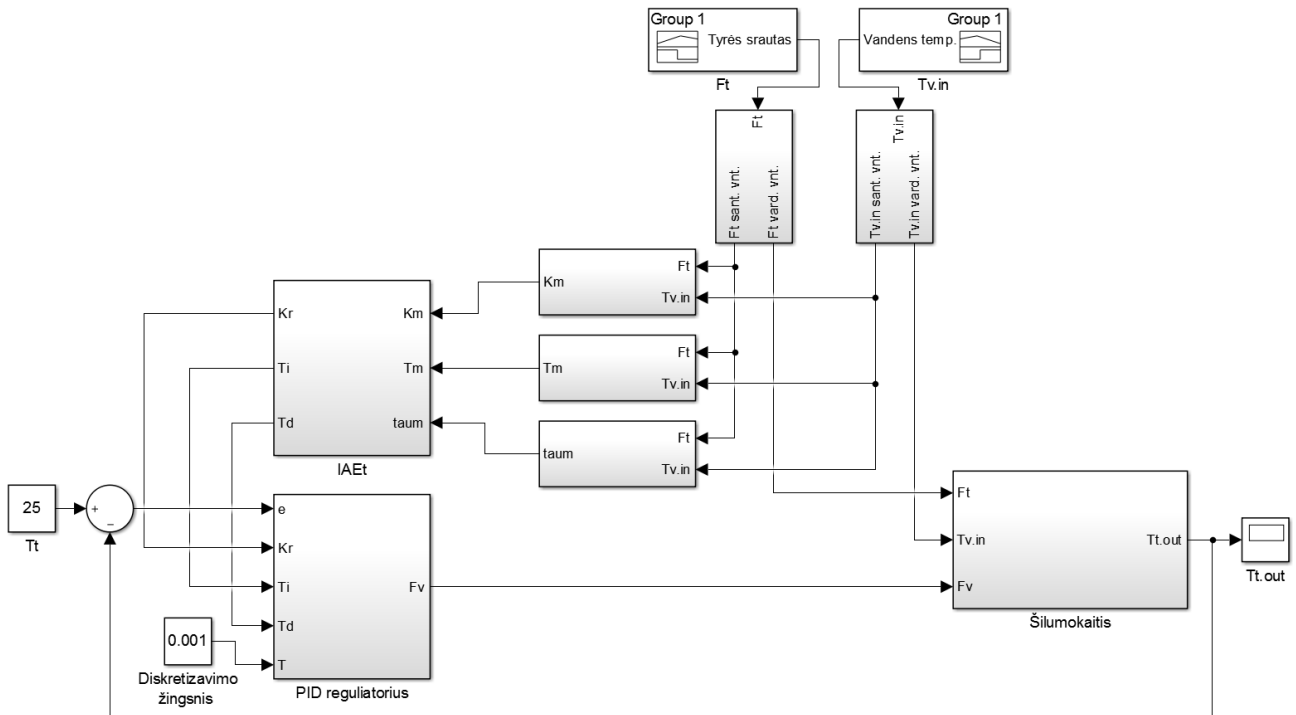
Tuomet diskretizavimo žingsnis:

$$T = 0,01 \cdot 0,1 = 0,001.$$

MATLAB/SimuLink aplinkoje realizuotas diskretinis PID reguliatorius pateiktas penktame priede.

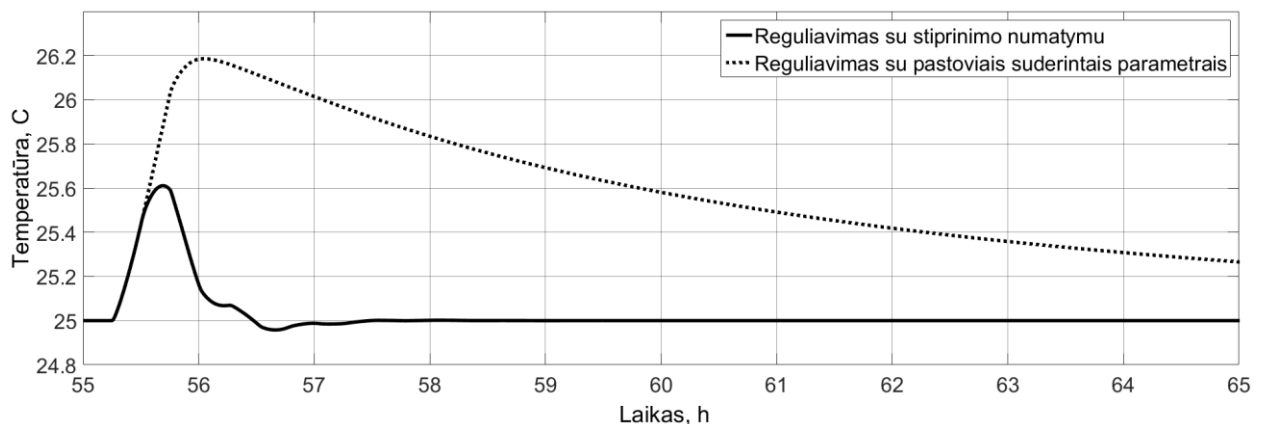
4. TYRIMŲ REZULTATAI

Šilumokaičio temperatūros adaptyvios valdymo sistemos modelis sukurtas *MATLAB/SimuLink* aplinkoje pavaizduotas 4.1 paveiksle.

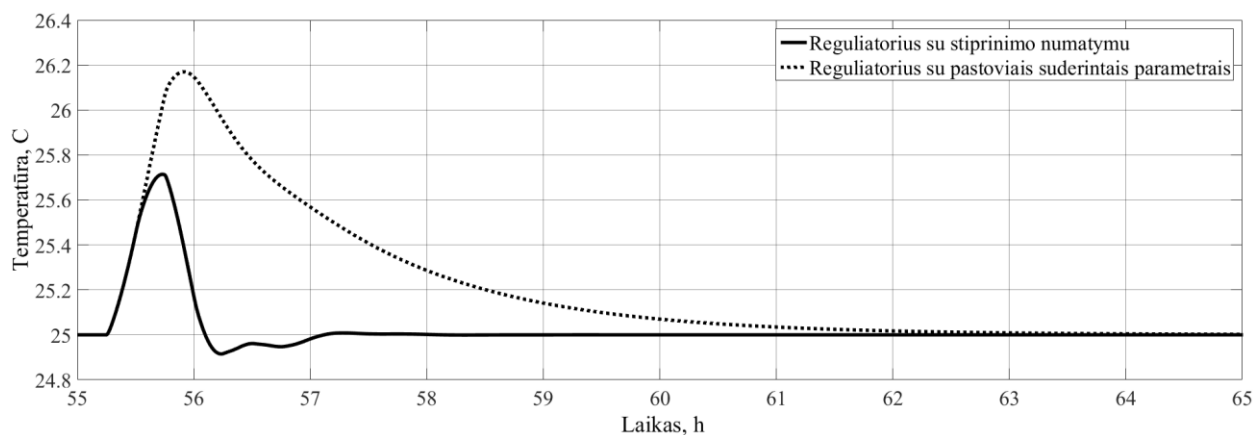


4.1 pav. Šilumokaičio temperatūros adaptyvios valdymo sistemos modelis

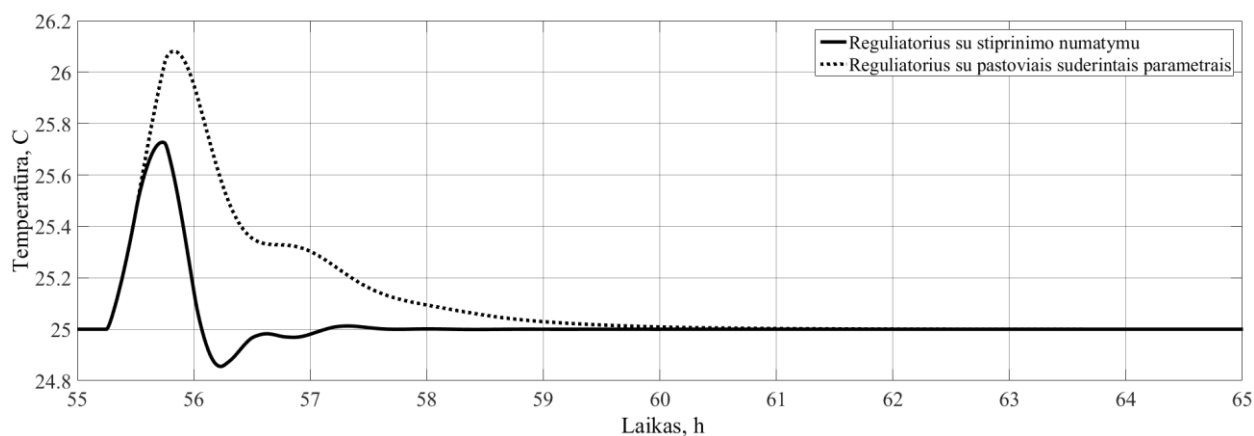
Siekiant nustatyti, ar reguliatorius su stiprinimo numatymu geriau valdo procesą nei reguliatorius su iš anksto suderintais parametrais, atliekama, keletas eksperimentų, tyrimų plano taškuose. Gautos kreivės pavaizduotos 4.2-4.8 paveiksluose. Iš gautų reakcijos kreivių nustatomi du pagrindiniai kokybės rodikliai: dinaminė nuokrypa ir nusistovėjimo laikas. Rezultai pateikiami 4.1 lentelėje.



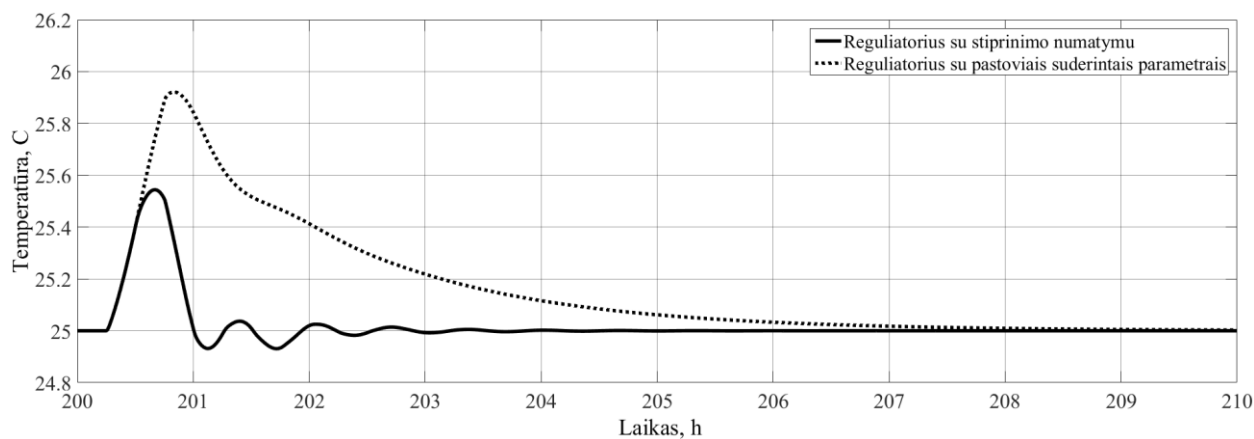
4.2 pav. Proceso reguliavimo efektyvumo palyginimas, kai $T_{v.in} = 18$ (°C), $F_t = 10$ (m^3/h)
 $\Delta F_t = 3$ ($m^3/0,5h$)



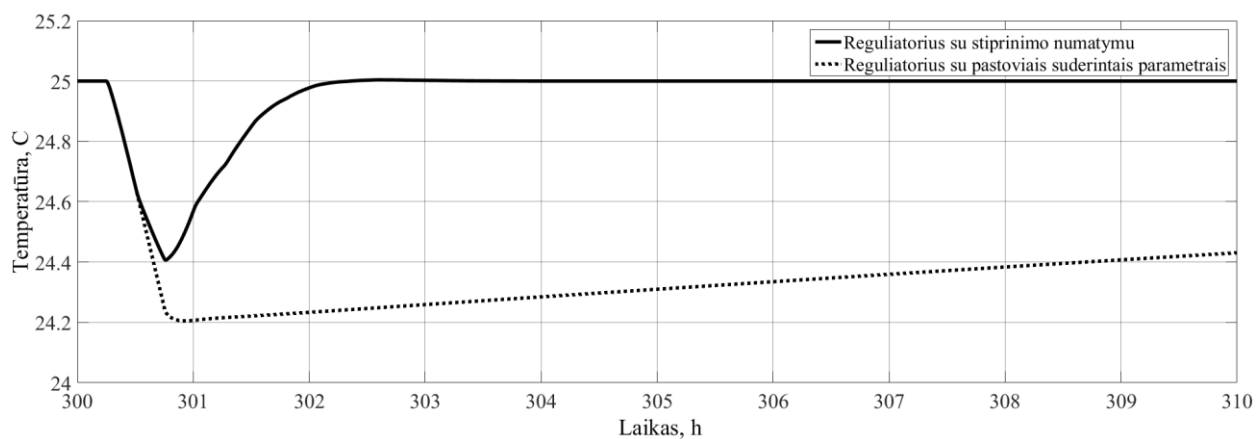
4.3 pav. Proceso reguliavimo efektyvumo palyginimas, kai $T_{v.in} = 11$ (°C), $F_t = 10$ (m^3/h)
 $\Delta F_t = 3$ ($m^3/0,5h$)



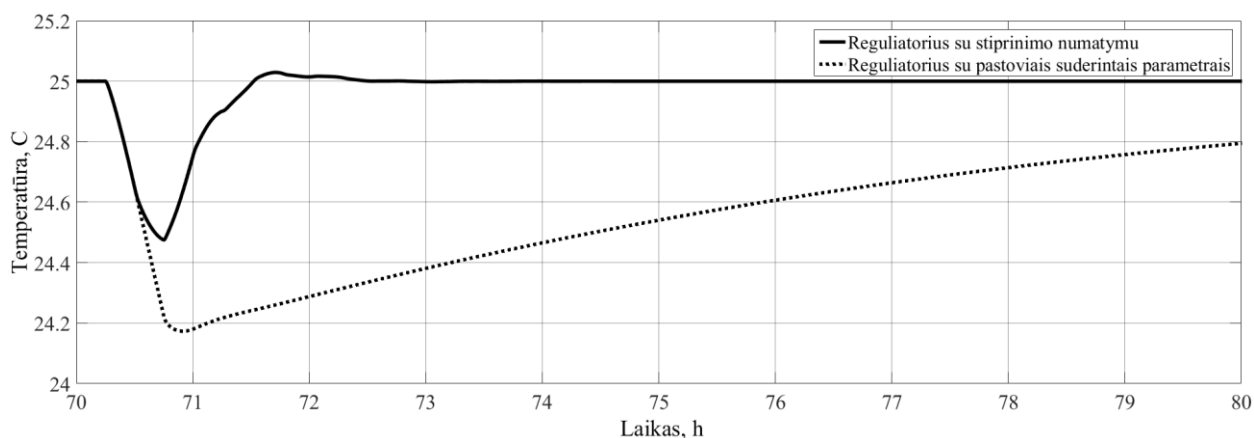
4.4 pav. Proceso reguliavimo efektyvumo palyginimas, kai $T_{v.in} = 4$ (°C), $F_t = 10$ (m^3/h)
 $\Delta F_t = 3$ ($m^3/0,5h$)



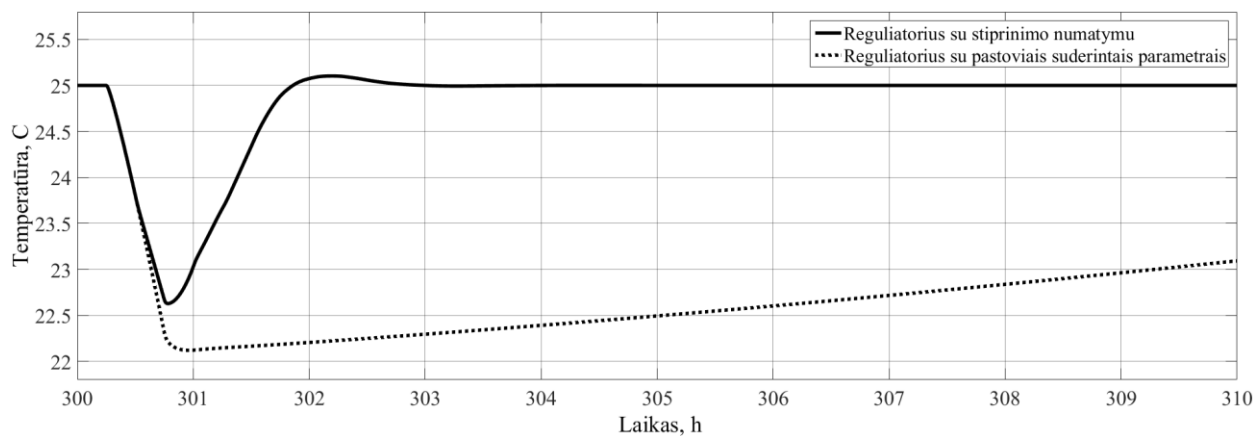
4.5 pav. Proceso reguliavimo efektyvumo palyginimas, kai $T_{v.in} = 4$ (°C), $F_t = 20$ (m^3/h)
 $\Delta F_t = 3$ ($m^3/0,5h$)



4.6 pav. Proceso regulavimo efektyvumo palyginimas, kai $T_{v.in} = 18$ (°C), $F_t = 30$ (m^3/h)
 $\Delta F_t = -3$ ($m^3/0,5h$)



4.7 pav. Proceso regulavimo efektyvumo palyginimas, kai $T_{v.in} = 11$ (°C), $F_t = 30$ (m^3/h)
 $\Delta F_t = -3$ ($m^3/0,5h$)



4.8 pav. Proceso regulavimo efektyvumo palyginimas, kai $T_{v.in} = 18$ (°C), $F_t = 30$ (m^3/h)
 $\Delta F_t = -10$ ($m^3/0,5h$)

4.1 lentelė. Kokybės rodiklių palyginimas

F_t , (m^3/h)	$T_{v.in}$, ($^{\circ}C$)	ΔF_t , (m^3 / $0,5h$)	Dinaminė nuokrypa, %	Nusistovėjimo laikas, h	
				Regulatorius su stiprinimo numatymu	Regulatorius su išanksto suderintais parametrais
10	18	3	50,00	1,00	>10
	11		38,14	1,00	4,45
	4		33,64	1,15	2,85
20	4		37,63	0,75	4,35
30	18	-3	25,00	1,45	>10
	11	-3	35,80	1,05	>10
	18	-10	17,86	1,75	>10

Grafikuose (4.2-4.8) matyti, kad šilumokaičio temperatūros valdymo sistema su stiprinimo numatymu, visų atliktų eksperimentų metu yra pranašesnė už sistemą, su iš anksto suderintais parametrais, nes temperatūra šilumokaičio išėjime iki darbo sąlygas atitinkančių ribų nusistovi greičiau, o kai kuriais atvejais, sistema su pastoviai suderintais parametrais nesugeba palaikyti temperatūros reikiamose ribose (4.8 pav.). Dinaminė nuokrypa taipogi mažesnė sistemoje su stiprinimo numatymu. Esant mažam tyrės tūriniam srautui, sistemos su iš anksto suderintais parametrais kokybės rodikliai yra geri (4.3-4.5 pav.) ir proceso valdymo pagerėjimas nėra labai ryžkus, tačiau šilumokaičio apkrovai, palyginus dviejų minėtų valdymo sistemų reakcijas į vienodą tyrės srauto pokytį (4.6-4.8 pav.) išryškėja valdymo sistemos su stiprinimo numatymu privalumai, pvz. 4.8 paveiksle matyti, kad valdymo sistema su iš anksto suderintais parametrais nesugeba palaikyti tyrės temperatūros šilumokaičio išėjime pagal technologines sąlygas ($\pm 1^{\circ}C$).

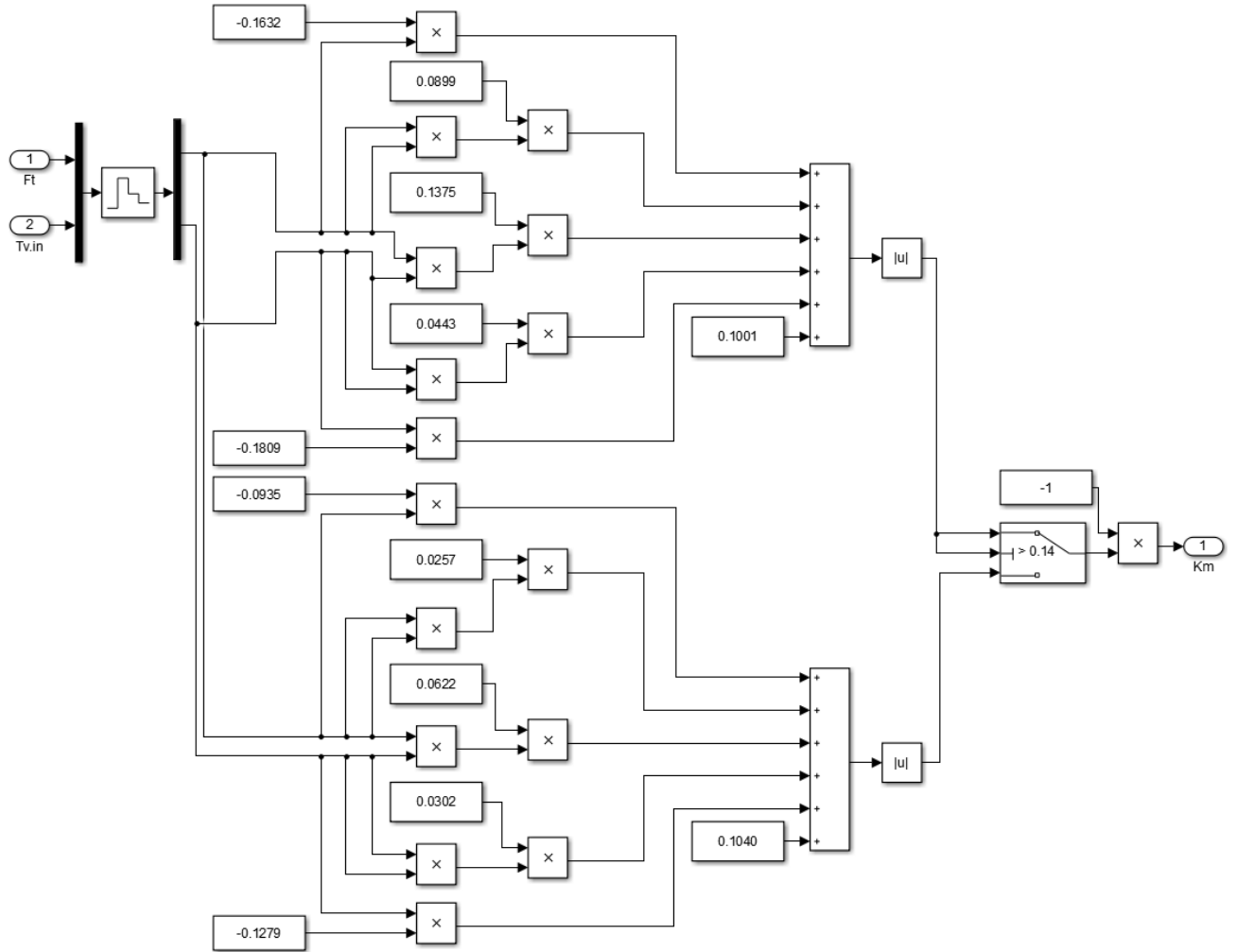
IŠVADOS

1. Išsiaiškinta vamzdinių šilumokaičių privalumai ir trūkumai, jų veikimo principai ir konstrukcijų ypatybės, savybės lėmusios šilumokaičių paplitimą;
2. Išstudijuoti valdymo sistemų tipai, bei jų panaudojimo galimybės. Įsigilinta į adaptacijos metodus ir jų taikymą. Šilumokaičio temperatūros adaptyvios valdymo sistemos tyrime, naudotas stiprinimo numatymo metodas, nes yra žinomi ir prognozuojami darbo režimo pasikeitimai.
3. Adaptyvios valdymo sistemos projektavimas suskirstytas į keturis etapus. Pirmame etape išskirti parametrai (apkrova, vandens temperatūra įėjime, vandens srautas), kurie lemia šilumokaičio darbą. Antrame etape sukurtas parametrų identifikavimo mechanizmas, kuris aprašo, kaip keičiasi stiprinimo koeficientas, laiko pastovioji ir vėlavimo trukmė, pasikeitus šilumokaičio darbo režimui. Trečiame etape, parenkant reguliatoriaus derinimo taisykles, palyginami penki, pagal skirtingas derinimo taisykles (*ITAE, IAE, ISE Ziegler ir Nichols* bei *Cohen ir Coon*) suderintų reguliatorių kokybės rodikliai. Geriausius kokybės rodiklius parodė reguliatorius suderintas pagal *IAE* derinimo taisykles. Paskutiniame etape realizuotas diskretinis PID reguliatorius, kurio algoritmas išreiškiamas valdančiojo poveikio pokyčiais.
4. Palyginus, kaip procesus valdo reguliatorius su stiprinimo numatymu ir reguliatorius su iš anksto suderintais parametrais, ženkliai geresni kokybės rodikliai gauti reguliatoriumi su stiprinimo numatymu.
5. Galima daryti išvadą, kad adaptyvią šilumokaičio temperatūros valdymo sistemą su stiprinimo numatymu galima panaudoti projektuojant ir tobulinant pramoninių šilumokaičių valdymo sistemas.

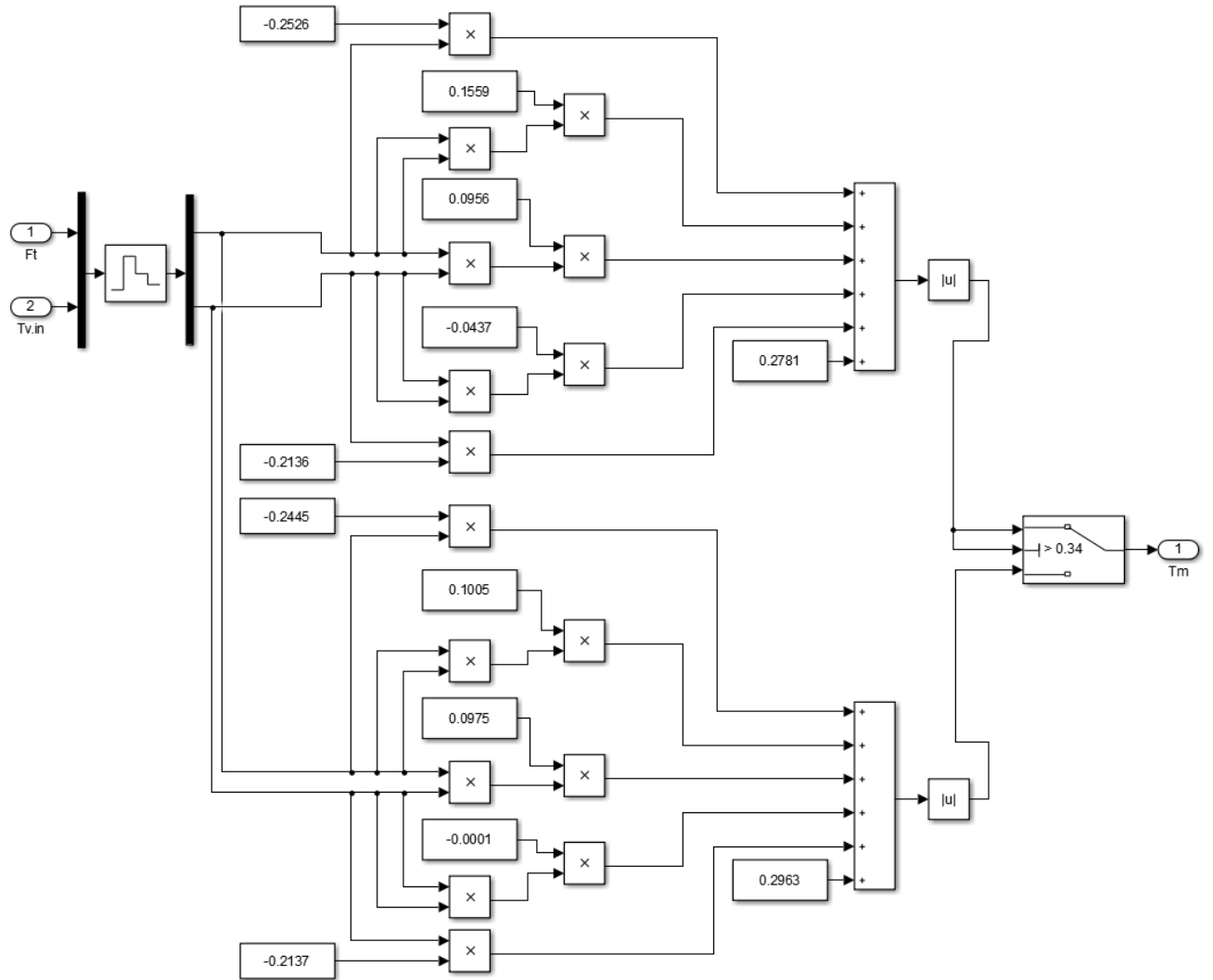
LITERATŪRA

1. Heat Exchanger Equipment Field Manual / Maurice Stewart, Oran T. Lewis: 2013 m. 461 p.;
2. Heat exchangers: selection, rating, and thermal design / Sadik Kakaç , Hongtan Liu: 2002 m. 501 p.;
3. Fundamentals of heat exchanger design / Ramesh K. Shah, Dušan P. Sekulić: New York, 2003 m. 941 p.;
4. Vamzdinio šilumokaičio tipai. [žiūrėta 2016-02-26]. Prieiga per internetą: <http://www.teploobmenka.ru/oborud/art-shelltube/>;
5. Valdymo sistemų tipai. [žiūrėta 2016-03-07]. Prieiga per internetą: <http://citforum.ru/consulting/BI/karpov/>;
6. Adaptive control / Karl Johan Astrom, Bjorn Wittenmark: Lund Institute of Technology 2008 m. 564 p.;
7. Stiprinimo numatymo principai. [žiūrėta 2016-03-15]. Prieiga per internetą: http://bookasutp.ru/Chapter5_6.aspx;
8. Eksperimentinių tyrimų planavimas: Mokomoji knyga / Donatas Levišauskas, Tomas Tekorius: Kauno Technologijos Universitetas, Kaunas, 2007 m. 89 p.;
9. Arthur G.O. Mutambara and Marwan S.Y. Al-Haik, “EKF based Parameter Estimation for a Heat Exchanger,” Proceedings of the American Control Conference, California.1999;
10. Automatinio reguliavimo sistemų derinimas: Mokomoji knyga / Donatas Levišauskas: Kauno Technologijos Universitetas, Vilnius, 2008 m. 117 p.;
11. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments / Raymond H. Myers, Douglas C. Montgomery: 3rd Edition 704 p.;
12. Process Dynamics and Control / Dale E. Seborg, Duncan A. Mellichamp, Thomas F. Edgar, Francis J. Doyle: John Wiley & Sons, 2010 m. 514 p.;
13. Diskretinis PID reguliatorius. [žiūrėta 2016-04-28]. Prieiga per internetą: http://www.kirp.chtf.stuba.sk/moodle/pluginfile.php/66882/mod_resource/content/0/tidsdiskret_pid_reg.pdf;
14. Regulatoriaus derinimo taisyklės. [žiūrėta 2016-04-21]. Prieiga per internetą: <http://blog.opticontrols.com/archives/884>.

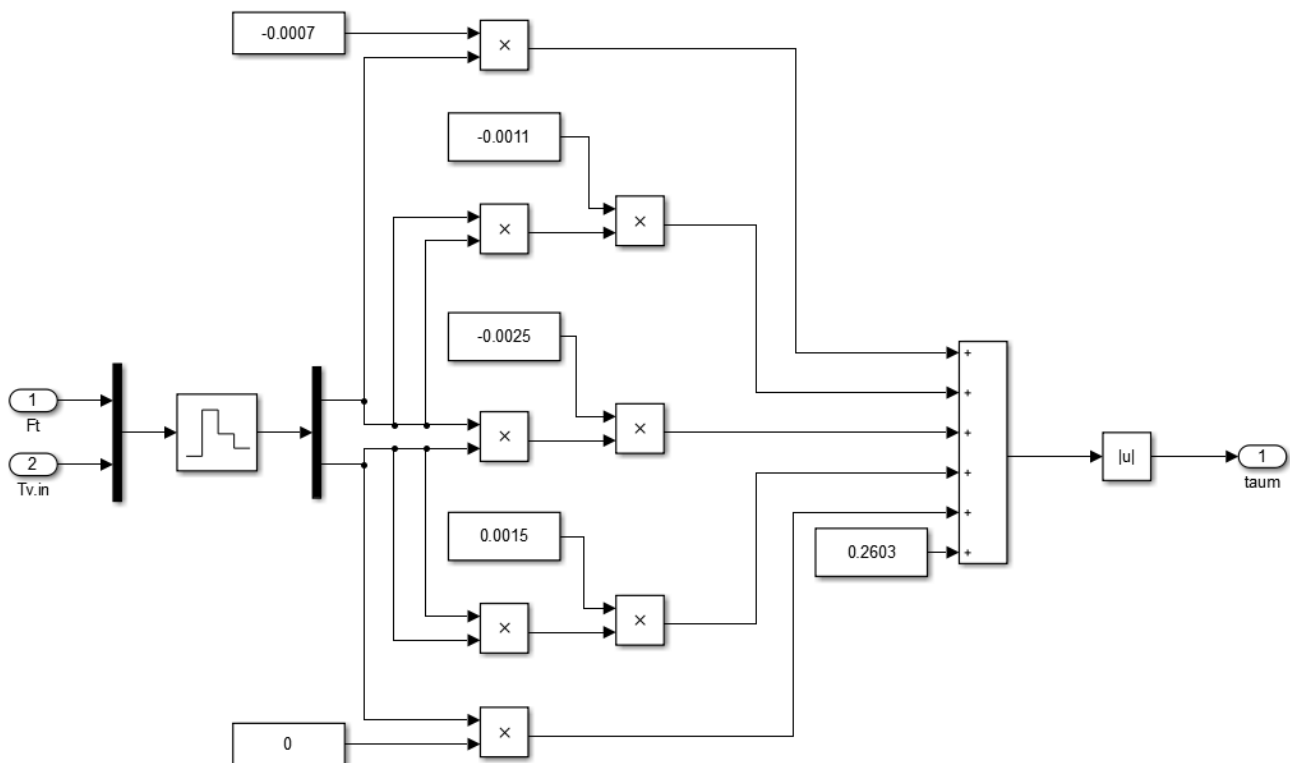
Priedas 1. Proceso stiprinimo koeficiento koregavimo modelis



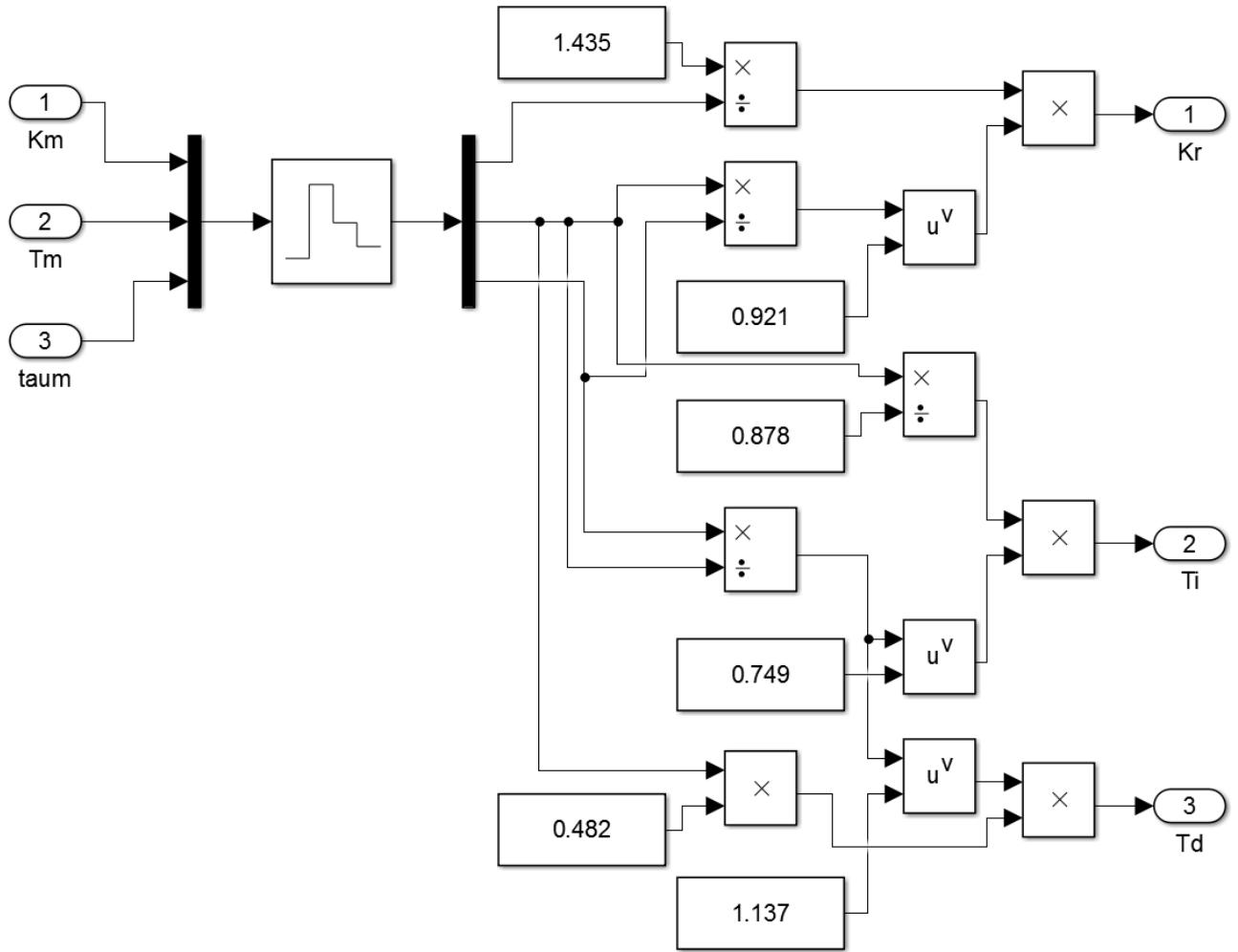
Priedas 2. *Proceso atstojamosios laiko pastoviosios koregavimo modelis*



Priedas 3. Proceso atstojamosios vėlavimo trukmės koregavimo modelis



Priedas 4. IAE derinimo taisyklių realizavimas



Priedas 5. Diskretinio PID realizavimo modelis

