

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Donatas Garbenčius

**ŠILUMOKAIČIO TEMPERATŪROS REGULIAVIMO SU PID IR
NERAIŠKIOS LOGIKOS REGULIATORIAIS TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Leonas Balaševičius

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
AUTOMATIKOS KATEDRA

**ŠILUMOKAIČIO TEMPERATŪROS REGULIAVIMO SU PID IR
NERAIŠKIOS LOGIKOS REGULIATORIAIS TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Valdymo technologijos (621H66001)

Vadovas

Doc. dr. Leonas Balaševičius

Recenzentas

Prof. habil. dr. Donatas Levišauskas

Projektą atliko

Donatas Garbenčius

KAUNAS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Donatas Garbenčius

(Studento vardas, pavardė)

Valdymo technologijos 621H66001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Šilumokaičio temperatūros reguliavimo su PID ir neraiškios logikos reguliatoriais tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

2016 m.

d.

Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Donato Garbenčiaus** baigiamasis projektas tema „Šilumokaičio temperatūros reguliavimo su PID ir neraiškios logikos reguliatoriais 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)

Garbenčius, Donatas. Šilumokaičio temperatūros reguliavimo su PID ir neraiškios logikos reguliatoriais tyrimas. Valdymo sistemų magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Leonas Balaševičius; Kauno technologijos universitetas. Elektros ir elektronikos fakultetas, Automatikos katedra.

Kaunas, 2016. 69 psl.

SANTRAUKA

Baigiamajame magistro projekte išanalizuota šilumokaičio temperatūros reguliavimo sistema, sudarytas į kondensacinį šilumokaitį tiekiamo šilumnešio temperatūros reguliavimo sistemos Simulink modelis. Modeliuojamą sistemą sudaro: kondensacinis šilumokaitis, ketureigis vožtuvas su pavara, cirkuliaciniai siurbliai, kaloriferis, reguliatorius. Pagrindinis šio tyrimo tikslas yra suprojektuoti PID ir fuzzy reguliatorius, kurie valdys ketureigio vožtuvo sklendės padėtį kondensacinio šilumokaičio temperatūros reguliavimo kontūre. Taikant automatinio reguliavimo kokybės rodiklius tokius, kaip reguliavimo stabilumas, perreguliavimas, pereinamojo proceso trukmė, daroma išvada, kuris reguliatorius tinkamesnis šiai sistemai. Projektuojamo vožtuvo reguliatoriaus uždavinys yra palaikyti pasirinktą, pastovią į kondensacinį šilumokaitį paduodamo šilumnešio temperatūrą nepriklausomai nuo katilo apkrovos ir kintančios temperatūros. Projektuojamo reguliatoriaus išėjimo signalas tiesiogiai nustato ketureigio vožtuvo padėtį. Šis reguliavimo metodas įtakoja katilo aplinkosauginius ir energetinius rodiklius.

Reikšminiai žodžiai: šilumokaitis, PID ir fuzzy reguliatorius, temperatūros reguliavimas, derinimas.

Garbencius, Donatas. Analysis of heater exchanger temperature control with PID and fuzzy controllers. Control systems master final work / supervisor Assoc. Prof. Dr. Leonas Balaševičius; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronic Engineering, Department of Automation.

Kaunas, 2016. 69 pages

SUMMARY

The final master thesis analyzes the system of temperature regulation of the heat exchanger. The Simulink model of the heat transfer medium is made. The designed system consists: of condensing heat exchanger, four way valve with drive, circulation pumps, heater , regulator. The main objective of the research is to design PID and fuzzy regulators that would control the position of the four way valve in the contour of temperature regulation of the condensing heat exchanger. While applying the quality indicators of automated regulation, such as stability of regulation, re-regulation, duration of the transitional time, the conclusion is drawn which regulator is more suitable for this system. The objective of the designed valve regulator is to maintain the chosen, stable temperature that is transferred to the condensing heat exchanger regardless of the load of the boiler and changing temperature. The output signal directly sets the position of the four way valve. This method of regulation has impact on the environmental and energy indicators of the boiler.

Key words: heat exchanger ,PID and fuzzy regulator, temperature regulation, regulation.

TURINYS

| | |
|---|----|
| ĮVADAS..... | 8 |
| 1. LITERATŪROS APŽVALGA IR ANALIZĖ | 9 |
| 1.1 Šilumokaičio temperatūros reguliavimo sistemos analizė..... | 9 |
| 1.2 Kondensacinio šilumokaičio modelio sudarymas | 10 |
| 1.3 Šilumokaičio reguliavimo kanalomateminio modelio sudarymas..... | 12 |
| 1.4 Kaloriferio modelio sudarymas | 13 |
| 1.4.1 Temperatūros jutiklio modeliavimas..... | 15 |
| 1.5 PID reguliatorius..... | 16 |
| 1.6 Neraiškios logikos reguliatorius | 22 |
| 1.6.1 Neraiškių sistemų veikimo principai..... | 22 |
| 2. ŠILUMOKAIČIO TEMPERATŪROS VALDYMAS NAUDOJANT PID REGULIATORIŲ 28 | |
| 2.1 Modelio sudarymas naudojant PID reguliatorių..... | 28 |
| 2.2 PID reguliatoriaus projektavimas | 29 |
| 2.3 Reguliavimo kokybė keičiant užduotos temperatūros reikšmę, bei debitus Q1 ir Q2 ... | 31 |
| 2.3.1 Keičiama užduotos temperatūros reikšmė T °C | 31 |
| 2.3.2 Keičiama debito Q2 reikšmė | 36 |
| 2.3.3 Keičiama debito Q1 reikšmė | 38 |
| 2.3.4 Keičiama pasirinktos temperatūros T °C ir debito Q1 reikšmė..... | 40 |
| 2.3.5 Keičiama pasirinktos temperatūros T °C ir debito Q2 reikšmė..... | 43 |
| 3. ŠILUMOKAIČIO TEMPERATŪROS VALDYMAS NAUDOJANT FUZZY REGULIATORIŲ | 47 |
| 3.1 Neraiškios logikos reguliatoriaus projektavimas..... | 47 |
| 3.1.1 Regulatoriaus įėjimų ir išėjimų apibrėžimas..... | 47 |
| 3.1.2 Lingvistinių kintamųjų apibrėžimas ir priklausomumo funkcijų parinkimas | 48 |
| 3.1.3 Neraiškaus reguliatoriaus taisyklių bazės sudarymas | 49 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.2 | Valdymo sistemos su FR tyrimas | 50 |
| 3.2.1 | Keičiama užduotos temperatūros reikšmė T °C | 50 |
| 3.2.2 | Keičiama debito Q_2 reikšmė | 54 |
| 3.2.3 | Keičiama debito Q_1 reikšmė | 58 |
| 3.2.4 | Keičiama užduotos temperatūros T °C ir debito Q_1 reikšmė | 60 |
| 3.2.5 | Keičiama užduotos temperatūros T °C ir debito Q_2 reikšmė | 63 |
| 4. | TYRIMO REZULTATŲ PALYGINIMAS IR ĮVERTINIMAS | 66 |
| | IŠVADOS IR REZULTATAI | 67 |
| | LITERATŪRA | 68 |

IVADAS

Siekiant realizuoti Lietuvos nacionalinėje energetikos strategijoje numatytą uždavinį didinti įstaigų, įmonių ir namų ūkio įrenginių energetinį efektyvumą yra šildymo sistemų tobulinimas ir modernizavimas [28]. Vis daugiau į buities sritis yra integruojamos naujos technologijos, leidžiančios žmogui daugiau laiko skirti sau ir šeimai ar mėgstamai knygai. Įdiegus automatinio valdymo sistemas į buities sritis, tokias kaip šildymą, sistemos tampa „išmaniomis“, jos yra optimalios, stabilios bei savarankiškos ir taupios mūsų brangų laiką, pinigus. Todėl pagrindinė problema yra šios sistemos modelio sudarymas ir tyrimas bei šilumokaičio temperatūros reguliavimo sistemos su PID ir fuzzy reguliatoriais palyginimas.

Patalpoms šildyti yra sukurta begalė būdų ir pagrindiniai reikalavimai keliami sistemai yra tokie: komforto sąlygų išlaikymas (atitinkama temperatūra) ir visiškas automatizavimas bei aukštas naudingumo koeficientas. Netinkamai veikianti šildymo sistema niekada nesudarys pageidaujamo komforto lygio.

Tyrimo tikslas: Šilumokaičio temperatūros valdymo sistemos su PID ir fuzzy reguliatoriumi sudarymas bei abiejų valdymo sistemų kokybės įvertinimas.

Tyrimo uždaviniai:

1. Literatūros analizė;
2. Šilumokaičio temperatūros valdymo sistemos su PI reguliatoriumi sudarymas;
3. Šilumokaičio temperatūros valdymo sistemos su fuzzy reguliatoriumi sudarymas;
4. Valdymo sistemų su PI ir fuzzy reguliatoriais, reguliavimo kokybės palyginimas.

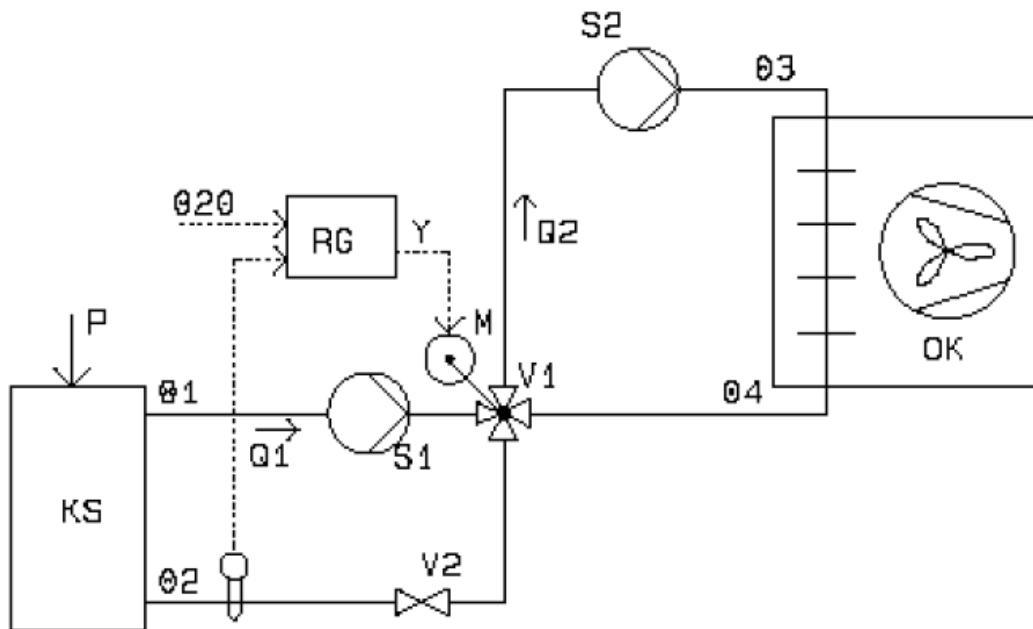
Tyrimo metodai – mokslinės literatūros analizė, eksperimentai bei jų palyginimas.

1. LITERATŪROS APŽVALGA IR ANALIZĖ

Literatūros analizės metu pavyko rasti tik vieną straipsnį [3] susijusį su šilumokaičio temperatūros reguliavimo sistema, kurį žemiau ir apžvelgsime.

1.1 Šilumokaičio temperatūros reguliavimo sistemos analizė

Visų pirma darbe analizuojamas sistemos šilumokaičio temperatūros reguliavimo modelis. Sistemos struktūrinė schema pateikta 1.1 pav.



1.1 pav. Šilumokaičio temperatūros reguliavimo funkcinė schema [3]

Čia:

- KS – kondensacinis šilumokaitis;
- OK – kaloriferis (šilumos vartotojas);
- S – cirkuliaciniai siurbiai;
- V1, M – ketureigis vožtuvas su pavara;
- RG – reguliatorius;
- Q – šilumnešio debitai;
- Θ – šilumnešio temperatūros;
- P – šilumokaičiui suteikiama šiluminė galia.

Šilumokaičio temperatūros reguliavimo sistemą sudaro du šilumokaičio cirkuliaciniai kontūrai: šilumos vartotojo – kaloriferio OK kontūras, kuriame šilumnešio debitą Q_2 sudaro siurblys S2 ir šilumos šaltinio – kondensacinio šilumokaičio KS kontūras, kuriame šilumnešio debitą Q_1 sudaro siurblys S1. Regulatoriaus RG išėjimo signalas Y tiesiogiai nustato vožtuvo V1 padėtį. Kai $Y = 0$, debitai Q_1 ir Q_2 atskirti, tarpusavyje nesimaišo. Debitas Q_1 nustatomas ventiliu V2. Siekiant sukurti tikslesnį iš šilumokaičio ištekiančio ir į šilumokaitį tiekiamo šilumnešio temperatūrų skirtumą, mažos galios šilumokaičiui nustatomas nedidelis debitas Q_1 . Jei šilumokaičio galia apie 1 kW, šilumnešio debitas parenkamas apie $0,1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ [3].

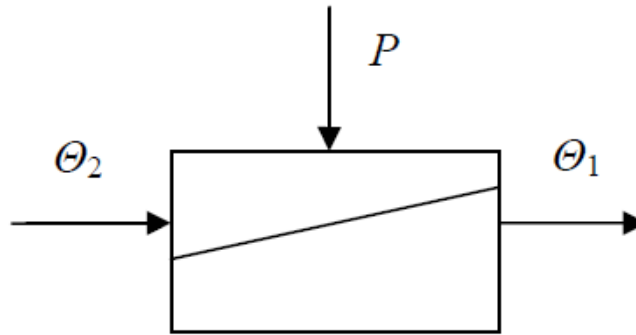
Debitą Q_2 lemia nustatytas siurblio S2 greitis, bei vamzdyno ir kaloriferio hidraulinis pasipriešinimas. Nustatomas projektuojamos sistemos kaloriferiui rekomenduojamas debitas: kaloriferiui rekomenduojamas $(0,5 - 1) \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ vandens debitas. Debitai Q_2 ir Q_1 laikomi pastoviais, nepriklausančiais nuo vožtuvo V1 padėties. Tokia prielaida priimtina, kai regulatoriaus RG išėjimo signalas $Y \leq Q_1/Q_2$. Kai $Y = Q_1/Q_2$, visas kondensacinio šilumokaičio kontūro šilumnešio srautas Q_1 per vožtuvą V1 prateka į kaloriferio kontūrą ir iš jo grįžta į šilumokaitį [3].

Analizuojamas į katilo kondensacinį šilumokaitį tiekiamo šilumnešio temperatūros automatinis reguliavimas. Toks reguliavimas reikalingas ir naudojamas šildymo ir vėdinimo sistemose. Šilumokaičio temperatūros reguliavimo sistemoje kondensacinis šilumokaitis KS yra šilumos šaltinis, o kaloriferis vanduo - oras OK – šilumos vartotojas. Šilumos vartotojams tiekiamos šilumnešio temperatūros Θ_3 (1.1 pav.) reguliavimas naudojant automatizuotą ketureigį vožtuvą yra žinomas, bei plačiai taikomas šildymo ir vėdinimo sistemose [29, 30].

Pagrindinis tiklas yra kitoks – reguliuoti į kondensacinį šilumokaitį grįžtančio šilumnešio temperatūrą Θ_2 . Toks reguliavimas reikalingas tiriant procesus kondensaciniame šilumokaityje ir jų įtaką katilo energiniams ir aplinkosauginiams rodikliams [3]. Modelis sudaromas naudojant MATLAB/Simulink programinį paketą.

1.2.1 Kondensacinio šilumokaičio modelio sudarymas

Kondensacinis šilumokaitis KS modeliuojamas kaip „juoda dėžė“, nedetalizuojant jo vidinės sandaros (1.2 pav.). Toks pasirinkimas padidina modelio universalumą ir supaprastina jo sudarymą [3].



1.2 pav. Kondensacinio šilumokaičio modelio schema. Θ_1 , Θ_2 – iš šilumokaičio ištekančio ir į šilumokaitį įtekančio šilumnešio temperatūros, °C; P – šilumokaičiui suteikiama galia, W [3].

Temperatūros kitimą šilumokaityje nuo įtekančio šilumnešio temperatūros Θ_2 iki ištekančio šilumnešio temperatūros Θ_1 laikant tiesiniu (šis kitimas nėra tiksliai tiesinis, tačiau artimas tokiam [31]) ir laikant, kad šilumnešio ir šilumokaičio vidinių vamzdelių ir ant jų užpresuotų plokštelių temperatūros pokyčiai, pasikeitus šilumokaičiui suteikiamai galiai P , yra vienodi, šilumokaičio galios balansas aprašomas lygtimi [3]:

$$P - m_V c_V (\Theta_1 - \Theta_2) = 0.5(M_V c_V + M_S c_S) \frac{d\Theta_1}{dt}, \quad (1.1)$$

čia: m_V – šilumnešio (vandens) debitas, kg s^{-1} ;

c_V – šilumnešio specifinė šiluma, $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$;

M_V – šilumnešio kiekis šilumokaityje, kg;

M_S – šilumokaičio metalo (užpresuotų plokštelių ir vamzdelių) masė, kg;

c_S – šilumokaičio metalo specifinė šiluma, $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$;

t – laikas, s.

Išsprendus (1.1) lygtį, kai $\Theta_2 = \text{const}$, gaunama temperatūros Θ_1 pereinamojo proceso lygtis nuo galios P pokyčio [3]:

$$\Theta_1 = \frac{P}{m_V c_V} \left(1 - e^{-\frac{2m_V c_V}{M_V c_V + M_S c_S} t}\right) \quad (1.2)$$

Išsprendus (1.1) lygtį, kai $P = \text{const}$, gaunama temperatūros Θ_1 pereinamojo proceso lygtis nuo temperatūros Θ_2 pokyčio (neįvertinant vėlavimo):

$$\Theta_1 = \Theta_2 \left(1 - e^{-\frac{2m_V c_V}{M_V c_V + M_S c_S} t}\right) \quad (1.3)$$

Temperatūros Θ_1 kitimas temperatūros Θ_2 pokyčio atžvilgiu vėluoja laiku τ_{KS} , s (laikoma, kad šilumnešis šilumokaityje nesimaišo):

$$\tau_{KS} = \frac{M_V}{m_V} \quad (1.4)$$

1.2.2 Šilumokaičio reguliavimo kanalo matematinio modelio sudarymas

Iš (1.2) lygties gaunama šilumokaičio reguliavimo kanalo $\Theta_1 = f(P)$ perdavimo funkcija $\Theta_{1P}(s)$ [3].

$$\Theta_{1P}(s) = \frac{K_{KS}}{T_{KS}s + 1}; \quad K_{KS} = \frac{1}{m_V c_V}; \quad T_{KS} = \frac{M_V c_V + M_S c_S}{2m_V c_V}, \quad (1.5)$$

čia: K_{KS} – kondensacinio šilumokaičio reguliavimo kanalo „tiekiama galia – ištekančio šilumnešio temperatūra“ perdavimo koeficientas, KW^{-1} ;

T_{KS} – šilumokaičio laiko pastovioji, s;

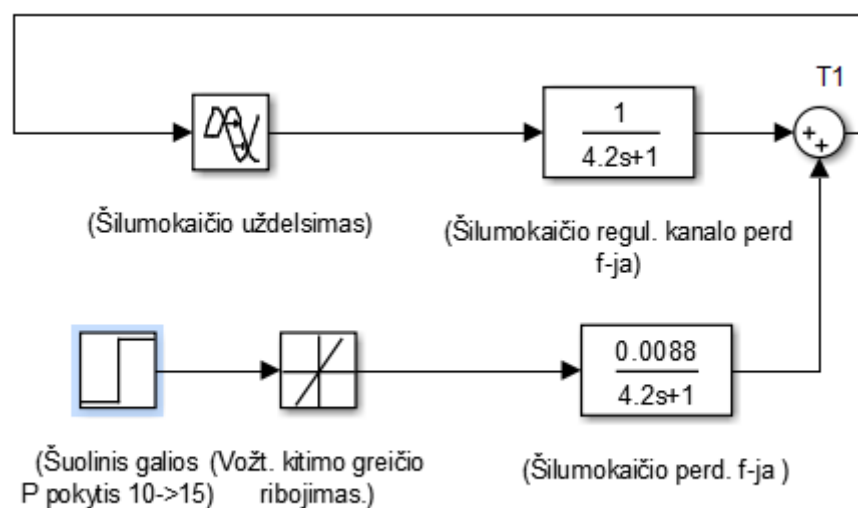
s – Laplaso operatorius.

Iš (1.3) ir (1.4) lygčių gauname šilumokaičio reguliavimo kanalo $\Theta_1 = f(\Theta_2)$ perdavimo funkciją $\Theta_{1\Theta}(s)$:

$$\Theta_{1\Theta}(s) = \frac{1}{T_{KS}s + 1} e^{-\tau_{KS}s} \quad (1.6)$$

Perdavimo funkcijomis (1.5) ir (1.6) modeliuojamas kondensacinis šilumokaitis atitinkamai reguliavimo kanalu „galia P – ištekančio šilumnešio temperatūra Θ_1 “ ir reguliavimo kanalu „įtekančio šilumnešio temperatūra Θ_2 – ištekančio šilumnešio temperatūra Θ_1 “. Konkrečiam modeliavimui pasirinktas šilumokaitis, kurį sudaro vienos vijos 1,5 m ilgio, 10 mm vidinio skersmens ir 1 mm sienelės storio varinis vamzdelis su užpresuotomis aliuminio plokštelėmis, kurių bendras plotas $0,6 \text{ m}^2$ (paviršiaus plotas $1,2 \text{ m}^2$) [3]. Tokio šilumokaičio vario masė $m_{Cu} = 0,46 \text{ kg}$,

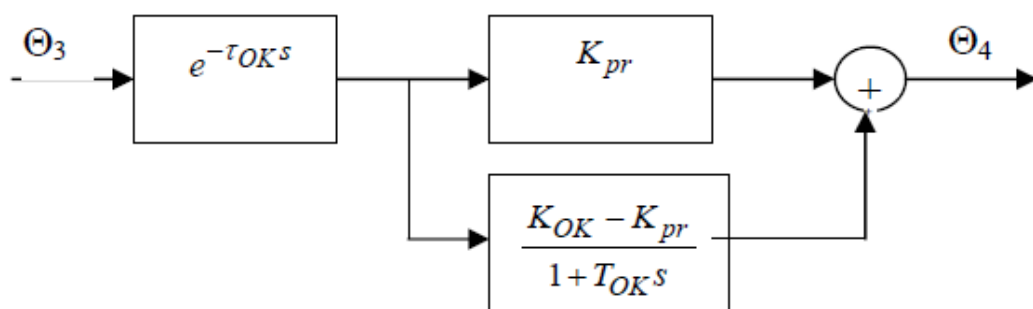
vario specifinė šiluma $c_{Cu} = 390 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ [11], aliuminio masė $m_{Al} = 0,32 \text{ kg}$, aliuminio specifinė šiluma $c_{Al} = 880 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ [11], šilumokaityje esančio vandens masė $M_V = 0,12 \text{ kg}$, $40 \text{ }^\circ\text{C}$ vandens specifinė šiluma $c_V = 4175 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ [11]. Šilumokaičio laiko pastovioji pagal (1.5) lygtį, kai vandens debitas $Q_1 = 0,1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, $T_{KS} = 4,2 \text{ s}$, perdavimo koeficientas $K_{KS} = 0,0088 \text{ KW}^{-1}$ ir uždelsimas $\tau_{KS} = 4,4 \text{ s}$ [3]. Programoje Simulink šilumokaitis modeliuojamas perdavimo funkcijų ir transportinio uždelsimo blokais. Šilumokaičio matematinio modelio fragmentas pateikiamas 1.3 pav.



1.3 pav. Šilumokaičio Simulink modelio fragmentas

1.2.3 Kaloriferio modelio sudarymas

Kaloriferis OK šilumokaičio temperatūros automatinio reguliavimo sistemoje (ARS) modeliuojamas lygiagrečiai sujungtomis beinericine ir pirmojo laipsnio inercine grandimis, turinčiomis abiem grandims bendrą uždelsimą (1.4 pav.) [9].



1.4 pav. Kaloriferio modelio schema šilumokaičio temperatūros ARS [9].

Čia: Θ_3, Θ_4 – šilumnešio temperatūra atitinkamai kalorifero įėjime ir išėjime, °C;
 τ_{OK} – šilumnešio uždelsimas kaloriferyje, s;
 K_{pr} – kalorifero perdavimo koeficientas, nusakantis pradinį ištekancio šilumnešio temperatūros šuolį;
 K_{OK} – perdavimo koeficientas, nusakantis nusistovėjusią ištekancio šilumnešio temperatūrą;
 T_{OK} – kalorifero laiko pastovioji, s;
 s – Laplaso operatorius.

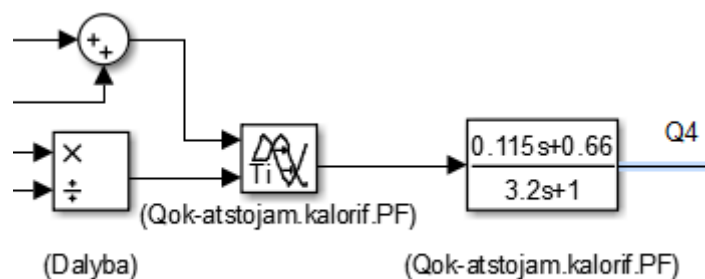
Atstojamoji kalorifero perdavimo funkcija $\Theta_{OK}(s)$ [9]:

$$\Theta_{OK}(s) = \frac{K_{pr}T_{OK}s + K_{OK}}{T_{OK}s + 1} e^{-\tau_{OK}s}. \quad (1.7)$$

Perdavimo funkcijos rodikliai apskaičiuojami pagal [9] metodiką. Modeliuojamo kalorifero Volcano VR1 perdavimo funkcija, kai šilumnešio (vandens) debitas $Q_2 = 0,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ir vardinis kalorifero ventiliatoriaus sukimosi greitis [3]:

$$\Theta_{OK}(s) = \frac{0.115s + 0.66}{3.2s + 1} e^{-7.9s} \quad (1.8)$$

Kalorifero Simulink modelio fragmentas pateikiamas 1.5 pav.



1.5 pav. Kalorifero Simulink modelio fragmentas

Ketureigis vožtuvas V1 su pavara M modeliuojami, kaip riboto greičio proporcinė grandis, kurios įėjimas yra regulatoriaus RG išėjimo signalas Y . Kadangi modelyje vožtuvo pavaros SM4 visos eigos trukmė 150 s, modelyje įvedamas vožtuvo padėties kitimo greičio ribojimas $1/150 \text{ s}^{-1}$.

Siekiant išlaikyti anksčiau minėtą debitų Q_1 ir Q_2 pastovumą modelyje numatomas regulatoriaus RG išėjimo signalo ribojimas $Y \leq Q_1/Q_2$ [3].

Vožtuvo V1 padėties koeficientas k_{v1} modeliuojamas lygtimis:

$$\begin{cases} k_{v1} = Y \leq Q1/Q2 \\ dk_{v1}/dt \leq 1/150 \end{cases} \quad (1.9)$$

Šilumnešio temperatūros Θ_2 ir Θ_3 priklauso nuo vožtuvo V1 padėties koeficiento k_{v1} [3].

$$\Theta_2 = \frac{(Q_1 - k_{v1}Q_2)\Theta_1 + k_{v1}Q_2\Theta_4}{Q_1} \quad (1.10)$$

$$\Theta_3 = k_{v1}\Theta_1 + (1 - k_{v1})\Theta_4 \quad (1.11)$$

Temperatūrų Θ_2 ir Θ_3 signalai modelyje per uždelsimo grandis siunčiami atitinkamai į kondensacinio šilumokaičio ir kaloriferio perdavimo funkcijų bloką įėjimus. Uždelsimo laikus apsprendžia šilumnešio debitai ir atitinkamų vamzdinių ilgai [3].

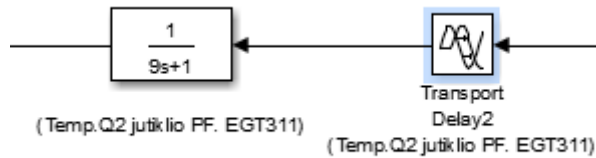
Temperatūros Θ_1 ir Θ_4 modelyje gaunamos, kaip atitinkamų perdavimo funkcijų bloką išėjimo signalai.

1.4.1 Temperatūros jutiklio modeliavimas

Temperatūros Θ_2 jutiklis modeliuojamas, kaip pirmojo laipsnio inercinė grandis su vėlinimu. Modeliavimo prototipo sistemoje naudojamo jutiklio EGT311 (firma Sauter) [32] perdavimo funkcija $\Theta_{2j}(s)$:

$$\Theta_{2j}(s) = \frac{1}{9s+1} e^{-s}. \quad (1.12)$$

Temperatūros jutiklio Simulink modelio fragmentas pateikiamas 1.6 pav.



1.6 pav. Temperatūros jutiklio Simulink modelio fragmentas

1.5.1 PID reguliatorius

Tyrime bus naudojama lygiagreti reguliatoriaus struktūra. PID reguliatorius - tai plačiausiai šiuolaikinėse valdymo sistemose naudojamas reguliatorius. Šis reguliatorius bando mažinti (koreguoti) paklaidą tarp išmatuoto proceso kintamojo (esamo lygio) ir siekiamo (norimo) lygio, apskaičiuodamas kitai iteracijai reikalingą valdymo signalą, kad esamo lygio reikšmės artėtų prie norimo lygio reikšmių. Klasikinis PID reguliatorius sudarytas iš 3 grandžių: proporcinės (P), integruojančios (I) ir diferencijuojančios (D)[2].

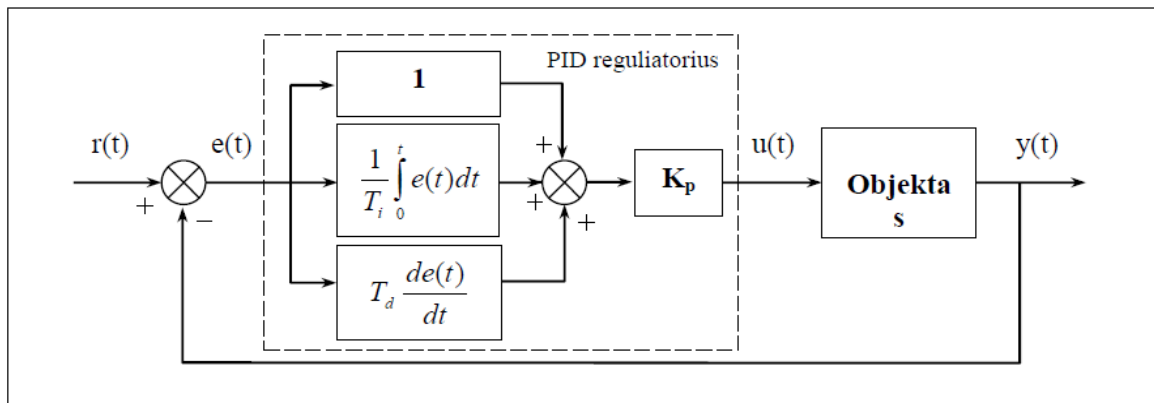
Tarkime, kad:

- $u(t)$ - valdymo signalas;
- $r(t)$ - užduoties (norimas) signalas;
- $y(t)$ - išėjimo (esamas) signalas;
- $e(t) = r(t) - y(t)$ - valdymo paklaida;
- $K = P$ - proporcinės grandies koeficientas;
- T_I - integruojančios grandies laiko pastovioji;
- T_D - diferencijuojančios grandies laiko pastovioji [2].

Tolydinio PID reguliatoriaus išraiška yra užrašoma taip:

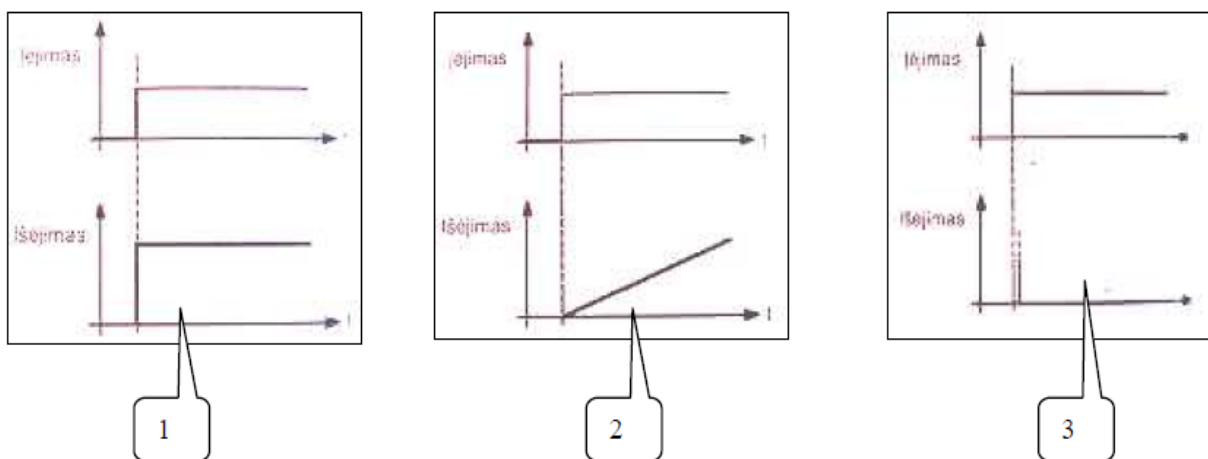
$$u(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d(\tau) + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1.13)$$

Valdymo sistema su PID reguliatoriumi pavaizduota 1.7 pav.



1.7 pav. Valdymo sistemos su PID reguliatoriumi schema [13].

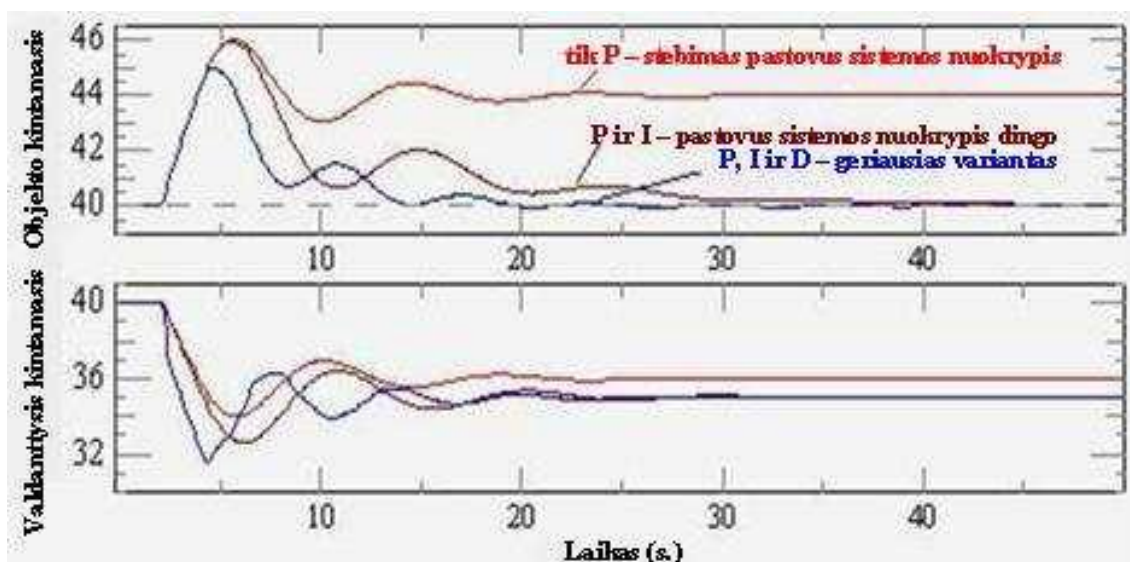
Geresniam PID reguliatoriaus veiklos supratimui nagrinėjamos atskiros PID reguliatoriaus komponentės: P, I ir D reguliatoriai. Proporciniame reguliatoriuje (1.8 pav. 1) valdančiojo kintamojo išėjimas yra proporcingas sistemos nuokrypiui. Jei sistemos nuokrypis yra didelis, tai valdančiojo kintamojo vertė taip pat yra didelė. Jei sistemos nuokrypis yra mažas, tai ir valdančiojo kintamojo vertė yra nedidelė. Kadangi, valdantysis kintamasis yra proporcingas sistemos nuokrypiui, tai valdantysis kintamasis bus tik tada, jei bus sistemos nuokrypis. Dėl šios priežasties vien proporciniu reguliatoriumi negalima pasiekti, kad sistemos nuokrypis būtų lygus 0. Tokiu atveju, nebus valdančiojo kintamojo, o tuo pačiu ir valdymo. Integruojančio veikimo reguliatorius (1.8 pav. 2) atlieka sistemos nuokrypio sudėties veiksmą laikui bėgant, t. y. integruoja jį. Jei sistemos nuokrypis yra pastovus, tai valdančiojo kintamojo reikšmė pastoviai didės, kadangi ji priklauso nuo sumos, kuri bėgant laikui didėja. Tačiau didėjant valdančiojo kintamojo vertei, sistemos nuokrypio vertė mažėja. Toks procesas tęsiasi iki tol, kol sistemos nuokrypis pasidaro lygus 0. Integruojančio veikimo reguliatoriai yra taikomi, kai norima išvengti pastovių sistemos nuokrypių. Diferencijuojanti grandis (1.8 pav. 3) įvertina, koku greičiu kinta sistemos nuokrypis. Jei sistemos nuokrypis kinta greitai, tai valdančiojo kintamojo vertė yra didelė. Jei sistemos nuokrypis kinta lėtai, tai valdančiojo kintamojo vertė yra maža. Regulatorius, turintis tik diferencijuojančią grandį, neturi prasmės, kadangi valdantysis kintamasis turės vertę tik tada, kai pasikeis sistemos nuokrypis [1].



1.8 pav. Reguliatorių P, I, D veikimo schemas[1]

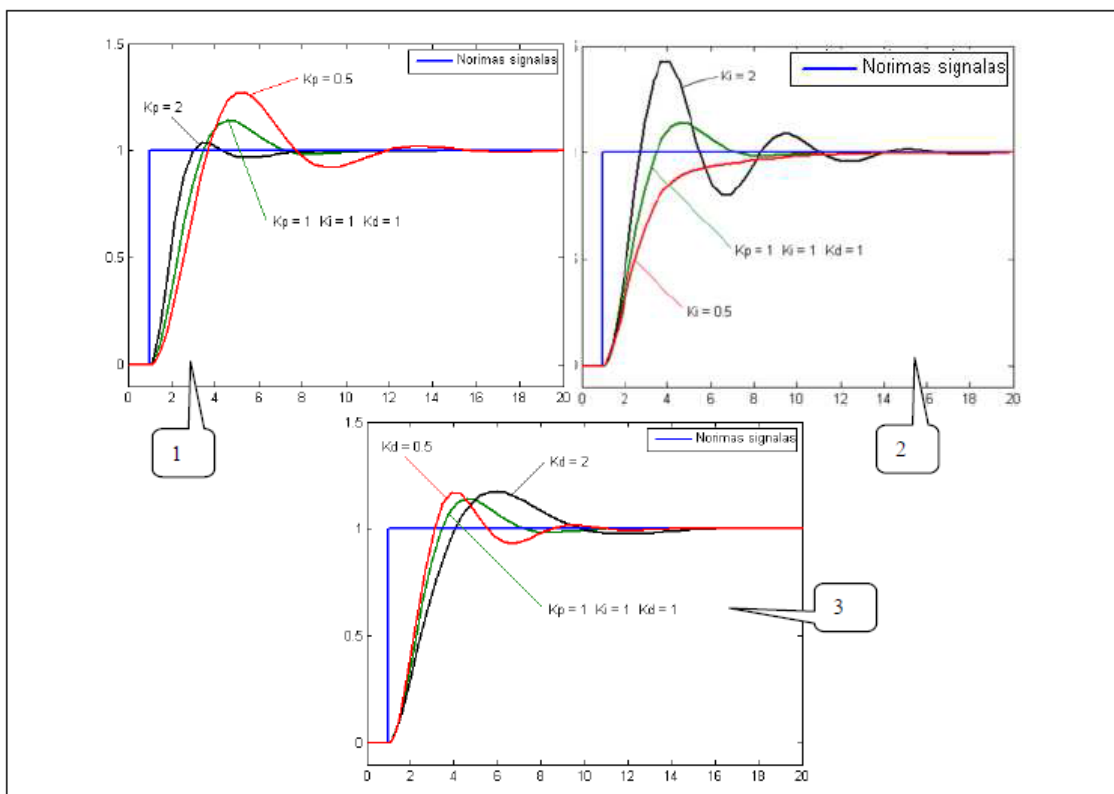
Apibendrinus gauname, kad proporcinė grandis nusako valdymo signalo $u(t)$ proporcinę priklausomybę nuo valdymo paklaidos $e(t)$, integruojanti grandis - priklausomybę nuo paklaidos $e(t)$ kaupimosi, diferencijuojanti grandis - priklausomybę nuo paklaidos $e(t)$ kitimo greičio. Užtenka parinkti šių priklausomybių koeficientus konkrečiam objektui taip, kad būtų pasiektas valdymo tikslas su galimai mažesne valdymo paklaida $e(t)$ [13].

Bendruoju atveju, kaip keičiasi valdymo paklaida, bei valdymo signalas naudojant atskiras PID reguliatoriaus grandis pavaizduota 1.9 paveiksle.



1.9 pav. Sistemos išėjimo signalai su skirtingomis PID reguliatoriaus grandimis [12].

Atskirų PID reguliatoriaus grandžių įtaka sistemų valdyje galima pavaizduoti (1.10 pav.)



1.10 pav. PID reguliatoriaus grandžių koeficientų įtakos sistemos išėjimo signalui [14].

Pastaba: 1.4 pav. nr.1 – pateikiama proporcinės grandies parametro įtaka, nr.2 – integruojančios grandies parametro įtaka, nr.3 – diferencijuojančios grandies parametro įtaka.

Kalbant apie PID reguliatorius, verta paminėti tokias pagrindines detales apie atskiras grandines: jei proporcinės grandies (P) parametras yra parenkamas didelis, tai gali privesti prie sistemos nestabilumo, tuo pačiu jei šis parametras yra per mažas, tuomet gaunami per dideli nuokrypiai ir toks reguliatorius yra nepakankamai jautrus: labai keičiantis valdymo nuokrypiams - per mažai įtakojamas valdymo kintamasis, tuo būdu gaunamas prastas sistemos valdymas. Tiek integruojanti grandis (I), tiek proporcinė grandis (P) gali sąlygoti vadinamojo peršokimo atsiradimą. Integruojančios grandies nebuvimas gali sąlygoti ir tai, kad valdymo sistema niekada nepasieks savo norimo lygio reikšmės. Diferencijuojanti grandis (D) sulėtina reguliatoriaus išėjimo (valdymo kintamojo) pokytį, tai ypatingai jaučiama, kai objekto kintamojo reikšmės yra pakankamai arti norimo lygio reikšmių, tai naudojama integruojančios grandies (I) sugeneruojam peršokimui sumažinti, bei padidinti sistemos stabilumui. Diferencijuojanti grandis stiprina triukšmus ir jei valdomas objektas yra jautrus triukšmams, tuomet tai taip pat gali išprovokuoti sistemos nestabilumą [2].

PID reguliatoriais valdomų sistemų kokybė priklauso nuo anksčiau minėtų trijų grandžių parinktų parametru. Parametru derinimo būdų yra gana daug: rankinis derinimas, Ziegler'io-

Nichols'o, bei japonų mokslininko Takahaši metodai. Nemaža dalis parametų derinimo algoritmų remiasi pereinamojo proceso analize [2].

Rankinio derinimo algoritmas: pradžioje užnulinami I ir D grandžių koeficientai, o P grandies koeficientas yra didinamas tol, kol objekto išėjimo signalas pradeda švytuoti. Tuomet P grandies koeficiento reikšmė priskiriama pusei gautos koeficiento reikšmės. Vėliau didinamas D grandies koeficientas, kol sistemos nuokrypis (angl. offset) yra pakoreguojamas per priimtina laiką tarpą. Suderinus P ir D grandžių koeficientus, jei reikia, derinamas I grandies koeficientas, kol per priimtina laiką objektas pasiekia savo norimas reikšmes. Per didelės I reikšmės sąlygoja staigų atsaką bei peršokimus. Šio metodo trūkumas yra tas, kad reikalingas kvalifikuotas specialistas, išmanantis sistemų parametų derinimo principus [2].

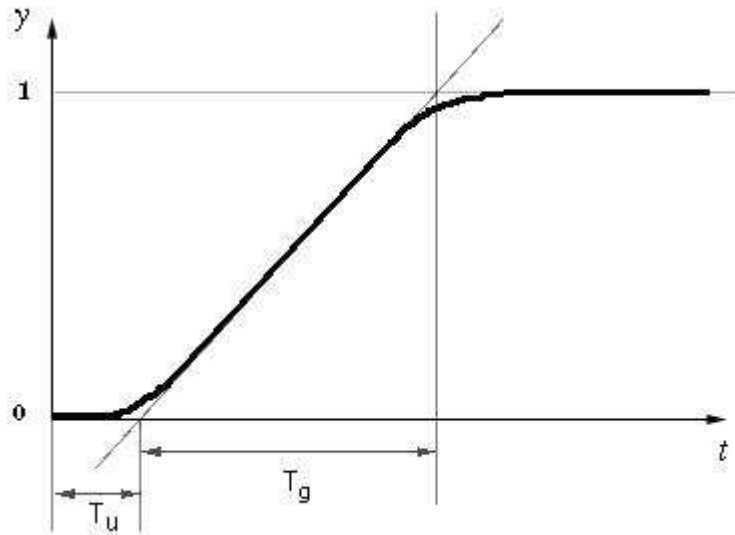
Ziegler'io-Nichols'o PID koeficientų derinimas [14] pateiktas žemiau esančioje lentelėje.

1.1 lentelė. Ziegler'io-Nichols'o PID koeficientų derinimo lentelė

| Regulatorius | K_P | K_I | K_D |
|---------------------|--------------|-------------------|-----------------|
| P | $0.5 * K_C$ | - | - |
| PI | $0.45 * K_C$ | $1.2 * K_P / P_C$ | - |
| PID | $0.6 * K_C$ | $2 * K_P / P_C$ | $K_P * P_C / 8$ |

Ziegler'io-Nichols'o parametų derinimo metodas veikia panašiai, kaip ir rankinio derinimo atveju: I ir D grandžių koeficientai yra užnulinami, o P grandies koeficientas didinamas tol, kol pasiekiamą kritinė reikšmė K_c , kurioje išėjimo signalas pradeda švytuoti. Tuomet K_c ir švytavimo periodas P_c yra naudojami pagal 1.1 lentelę PID regulatoriaus parametrus gauti. Pagrindinis metodo privalumas, kad tai įrodytas ir patikrintas parametų derinimo metodas, o trūkumas yra tas, kad pakankamai „agresyvus“ derinimo būdas [14].

Takahaši metodas: nubraižomas pereinamojo proceso grafikas (1.11 pav.) ir nustatomos parametų T_U ir T_G reikšmės. Grafike parodyta liestinė brėžiama per lenkimosi tašką.



1.11 pav. Pereinamojo proceso analizės paveikslas [13].

Tuomet, PID reguliatoriaus koeficientai apskaičiuojami pagal tokį algoritmą [3]:

$$K_p = \frac{1.2T_G}{(T_U + T_O)} - \frac{0.3T_G T_O}{(T_U + T_O/2)^2} \quad (1.14)$$

$$K_I = \frac{0.6T_G T_O}{K(T_U + T_O/2)^2} \quad (1.15)$$

$$K_D = \frac{0.5T_G}{KT_O} \quad (1.16)$$

Diskretizavimo žingsnio reikšmė T_0 gaunama, sudarant diskretinį objekto modelį, kuris naudojamas einamajai išėjimo signalo y reikšmei apskaičiuoti [13].

Skaitmeninio valdymo uždaviniuose naudojamas diskretinis PID reguliatorius. Jis gaunamas, išvestinę keičiant pirmos eilės skirtumu, o integralą – suma (trapecijų metodas). Skaitmeninėse sistemose patogesni yra rekurentiniai algoritmai, kuriais u_k apskaičiuojamas prie ankstesnės signalo reikšmės pridėdam pokytį: $u_k = u_{k1} + \Delta u_k$ [13]. Apie neraiškios logikos reguliatorius bei jų veikimo principą nagrinėjama kitame poskyryje „Neraiškios logikos reguliatorius“.

1.6 Neraiškios logikos reguliatorius

Neraiški logika (angl. fuzzy logic) - tai sprendinio radimo (angl. problem-solving) valdymo sistemos metodologija, kuri suteikia galimybę realizuoti sistemos valdymą tiek paprastoms, mažoms, tiek didelėms sistemoms. Ji gali būti realizuota įvairiai: techninėje, programinėje įrangoje, o taip pat naudojant kombinuotą, abiejų įrangų panaudojimą. Neraiški logika labai tinka tokių sprendimų priėmimui, kur reiškiniai ar procesai yra neaiškūs, dviprasmiški, netikslūs arba paprasčiausiai trūksta informacijos apie juos [21].

Neraiški logika apjungia paprastą taisyklių „JEIGU X IR Y TUOMET Z“ principu pagrįstą sprendinių radimą, priešingai nei tradiciniuose būduose, kuriuose naudojami sistemų matematiniai modeliai. „Fuzzy“ logika yra pagrįsta empiriniu modeliavimu, daugiau priklausanti nuo operatoriaus patirties nei nuo sistemos techninio supratimo. Pavyzdžiui, vietoj terminų apibūdinančių temperatūros valdymą: „SP=250F“, „T<500F“ arba „105° C < Temp < 110°C“, naudoti terminus:

„JEIGU „temperatūra“ yra „žema“ IR „temperatūros pokytis“ yra „mažėja“ TUOMET „regulatoriaus veiksmas“ yra „šildyti“ arba „JEIGU „temperatūra“ yra „aukšta“ IR „temperatūros pokytis“ yra „didėja“ TUOMET „regulatoriaus veiksmas“ yra „vėsinti“ [21].

Šie terminai nėra tikslūs, bet labai išsamūs (angl. descriptive), kas turi iš tikrųjų vykti. Prisiminkime, kas vyksta, kai maudomės duše ir vandens temperatūra yra žema: bandome labai greitai pakeisti vandens temperatūrą prie savo poreikių, patirdami nedidelį diskomfortą. Taigi, neraiški logika geba „atkartoti“ (angl. mimicking) tokio tipo elgesį.

Neraiški logika buvo sugalvota, kaip geresnis rūšiavimo ir duomenų valdymo metodas, bet vėliau buvo įrodyta, kad tai puikus ir daugelio sistemų valdymo būdas [16].

1.6.1 Neraiškių sistemų veikimo principai

Kalbėdami apie neraiškias sistemas, pirmiausia susiduriame su terminais raiški ir neraiški aibė. Raiški arba klasikinė aibė yra lyg tam tikras indas, kuriame yra arba nėra duoto elemento. Sakome „klasikinė aibė“ dėl to, kad gana ilgą laiką buvo manoma, jog egzistuoja tik tokios aibės. O neraiškios aibės elementai gali tik iš dalies priklausyti duotai aibei, t. y. elementų narystė duotai aibei yra tik dalinė. Šiame tyrime naudosime terminus „neraiški aibė“, „neraiški logika“, „neraiški sistema“ ir pan., nes žodis „neraiškus“ gana tiksliai išreiškia angliško termino „fuzzy“ esmę, bet galima naudoti ir lietuvišką terminą „neraiški logika“, „neraiški aibė“ arba anglišką terminą „fuzzy logika“, „fuzzy aibė“. Neraiškių aibių pradininku laikomas L. A. Zadehas, kuris pirmasis 1965 m.

aprašė šios logikos teorijos pagrindus. 1976 m. E. Mamdani ir jo vadovaujama tyrinėtojų grupė pirmieji pritaikė neraiškia logiką procesams valdyti, o 1980 m. tai buvo panaudota energetikoje išskylančioms problemoms spręsti. Dabar neraiškios valdymo sistemos plačiai naudojamos įvairiems sudėtingiems procesams valdyti laivų navigacijoje, elektros energetikoje, gamyboje ir daugelyje kitų sričių, įvairiose buitinėse mašinose ir prietaisuose, pavyzdžiui, skalbimo mašinose skalbimo programai parinkti atsižvelgiant į skalbinių audinio rūšį, svorį, nešvarumų kiekį, televizoriuose vaizdo šviesumui, kontrastui, spalvų sodrumui automatiškai reguliuoti, fotoaparatuose vaizdo ryškumui automatiškai nustatyti, automobiliuose pastoviam greičiui palaikyti, pavarai automatiškai perjungti priklausomai nuo variklio apkrovos ir t. t [21]. Neraiškūs valdymo metodai paremi neraiškiomis aibėmis, bei veiksmais su jomis. Dabar gana plačiai taikomos dvi raiškių procesų valdymo neraiškios sistemos: Mamdani ir Sugeno. Neraiški raiškių procesų valdymo sistema atlieka šias pagrindines operacijas: 1) raiškius įėjimų dydžius transformuoja į neraiškias aibes (fuzifikacijos operacija), 2) pagal įėjimų dydžių neraiškias aibes, remiantis tam tikromis taisyklėmis, daro išvadas, kurių rezultatas yra neraiški aibė ir atitinkama jos priklausomumo funkcija (inferencijos operacija) ir 3) pagal išėjimų priklausomumo funkcijas apskaičiuoja raiškių išėjimų dydžių vertes (defuzifikacijos operacija) [21].

Pati fuzifikacijos operacija abiejose neraiškiose sistemose atliekama tokiu būdu: 1) raiškūs įėjimų dydžiai transformuojami į lingvistinius kintamuosius; 2) panaudojant parinktas priklausomumo funkcijas, suformuojamos atitinkamos neraiškios aibės kiekvienam įėjimų kintamajam. Priklausomumo funkcijos gali būti labai skirtingo pavidalo – trikampio, trapecijos, S raidės formos ir pan. Nuo priklausomumo funkcijų pavidalo tam tikru mastu priklauso visos neraiškios sistemos savybės.

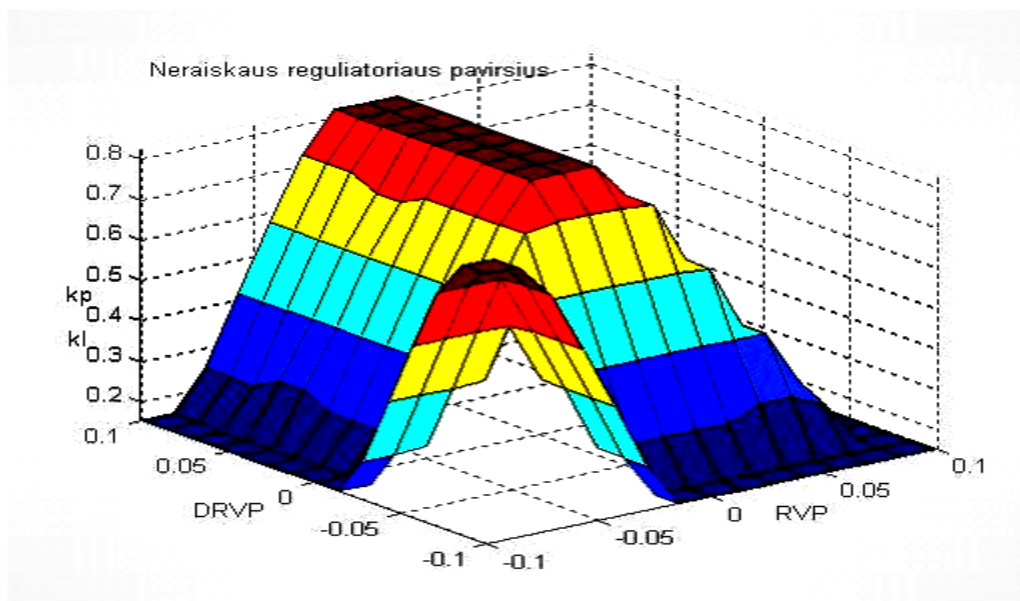
Neraiškios sistemos sprendimų darymas (inferencija) remiasi neraiškia logika, kuri yra panaši į raiškia logiką. Jos taisyklių bazę sudaro tokio pavidalo taisyklės:

$JEIGU \tilde{e}_1 YRA \tilde{E}_1 IR \tilde{e}_2 YRA \tilde{E}_2 IR..IR \tilde{e}_n YRA \tilde{E}_n, TUOMET \tilde{u}_1 YRA \tilde{U}_1 \dots, \tilde{u}_m YRA \tilde{U}_m$. Čia $\tilde{e}_1, \tilde{e}_2, \dots, \tilde{e}_n, \tilde{u}_1, \dots, \tilde{u}_m$ yra atitinkamų įėjų ir išėjų lingvistiniai kintamieji, o $\tilde{E}_1, \dots, \tilde{E}_n, \tilde{U}_1, \dots, \tilde{U}_m$ yra atitinkamų lingvistinių kintamųjų neraiškios reikšmės. Taisyklėse gali būti naudojamos taip pat loginės operacijos arba ir ne. Operacija ir (aibių sąjunga) dažniausiai realizuojama naudojant min (minimizavimo) funkciją, operacija arba (aibių sankirta) – naudojant max (maksimizavimo) funkciją, o operacija ne a (aibės paneigimas) – naudojant $1-a$ [21].

Dviejų įėjimų kintamųjų atveju, kai kiekvienas įėjimo kintamasis gali įgauti tris lingvistines vertes, pvz. neigiama (NG), nulinė (NU) ir teigiama (TG), o išėjimo lingvistinis kintamasis – lingvistines vertes mažas (M) ir didelis (D), taisyklių bazė glaustai užrašoma 1.1 lentelės pavidalu. Sudėtingų objektų neraiškaus valdymo sistemose gali būti naudinga ir tokia taisyklė: jeigu paklaida

e yra nu ir de/dt yra nu ir e yra mažėjanti, tuomet nedaryti nieko. Kitais būdais įgyvendinti panašų valdymo dėsnį būtų sunku. Mamdani tipo sistemos išvada yra neraiški, kurios neraiškias aibes daro iš įėjimo neraiškių aibių agregavimo operatoriaus, t. y. visų taisyklių loginių teiginių darinys į Mamdani neraiškia išvada, o pastaroji yra defuzifikuojama į raiškų dydį. Šį išvadų darymo metodą 1975 m. pasiūlė E. H. Mamdani. Sugeno išvada taip pat yra neraiški, kurioje kiekvienos taisyklės teiginys yra visų įėjimų tiesinis darinys, o išėjimas yra visų taisyklių teiginių tiesinis darinys. Šį metodą 1985 m. pasiūlė M. Sugenas. Pagrindinis Sugeno ir Mamdani išvados skirtumas yra tas, kad Sugeno išvados priklausomumo funkcijos yra arba tiesinės įėjimų priklausomumo funkcijų atžvilgiu arba pastovios. Sugeno neraiški sistema yra kompaktiškesnė ir skaičiavimo prasme efektyvesnė už Mamdani sistemą, ji gerai tinka adaptyviems modeliams sudaryti ir netiesinėms sistemoms modeliuoti. Mamdani sistema turi kitų privalumų. Ji yra labiau intuityvi, geriau tinka žmogaus teikiamiems duomenims, plačiai taikoma praktikoje [21].

Sprendinys arba išvada (inferencija) gaunama išėjimo lingvistinių kintamųjų priklausomumo funkcijų pavidalo. Konkretiems, t. y. raiškiems išėjimo dydžiams gauti Mamdani neraiški sistema paprastai naudoja svorio centro (centroid) arba maksimumo vidurio metodus. Svorio centro metodas yra labiausiai paplitęs raiškaus sprendinio apskaičiavimo metodas. Čia sprendinys yra išėjimo neraiškios aibės priklausomumo funkcijos svorio centras. Maksimumo vidurio metodas taip pat dažnai taikomas praktikoje dėl paprastesnio skaičiavimo. Sugenas neraiškiose sistemose naudoja pasvertų vidurkių ir pasvertų sumų metodus. Neraiškios valdymo sistemos veikimas detaliau bus paašškintas nagrinėjant konkretų pavyzdį. Čia tik pažymėsime, kad ką tik aprašyti neraiškūs reguliatoriai iš esmės priklauso raiškių valdymo sistemų klasei ta prasme, kad raiškius įėjimo kintamuosius dydžius atitinkamai transformuoja į raiškius išėjimo kintamuosius dydžius. Šio tipo neraiški sistema bendru atveju yra netiesinė beinericinė sistema, kurios charakteristika dviejų įėjimo kintamųjų atveju atvaizduojama grafiškai paviršiaus pavidalu (1.12 pav.).



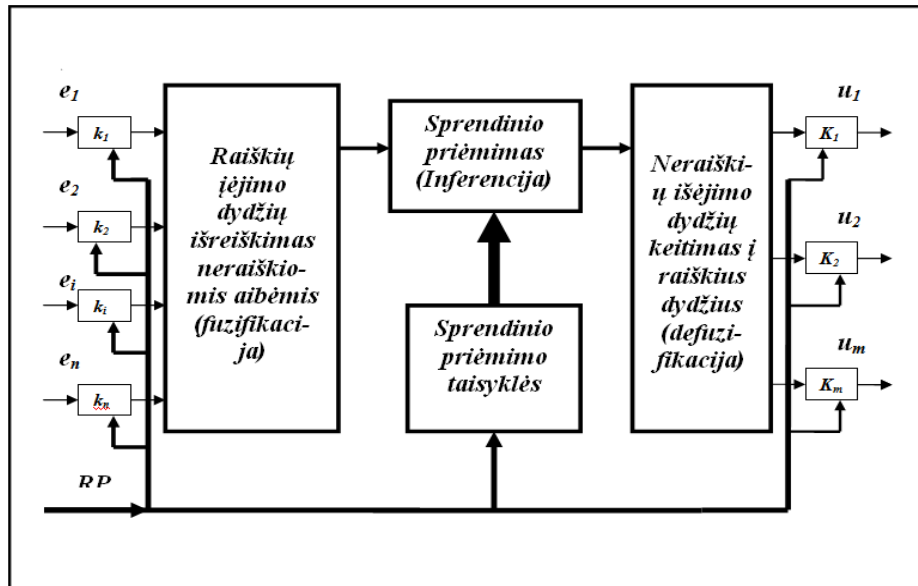
1.12 pav. Neraiškaus regulatoriaus paviršius, kuris grafiškai vaizduoja ryšį tarp įėjų RVP, ΔRVP (Grafike $\Delta RVP = DRVP$) ir išėjų k_P ir k_I . Neraiškus reguliatorius yra Mamdani tipo, defuzifikacija atliekama centroido metodu [21].

Neraiškių valdymo sistemų privalumus galima apibūdinti taip: 1. Neraiškia logiką lengva suprasti, nes formuluojamos valdymo taisyklės yra lingvistinės. 2. Galima naudoti netikslus duomenis. 3. Ji suteikia daugiau alternatyvų pasirenkant valdymo tikslus. 4. Leidžia geriau įvertinti diagnostikos simptomų ir priežasčių dviprasmiškumus. 5. Neraiškūs modeliai gali remtis ekspertų sukauptomis žiniomis apie sistemą, jo patirtimi ir netgi intuicija. 6. Daugeliu atvejų neraiškūs valdymo modeliai papildo įprastinius. Žinoma, neraiškios valdymo sistemos turi ir trūkumų – nėra teoriškai apibrėžtas optimalus taisyklių skaičius, nėra aiškos metodikos, kaip pateikti turimas žinias ir patirtį apie objektą ir valdymo sistemą, neraiškios valdymo sistemos suderinimas užima nemažai laiko [21]

Bendru atveju valdomas objektas gali turėti daug įėjimų ir išėjimų, todėl dydžiai e , u ir y yra vektoriai. Čia ir toliau paveiksluose keturkampiai vaizduoja sistemos atskiras dalis, pvz. reguliatorių, valdymo objektą ir t. t., o rodyklės rodo kintamųjų dydžių arba signalų veikimo kryptį. Tiesioginio valdymo sistemos naudojamos tada, kai sąryšis tarp valdomo objekto įėjimų u ir išėjimų y yra gerai žinomas ir kai objekto išėjimus neveikia vidiniai ir išoriniai trikdžiai. Jų privalumas yra tas, kad jos yra stabilesnės už grįžtamojo ryšio valdymo sistemas, t. y. jų išėjos dydis neturi polinkio švytuoti arba stipriai nukrypti į kurią nors pusę. Grįžtamojo ryšio valdymo sistemų privalumas yra tas, kad grįžtamasis ryšys sumažina visos valdymo sistemos jautrumą išoriniams bei vidiniams trikdžiams, jeigu tinkamai parinkta regulatoriaus struktūra ir parametrai. Sudėtingose valdymo sistemose grįžtamasis ryšys, kai kada naudojamas kartu su tiesioginiu valdymu [21]. Yra daug galimų šių dviejų valdymo principų panaudojimo būdų, tačiau dažniausiai naudojamas valdymo signalų sumavimas. Tai gana paprastas ir efektyvus dviejų valdymo principų panaudojimo būdas.

Valdymo objekto statinės ir dinaminės savybės gali keistis laikui bėgant. Kartu gali atitinkamai keistis ir valdymo objekto matematinio modelio struktūra ir parametrai, o dėl to gali pablogėti ir valdymo kokybė, nes regulatoriaus struktūra ir parametrai turi atitikti valdymo objekto matematinį modelį. Dėl šių priežasčių prireikė turėti adaptyvųjį reguliatorių, galintį prisitaikyti prie kintančios valdomo objekto matematinio modelio struktūros ir kintančių parametru. Iš adaptyvaus neraiškaus regulatoriaus (1.13 pav.) schemas matyti, kad šio regulatoriaus valdomi parametrai RP yra raiškių įėjimo ir išėjimo kintamųjų dydžių stiprinimo koeficientai k_1, k_2, \dots, k_n bei K_1, K_2, \dots, K_m ir išvadų (sprendimų) darymo taisyklės. Adaptyvūs reguliatoriai gali būti tiesioginio ir netiesioginio veikimo, kurių adaptacija yra atitinkamai tiesioginė ir netiesioginė. Regulatoriaus parametru keitimo ir koregavimo principai remiasi valdomo objekto identifikavimu ir regulatoriaus parametru RP

perskaičiavimu, panaudojant identifikavimo metu gautus objekto parametrų įverčius VOP (1.13 pav.), arba valdant tiesiogiai reguliatoriaus parametrus taip, kad valdymo paklaida e būtų kiek galima mažesnė (1.14 pav.). Paprasčiausia neraiški adaptyvi reguliavimo sistema gaunama tada, kai į valdymo sistema įvedamas netiesinis įtaisas, kurio netiesinė charakteristika garantuoja reikiamą reguliatoriaus parametrų keitimą arba koregavimą [21].

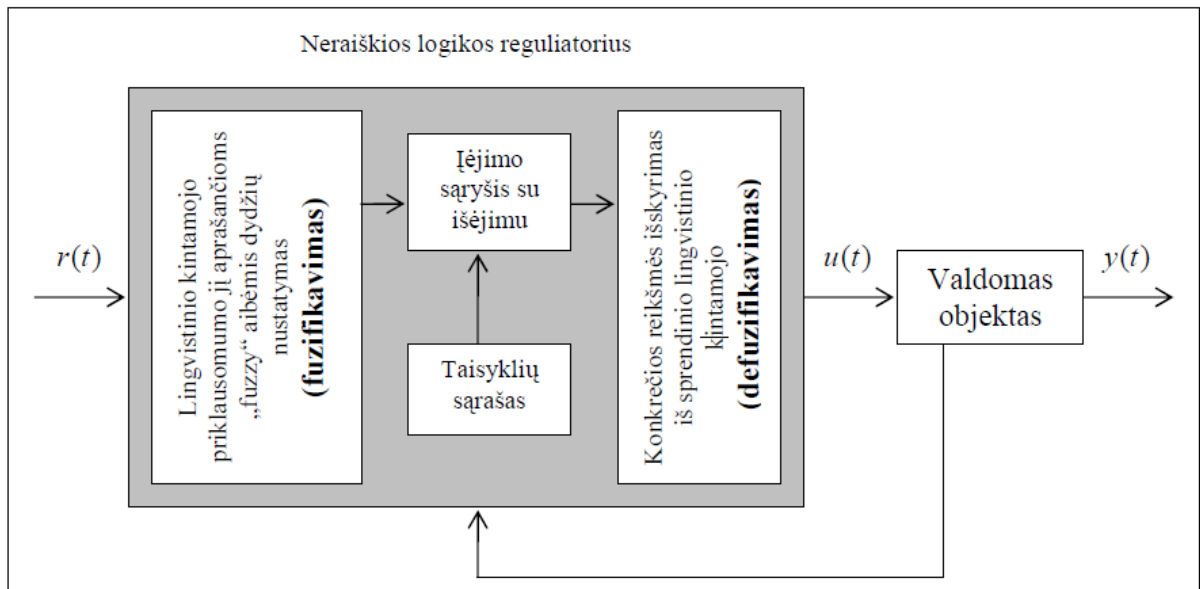


1.13pav. Neraiškaus adaptyvaus reguliatoriaus schema: e_1, e_2, \dots, e_n – raiškūs įėjimo dydžiai, kurie dauginami atitinkamai iš adaptacijos koeficientų k_1, k_2, \dots, k_n ; raiškūs išėjimo dydžiai, padauginami atitinkamai iš adaptacijos koeficientų K_1, K_2, \dots, K_m , duoda rezultatus u_1, u_2, \dots, u_m ; RP – neraiškaus reguliatoriaus valdomi adaptacijos parametrai – sprendinio priėmimo taisyklės ir stiprinimo koeficientai k_1, k_2, \dots, k_n ir K_1, K_2, \dots, K_m [21].

Neraiškia logika pagrįstas valdymas

Neraiškaus reguliatoriaus blokinė diagrama pateikta 1.14 pav. Čia neraiškios logikos reguliatorius pavaizduotas, kaip valdymo sistemos su grįžtamoju ryšiu dalis. Neraiškios logikos reguliatorių sudaro tokios 4 pagrindinės komponentės [5]:

1. Reguliatoriaus žinių bazė. sudaryta iš taisyklių, kaip valdyti sistemą;
2. Įėjimo sąryšio su išėjimu mechanizmo, įvertinančio, kurios taisyklės iš žinių bazės turi būti įtrauktos esamu laiko momentu į sprendinio skaičiavimą ir suformuojantis išėjimo kintamąjį aprašančias neaiškias aibes;
3. Fuzikavimas, lingvistinio kintamojo priklausomumo jį aprašančioms „fuzzy aibėmis dydžių nustatymas“;
4. Defuzifikavimas, konkretaus rezultato, valdančiojo poveikio suformulavimas.



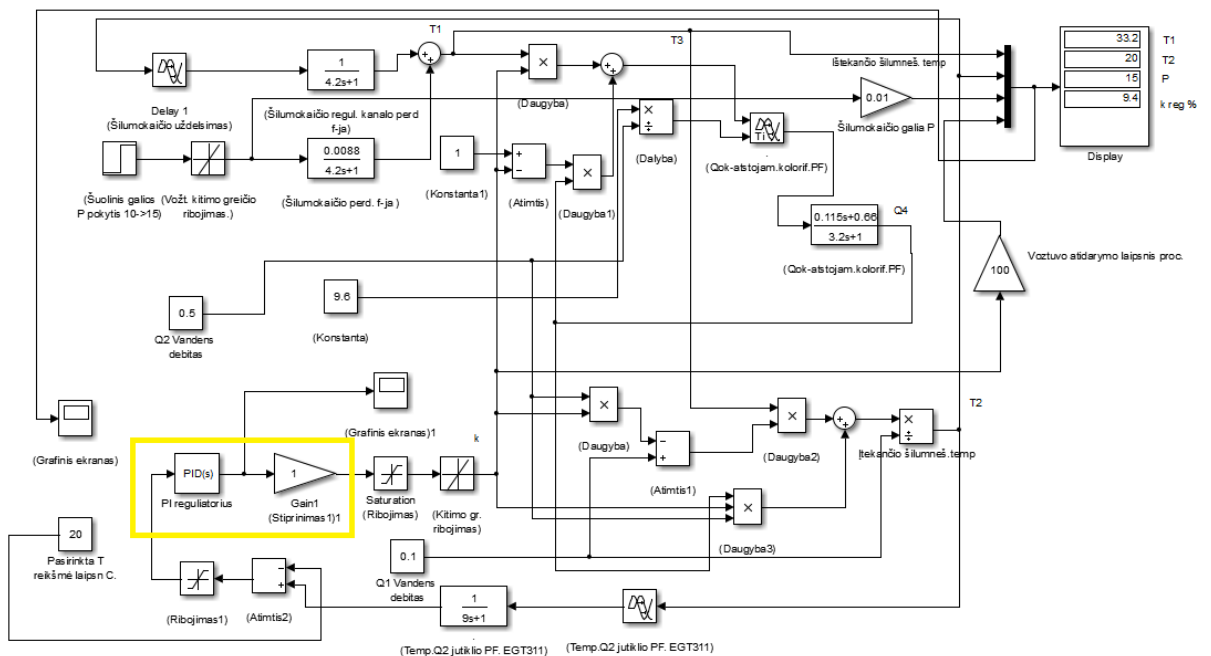
1.14 pav. Neraiškos logikos reguliatoriaus architektūra[5]

2. ŠILUMOKAIČIO TEMPERATŪROS VALDYMAS NAUDOJANT PID REGULIATORIŲ

2.1 Modelio sudarymas naudojant PID reguliatorių

Atsižvelgiant į tai, kad literatūros apžvalgoje analizuotas modelis nebuvo pilnai atskleistas, vadovaujantis pateikta informacija ir atliktais modeliavimo tyrimais, sudaromas Simulink programos modelis, kuris pateiktas (2.1 pav.) ir realiausiai atitinka aprašytą sistemą.

Modelį sudaro du šilumokaičio cirkuliaciniai kontūrai: šilumos šaltinio – kondensacinio šilumokaičio kontūras, kuriame debitas yra Q_1 , ir šilumos vartotojo – kaloriferio kontūras, kuriame debitas Q_2 . Parenkant reguliatorių, siekiama sudaryti stabilų sistemos veikimą. Reguliavimo kokybei nustatyti, naudojami klasikiniai automatinio reguliavimo rodikliai, tokie kaip: perreguliavimas, reguliavimo stabilumas, pereinamojo proceso trukmė. PID reguliatoriaus išėjimo signalas valdo vožtuvo sklendės padėtį. PID reguliatorius (2.1 pav.) apibrėžtas spalvotu kontūru.



2.1 pav. Kondensacinio šilumokaičio temperatūros reguliavimo sistemos modelis su PID reguliatoriumi

Modelyje šilumokaitis realizuojamas kaip „juodoji dėžė“, nedetalizuojant jo vidinės struktūros. Šis pasirinkimas padidina jo universalumą ir supaprastina modelio sudarymą. Šilumokaičio laiko pastovioji pagal (1.5) lygtį, kai vandens debitas $Q_1 = 0,1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, $T_{KS} = 4,2 \text{ s}$, perdavimo

koeficientas $K_{KS} = 0.088 \text{KW}^{-1}$ ir uždelsimas $\tau_{KS} = 4,4$ s. Programoje Simulink šilumokaitis modeliuojamas atitinkamais perdavimo funkcijų ir transportinio uždelsimo blokais [3].

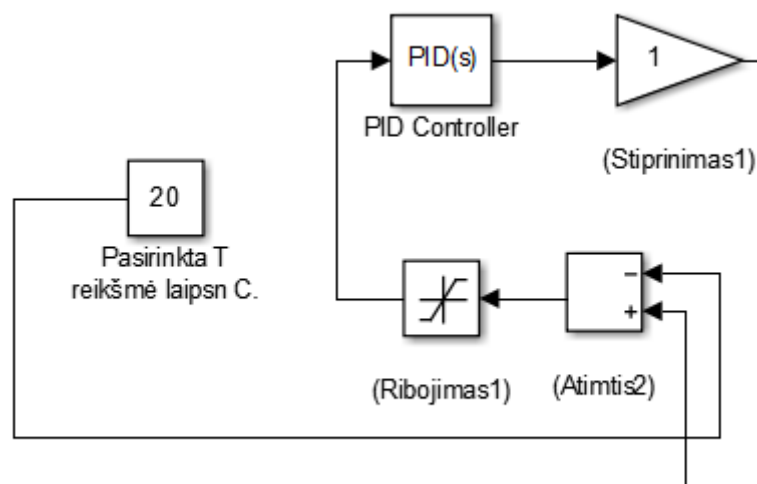
Kaloriferis modeliuojamas lygiagrečiai sujungtomis pirmojo laipsnio inercine ir beinercine grandimis, turinčiomis bendrą uždelsimą. Temperatūros jutiklis modeliuojamas, kaip pirmojo laipsnio inercinė grandis su uždelsimu.

Vožtuvo eigos trukmė yra 150 s, todėl modelyje įvedamas vožtuvo kitimo greičio ribojimas $1/150 \text{ s}^{-1}$. Norint išlaikyti Q_1 ir Q_2 debitų pastovumą modelyje įvedamas reguliatoriaus signalo ribojimas $Y \leq Q_1/Q_2$ [3].

Sistemos pereinamieji procesai modeliuojami sudarant kondensaciniam šilumokaičiui šuolinį galios P pokytį. Sudaromas šuolinis galios P pokytis nuo 1000 W iki 1500 W, užduota temperatūros Θ_2 reikšmė $\Theta_{20} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, reguliatoriaus rodikliai $K_{RG} = 0,004 \text{ K}^{-1}$ ir $T_{RG} = 12$ s.

2.2 PID reguliatoriaus projektavimas

Modeliavimo metu parenkant reguliatoriaus rodiklius K_{RG} ir T_{RG} siekiama sudaryti stabilų ir maksimaliai kokybišką sistemos veikimą. Reguliavimo kokybei įvertinti taikomi „klasikiniai“ automatinio reguliavimo kokybės rodikliai: reguliavimo stabilumas, perreguliavimas, pereinamojo proceso trukmė [3]. Reguliatoriaus Simulink modelio fragmentas pateikiamas 2.2 pav.



2.2 pav. Reguliatoriaus Simulink modelio fragmentas

Projektuojamas reguliatorius, kaip proporcinis - integralinis (PI), jo perdavimo funkcija:

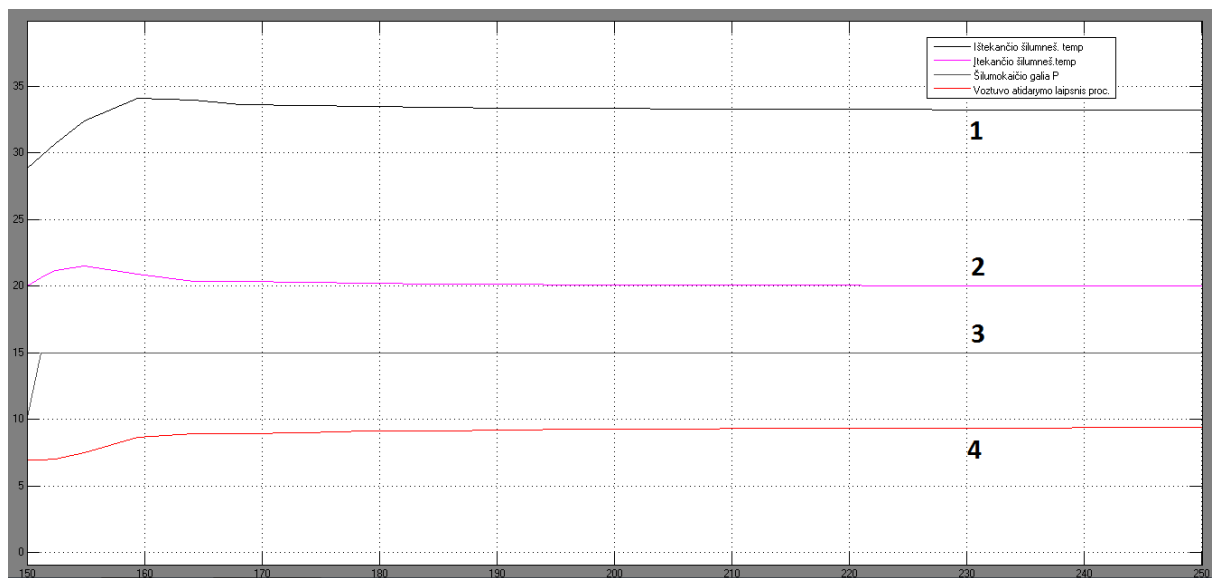
$$W_{RG}(s) = K_{RG} \left(1 + \frac{1}{T_{RG}s} \right) \quad (2.1)$$

Čia: K_{RG} – regulatoriaus proporcingumo koeficientas, K-1;
 T_{RG} – regulatoriaus integravimo laiko pastovioji, s.

Derinant reguliatorių, buvo naudojamas rankinis derinimo algoritmas. Visų pirma užnulinamas I grandies koeficientas, o P grandies koeficientas yra didinamas tol, kol išėjimo signalas pradeda švytuoti. Tada P grandies koeficiento reikšmė dalijama pusiau. I grandies koeficientas yra didinamas tol, kol per tam tikrą laiką objektas pasiekia savo norimas reikšmes. Per didelę I reikšmę iššaukia staigų atsaką bei peršokimus [2].

Laikant, kad Q1 šilumnešio (vandens) debitas $0.1 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$, Q2 šilumnešio (vandens) debitas $0.5 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ ir pasirinkta temperatūra 20°C , reguliatorius suderinamas, kai P grandies koeficientas yra 0.015, o I grandies koeficientas 0.001.

Sistema modeliuojama sudarant kondensaciniam šilumokaičiui suteikiamos galios P pokytį. Sistemos modeliavimo rezultatai atvaizduoti (2.3pav.), kai sudaromas šuolinis galios pokytis nuo 1000 W iki 1500 W, pasirinkta temperatūros reikšmė $T=20^\circ\text{C}$, $Q1=0.1 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$, $Q2=0.5 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ ir regulatoriaus parametrai $P=0.015$ ir $I=0.001$.

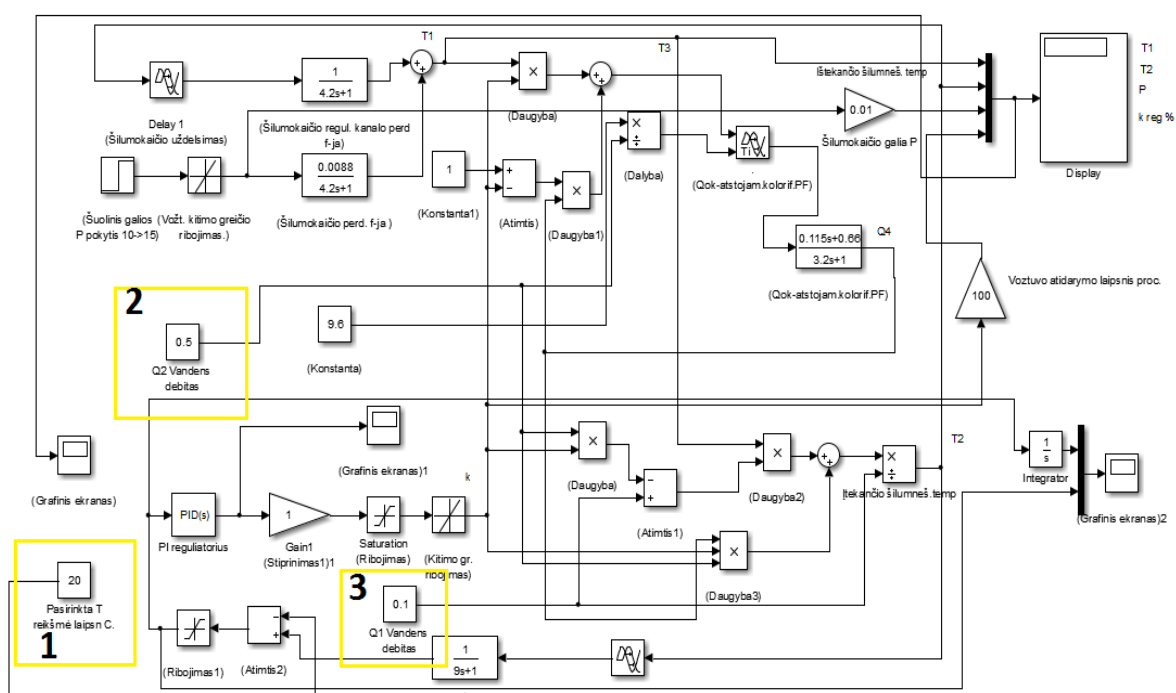


2.3 pav. Sistemos su PI reguliatoriumi modeliavimo rezultatai. 1- ištekančio šilumnešio temperatūra $^\circ\text{C}$; 2- įtekančio šilumnešio temperatūra; 3- šilumokaičio galia P; 4- vožtuvo atidarymo laipsnis, proc.

2.3 Reguliavimo kokybė keičiant užduotos temperatūros reikšmę, bei debitus Q1 ir Q2

2.3.1 Keičiama užduotos temperatūros reikšmė T °C

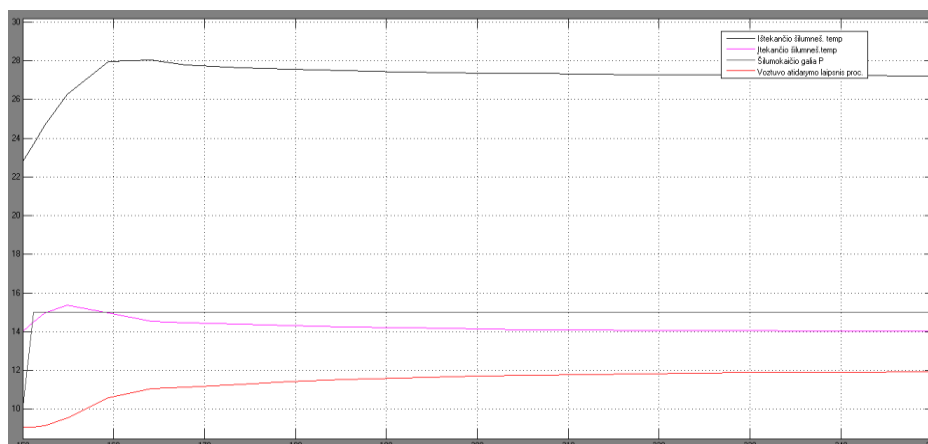
Keičiama pasirinktos temperatūros reikšmė T °C nuo 14 °C iki 30 °C, o debito reikšmės nustatomos pastovios, tai yra $Q1 = 0.1 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ ir $Q2 = 0.5 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$. Siekiama įvertinti, kaip PI reguliatorius veikia keičiant pasirinktą temperatūrą ir kokie yra reguliavimo rodikliai, tokie kaip: pereinamojo proceso trukmė, perreguliavimas, bei reguliavimo stabilumas. Keičiami modelio parametrai parodyti žemiau esančiame paveiksle (2.4 pav)



2.4 pav. Kondensacinio šilumokaičio temperatūros reguliavimo sistemos parametų keitimas. 1 – Užduota temperatūra, 2 – Q2 šilumnešio debitas, 3 – Q1 šilumnešio debitas

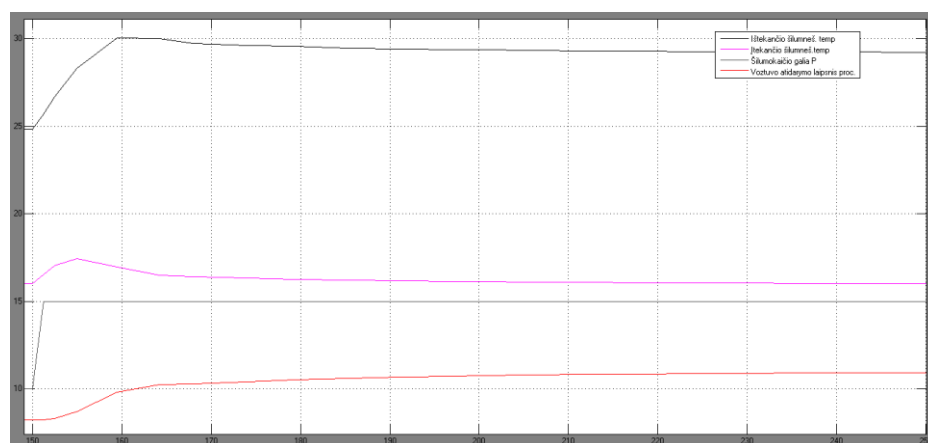
Bandymo metu siekiama nustatyti reguliatoriaus reguliavimo diapazoną didinant ir mažinant pasirinktą temperatūrą. Sistemos dinamikos rodikliai, palaipsniui keičiant pasirinktą temperatūrą atvaizduoti žemiau esančiuose paveiksluose.

Kai užduota temperatūra nustatoma 14 °C:



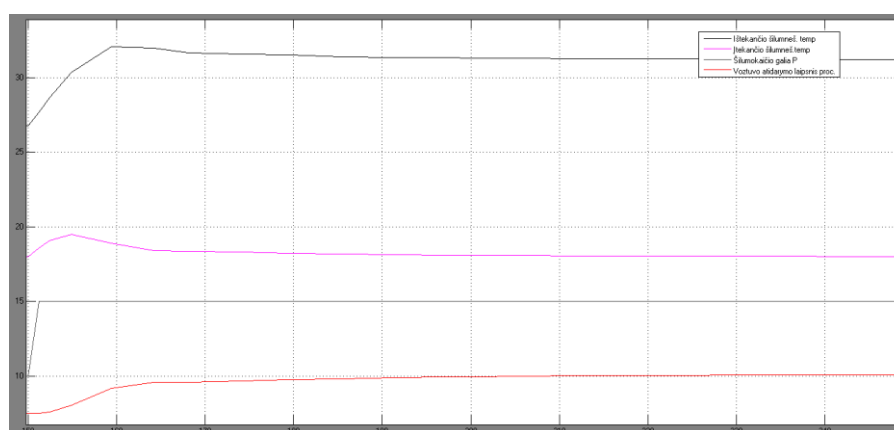
2.5 pav. T °C užduota 14 °C

Pasirinkta temperatūra 16 °C:



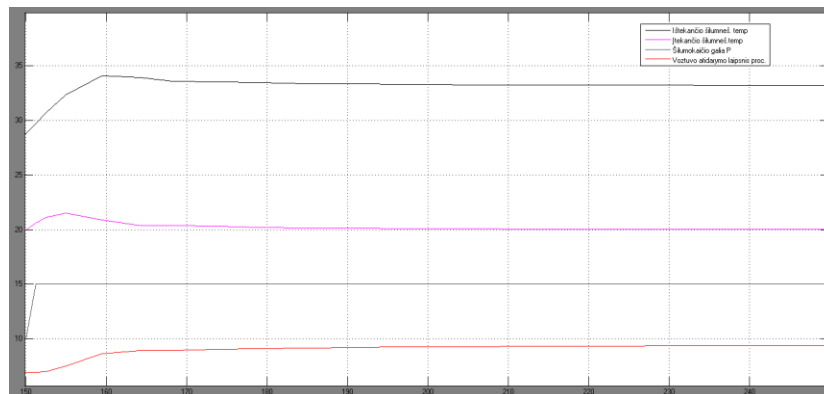
2.6 pav. T °C užduota 16 °C

Pasirinkta temperatūra 18 °C:



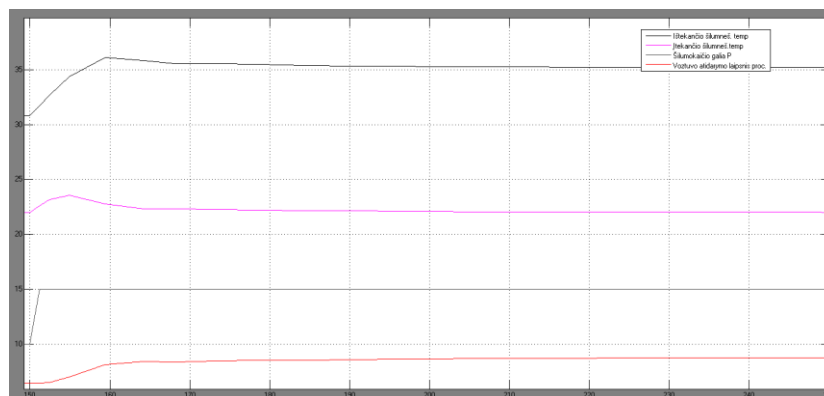
2.7 pav. T °C užduota 18°C

Pasirinkta temperatūra 20 °C:



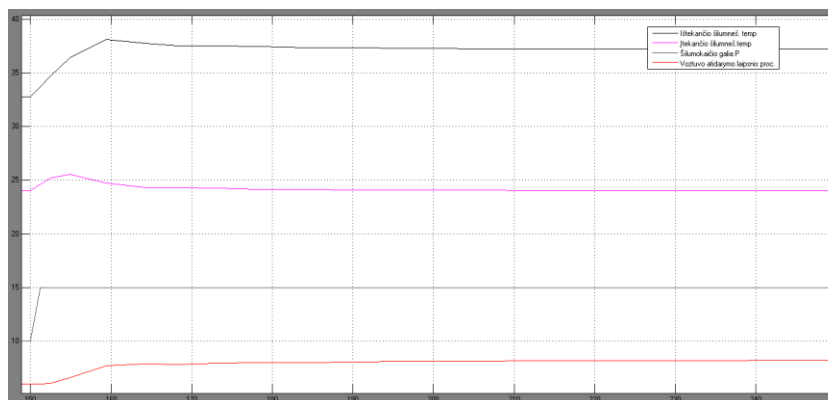
2.8 pav. T °C užduota 20°C

Pasirinkta temperatūra 22 °C:



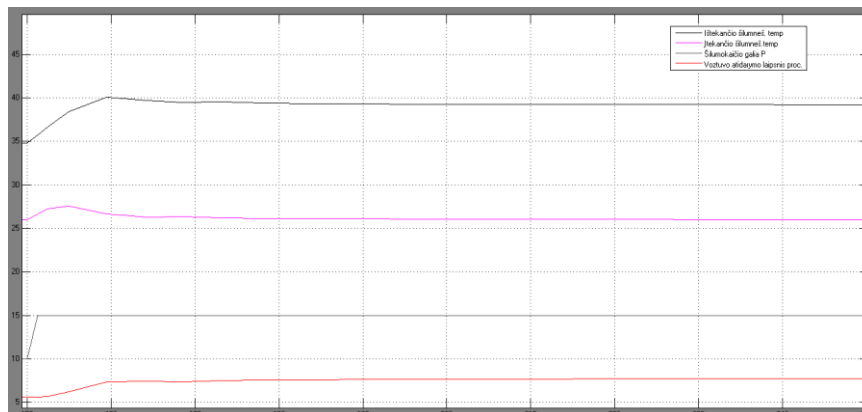
2.9 pav. T °C užduota 22°C

Pasirinkta temperatūra 24 °C:



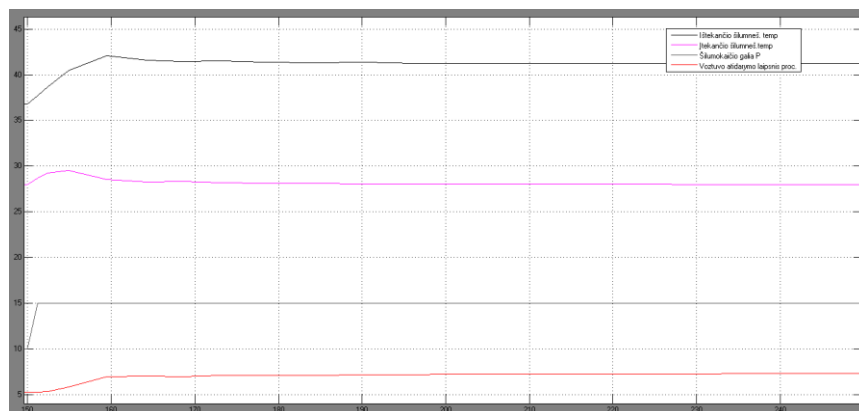
2.10 pav. T °C užduota 24°C

Pasirinkta temperatūra 26 °C:



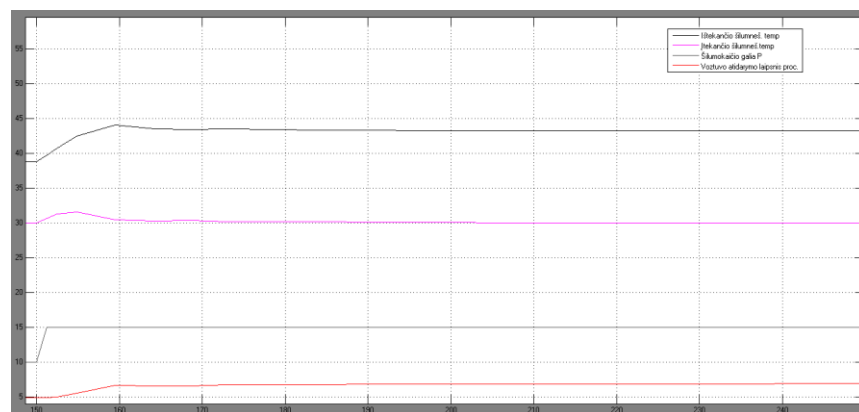
2.11 pav. T °C užduota 26°C

Pasirinkta temperatūra 28 °C:



2.12 pav. T °C užduota 28°C

Pasirinkta temperatūra 30 °C:

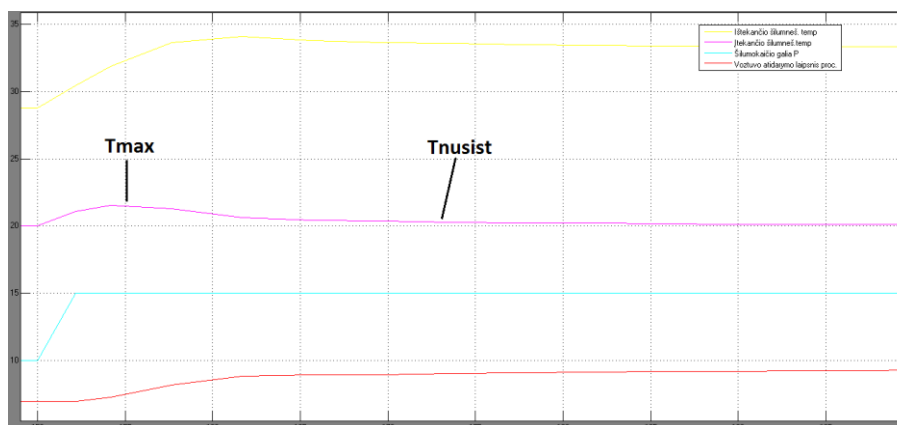


2.13 pav. T °C užduota 30°C

Remiantis reguliavimo rodikliais gautais iš kreivių, pagal formulę (2.3) apskaičiuojamas perreguliavimas ir nusistovėjimo laikas. Gauti rezultatai pateikiami (2.1 lentelėje).

$$\sigma = \frac{T_{\max} - T_{\text{nusist}}}{T_{\text{nusist}}} * 100\% \quad (2.2)$$

T_{\max} ir T_{nusist} reikšmės pateikiamos (2.14) paveiksle.



2.14 pav. Temperatūros pasiekta didžiausia reikšmė (T_{\max}) ir temperatūros nusitovėjimas (T_{nusist}), kai nustatyta temperatūra $T = 20^{\circ}\text{C}$

Remiantis (2.3) pateikta formule, apskaičiuojama perreguliavimo reikšmė, kai $T = 20^{\circ}\text{C}$ nustatomos T_{\max} ir T_{nusist} reikšmės ir jos įrašomos į formulę, o gauti atsakymai pateikti žemiau esančioje (2.1) lentelėje.

$$\sigma = \frac{T_{\max} - T_{\text{nusist}}}{T_{\text{nusist}}} * 100\% = \frac{21.5 - 20}{20} * 100 = 7.5\% \quad (2.3)$$

Palaispniui didinant ir mažinant užduotą temperatūrą, analogiškai skaičiuojame pagal anksčiau minėtą formulę (2.3) ir gautus rezultatus surašome į (2.1) lentelę.

2.1 lentelė. Tyrimo rezultatai keičiant temperatūrą

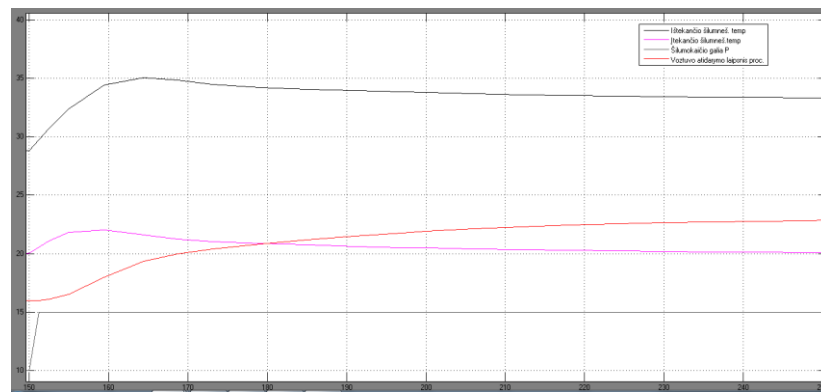
| T^0, C | Q1 | Q2 | σ (%) | Tr (s) | V. atidar. laipsnis % |
|-----------------|-----|-----|--------------|--------|-----------------------|
| 14 | 0.1 | 0.5 | 9.8 | 30 | 11,96 |
| 16 | 0.1 | 0.5 | 9.06 | 25 | 10,96 |
| 18 | 0.1 | 0.5 | 8.3 | 20 | 10,13 |
| 20 | 0.1 | 0.5 | 7.5 | 17 | 9,39 |
| 22 | 0.1 | 0.5 | 6.8 | 15 | 8,77 |
| 24 | 0.1 | 0.5 | 6.25 | 12 | 8,22 |
| 26 | 0.1 | 0.5 | 5.76 | 12 | 7,74 |
| 28 | 0.1 | 0.5 | 5.39 | 10 | 7,31 |
| 30 | 0.1 | 0.5 | 5 | 10 | 6,9 |

2.3.2 Keičiama debito Q2 reikšmė

Pasirinktos temperatūros reikšmė T °C nustatoma 20°C , o debito Q_2 reikšmė keičiama nuo $0.25 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ iki $0.7 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$. Debitas Q_1 modelyje nustatomas $0.1 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$. Siekiama įvertinti, kaip pasirinktas reguliatorius veikia prie keičiamos Q_2 debito reikšmės ir kokie sistemoje pasireiškia reguliavimo rodikliai. Keičiami modelio parametrai nurodyti anksčiau minėtame (2.4 pav) paveiksle.

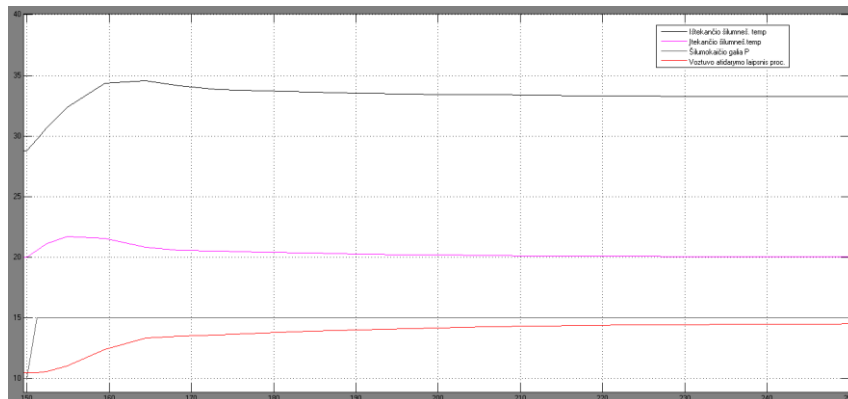
Reguliavimo rodikliai, palaipsniui keičiant debito Q_2 reikšmę atvaizduoti žemiau esančiuose paveiksluose.

Kai debito Q_2 reikšmė modelyje nustatoma $0.25 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$:



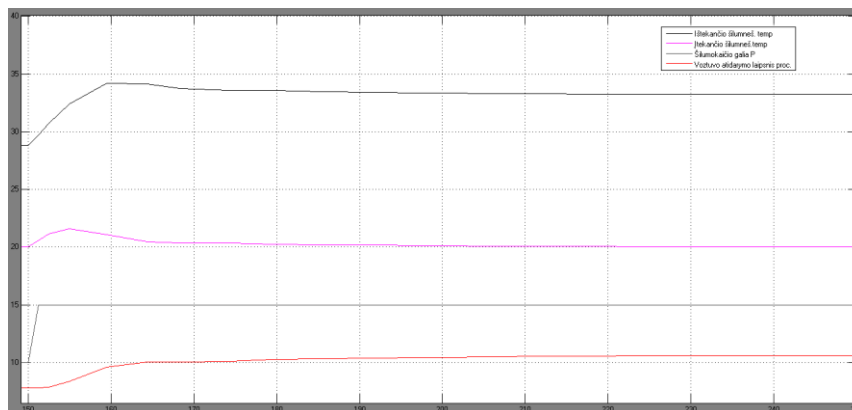
2.16 pav. Debito Q_2 reikšmė $0.25 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$

Debito Q_2 reikšmė modelyje nustatoma $0.35 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$:



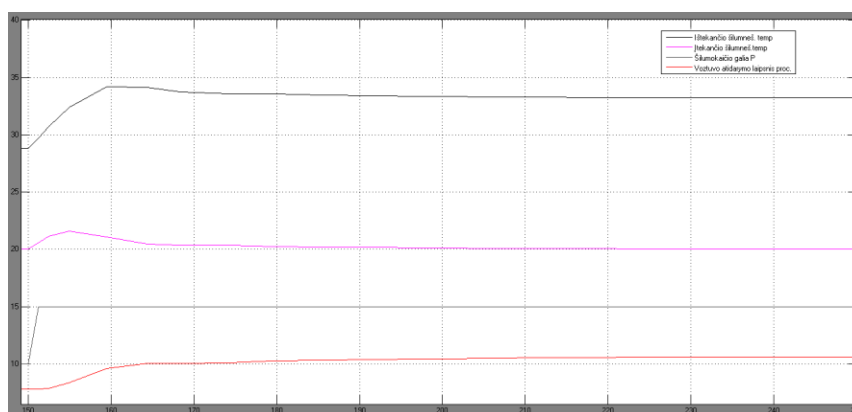
2.17 pav. Debito Q_2 reikšmė $0.35 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$

Debito Q2 reikšmė modelyje nustatoma $0.45 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$:



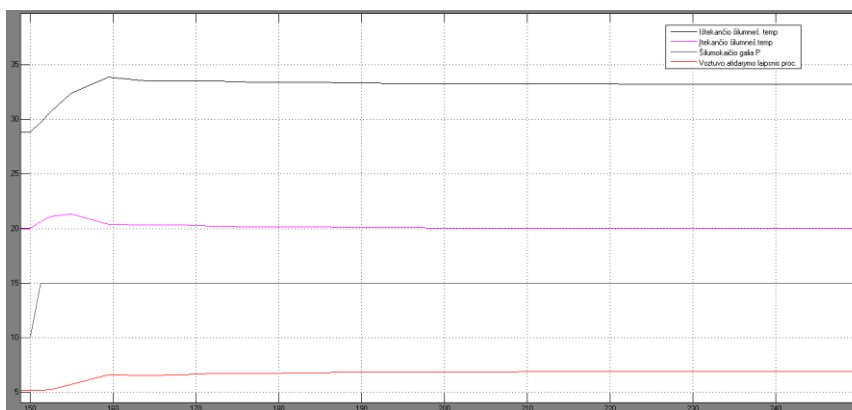
2.18 pav. Debito Q2 reikšmė $0.45 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$

Debito Q2 reikšmė modelyje nustatoma $0.55 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$:



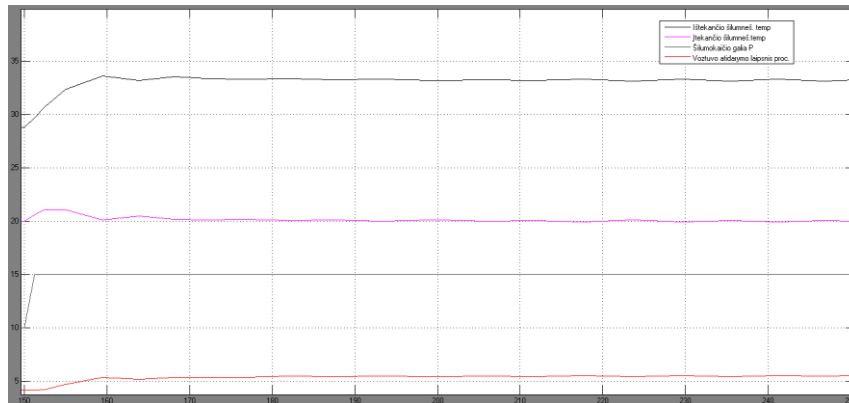
2.19 pav. Debito Q2 reikšmė $0.55 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$

Debito Q2 reikšmė modelyje nustatoma $0.65 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$:



2.20 pav. Debito Q2 reikšmė $0.65 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$

Debito Q2 reikšmė modelyje nustatoma $0.75 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$:



2.21 pav. Debito Q2 reikšmė $0.75 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$

Remiantis jau anksčiau pateikta(2.3) formule, apskaičiuojama perreguliavimo reikšmė, kai $T=20^\circ\text{C}$, $Q1=0.1 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$, o $Q2$ reikšmė keičiama nuo $0.25 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ iki $0.75 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$. Nustatytos T_{max} ir T_{nusist} reikšmės įrašomos į formulę, o gauti atsakymai pateikti žemiau esančioje lentelėje.

2.2 lentelė. Tyrimo rezultatai keičiant $Q2$ debito reikšmes

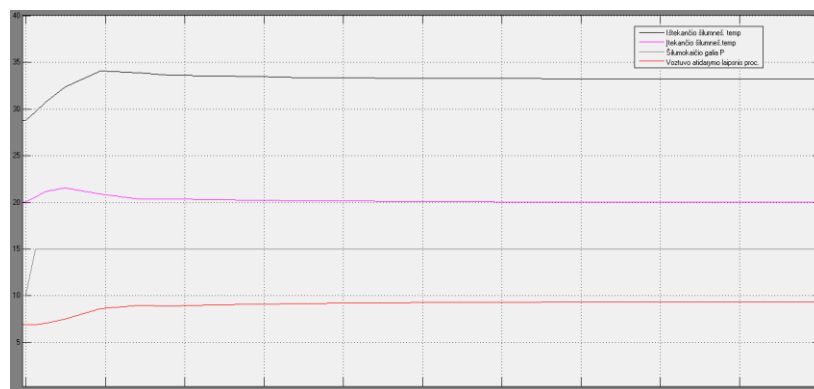
| T^0, C | $Q1$ | $Q2$ | $\sigma (\%)$ | $T_r (\text{s})$ | V. atidar. laipsnis % |
|-----------------|------|------|---------------|------------------|-----------------------|
| 20 | 0.1 | 0.25 | 10 | 56 | 23.01 |
| 20 | 0.1 | 0.3 | 9.2 | 41 | 17.84 |
| 20 | 0.1 | 0.35 | 8.85 | 31 | 14.57 |
| 20 | 0.1 | 0.4 | 8.5 | 24 | 12.32 |
| 20 | 0.1 | 0.45 | 8 | 20 | 10.66 |
| 20 | 0.1 | 0.5 | 7.65 | 15 | 9.4 |
| 20 | 0.1 | 0.55 | 7.2 | 12 | 8.4 |
| 20 | 0.1 | 0.60 | 6.75 | 11 | 7.6 |
| 20 | 0.1 | 0.65 | 6.3 | 10 | 6.9 |
| 20 | 0.1 | 0.75 | 5.8 | 8 | 6.3 |

2.3.3 Keičiama debito Q1 reikšmė

Temperatūros reikšmė T $^\circ\text{C}$ nustatoma $20 \text{ }^\circ\text{C}$, ir debito $Q1$ reikšmė keičiama nuo $0.1 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ iki $0.3 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$. Debitas $Q2$ modelyje nustatomas $0.5 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$. Siekiama nustatyti, kaip PI reguliatorius veikia prie skirtingų $Q1$ debito reikšmių ir kokie sistemoje pasireiškia reguliavimo rodikliai. Keičiami modelio parametrai nurodyti (2.4) paveiksle.

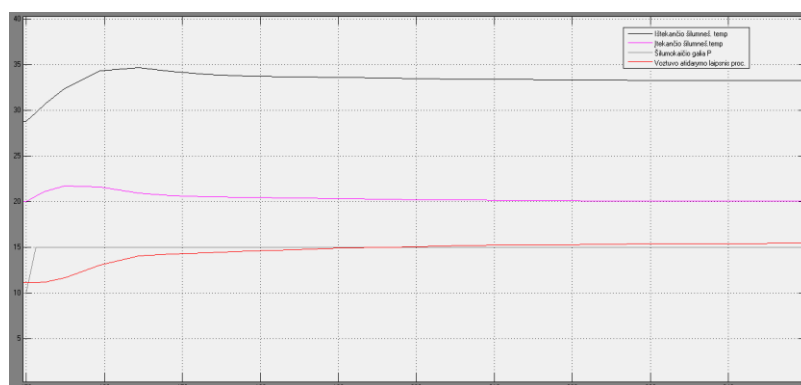
Palapsniui keičiamų debito Q1 reikšmių reguliavimo rodikliai atvaizduoti žemiau esančiuose paveiksluose.

Kai debito Q1 reikšmė modelyje nustatoma $0.1 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$:



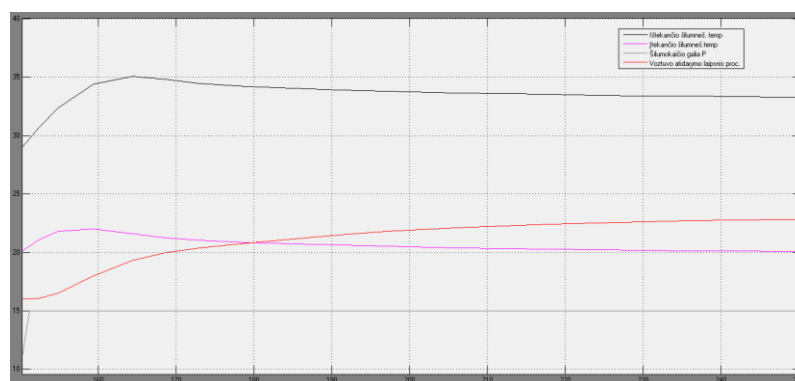
2.22 pav. Q1 debito reikšmė $0.1 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$

Q1 debito reikšmė modelyje nustatoma $0.15 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$:



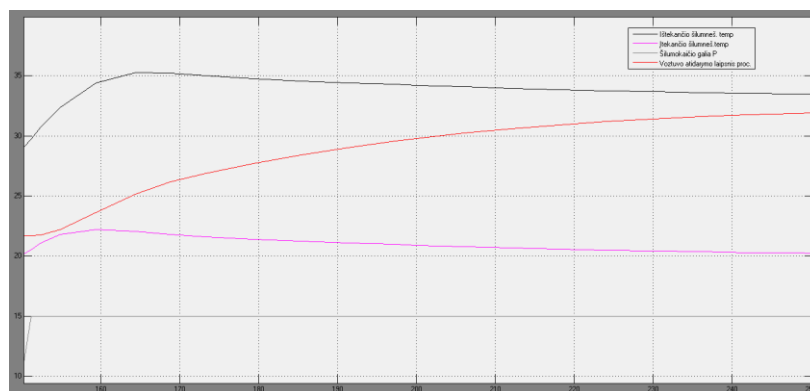
2.23 pav. Q1 debito reikšmė $0.15 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$

Q1 debito reikšmė modelyje nustatoma $0.2 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$:



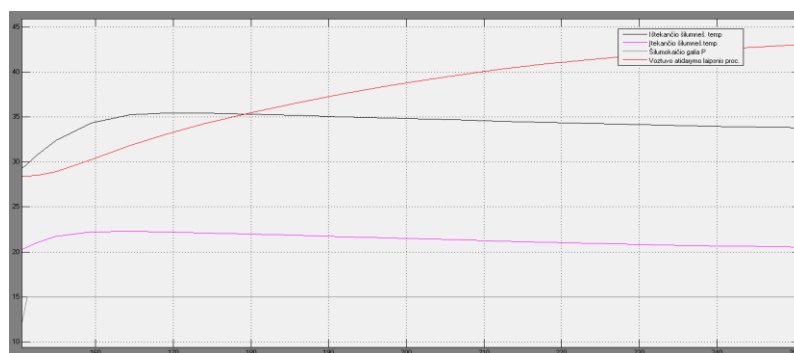
2.24 pav. Q1 debito reikšmė $0.2 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$

Q1 debito reikšmė modelyje nustatoma $0.25 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$:



2.25 pav. Q1 debito reikšmė $0.25 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$

Q1 debito reikšmė modelyje nustatoma $0.3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$:



2.26 pav. Q1 debito reikšmė $0.3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$

Pagal anksčiau pateiktą formulę (2.3), analogiškai apskaičiuojamas perreguliavimas, kai $T = 20^\circ\text{C}$, $Q_2 = 0.5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, ir Q1 reikšmė keičiama nuo $0.1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ iki $0.3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Atsakymai pateikti žemiau esančioje (2.3) lentelėje.

2.3 lentelė. Tyrimo rezultatai keičiant Q1 debito reikšmes

| T^0, C | Q1 | Q2 | σ (%) | Tr (s) | V. atidar. laipsnis % |
|-----------------|------|-----|--------------|--------|-----------------------|
| 20 | 0.1 | 0.5 | 7.65 | 15 | 9.4 |
| 20 | 0.15 | 0.5 | 9 | 30 | 15.52 |
| 20 | 0.2 | 0.5 | 10 | 50 | 23.01 |
| 20 | 0.25 | 0.5 | 11 | 80 | 32.37 |
| 20 | 0.3 | 0.5 | 11.5 | 110 | 44.44 |

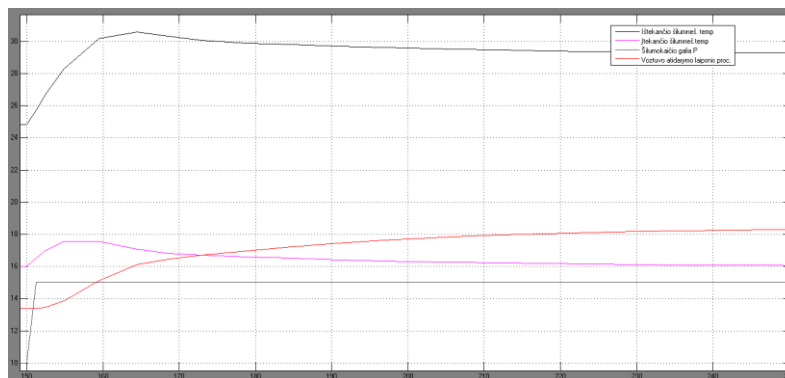
2.3.4 Keičiama pasirinktos temperatūros T °C ir debito Q1 reikšmė

Analogiškai, kaip ir ankstesniuose punktuose, keičiami modelio parametrai siekiant nustatyti modelio reguliavimo parametrus. Temperatūros reikšmė T °C nustatoma nuo 16°C iki 26°C , o debito Q1 reikšmė keičiama nuo $0.06 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ iki $0.25 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Debitas Q2 modelyje nustatomas $0.5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Siekiama nustatyti, kaip PI reguliatorius veikia keičiant Q1 debito ir T °C temperatūros

reikšmes, bei kokie sistemoje pasireiškia reguliavimo rodikliai. Keičiami modelio parametrai nurodyti (2.4) paveiksle.

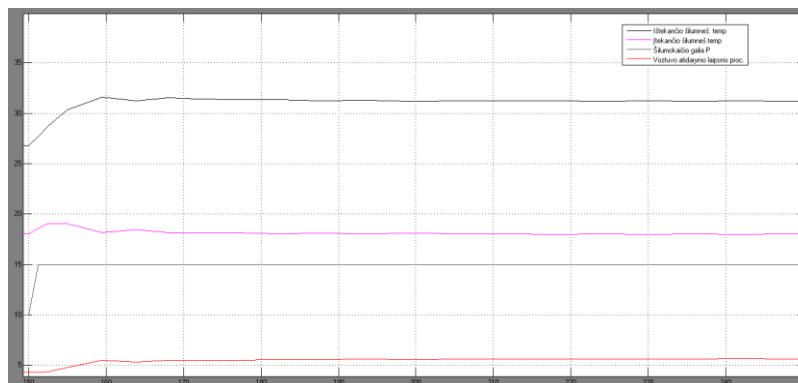
Debito Q1 ir temperatūros T °C reikšmių reguliavimo rodikliai atvaizduoti žemiau esančiuose paveiksluose. Atsižvelgiant į tai, kad keičiant debito ir temperatūros reikšmes gausis daugybė rezultatų, todėl atvaizduosime penkių skirtingų temperatūrų ir debitų reguliavimo rodiklius, kurie nurodyti žemiau esančiuose paveiksluose.

Kai užduotos temperatūros reikšmė T nustatoma 16°C, o debito Q1 reikšmė modelyje pasirenkama $0.06 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$:



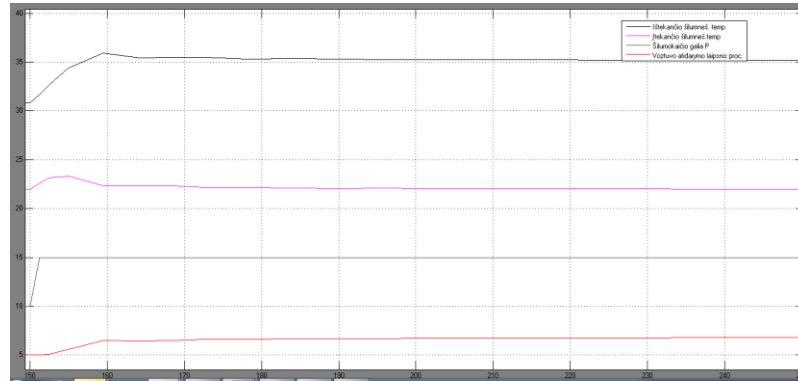
2.27 pav. T = 16 °C, debito Q1 reikšmė $0.06 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$

Kai temperatūros reikšmė T=18 °C, o debitas Q1= $0.07 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$:



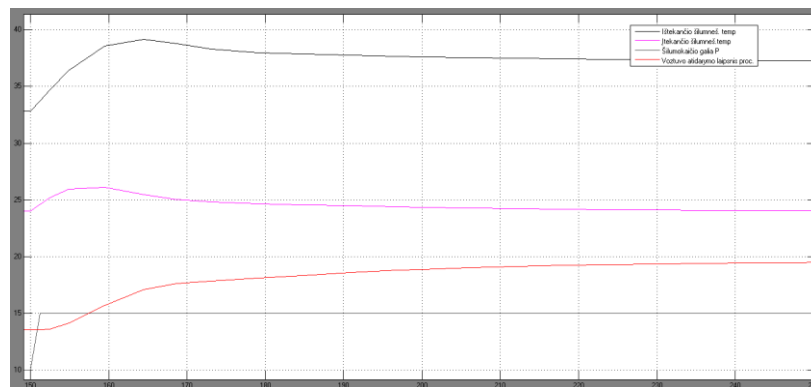
2.28 pav. T = 18 °C, debito Q1 reikšmė $0.07 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$

Kai temperatūros reikšmė $T = 22^{\circ}\text{C}$, debitas $Q_1 = 0.08 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$:



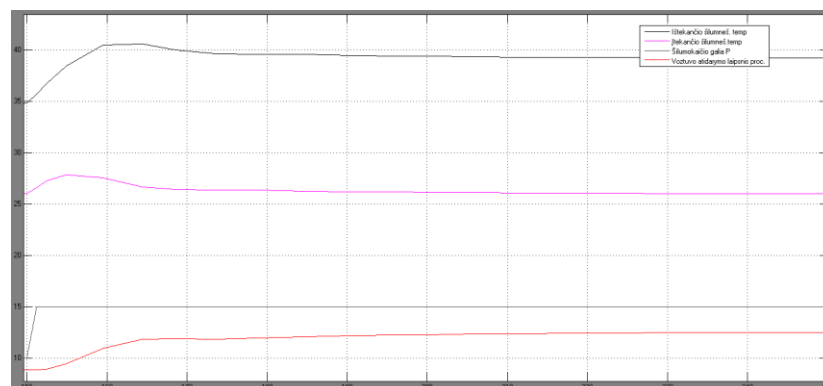
2.29 pav. $T = 22^{\circ}\text{C}$, debito Q_1 reikšmė $0.08 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$

Kai temperatūros reikšmė $T = 24^{\circ}\text{C}$, debitas $Q_1 = 0.2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$:



2.30 pav. $T = 24^{\circ}\text{C}$, debito Q_1 reikšmė $0.2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$

Kai temperatūros reikšmė $T = 26^{\circ}\text{C}$, debitas $Q_1 = 0.15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$:



2.31 pav. $T = 26^{\circ}\text{C}$, debito Q_1 reikšmė $0.15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$

Palapsniui didinant ir mažinant užduotą temperatūrą, bei keičiant debitą analogiškai skaičiuojame pagal anksčiau minėtą formulę (2.3) ir gautus rezultatus surašome į (2.4) lentelę.

2.4 lentelė. Tyrimo rezultatai, keičiant temperatūrą, bei Q1 debitą

| T ⁰ , C | Q1 | Q2 | σ % | Tr (s) | V. atidar. laipsnis % |
|--------------------|------|-----|-------|--------|-----------------------|
| 18 | 0.08 | 0.5 | 7.2 | 15 | 7.79 |
| 18 | 0.07 | 0.5 | 6.4 | 10 | 6.69 |
| 18 | 0.06 | 0.5 | 6 | 18 | 5.63 |
| 18 | 0.12 | 0.5 | 8.8 | 20 | 12.65 |
| 18 | 0.15 | 0.5 | 9.4 | 40 | 16.84 |
| 18 | 0.2 | 0.5 | 10.5 | 70 | 25.2 |
| 18 | 0.25 | 0.5 | 11.1 | 100 | 35.8 |
| 16 | 0.08 | 0.5 | 8.06 | 20 | 8.41 |
| 16 | 0.07 | 0.5 | 7.25 | 18 | 7.21 |
| 16 | 0.06 | 0.5 | 6.6 | 25 | 6.06 |
| 16 | 0.12 | 0.5 | 9.3 | 40 | 13.74 |
| 16 | 0.15 | 0.5 | 10.1 | 55 | 18.41 |
| 16 | 0.2 | 0.5 | 11.25 | 80 | 27.86 |
| 16 | 0.25 | 0.5 | 11.66 | 108 | 40.27 |
| 22 | 0.08 | 0.5 | 5.9 | 23 | 6.79 |
| 22 | 0.07 | 0.5 | 5.4 | 20 | 5.85 |
| 22 | 0.06 | 0.5 | 5 | 27 | 4.91 |
| 22 | 0.12 | 0.5 | 7.7 | 20 | 10.91 |
| 22 | 0.15 | 0.5 | 8.1 | 35 | 14.39 |
| 22 | 0.2 | 0.5 | 9 | 55 | 21.16 |
| 22 | 0.25 | 0.5 | 10.5 | 100 | 29.48 |
| 24 | 0.08 | 0.5 | 5.24 | 25 | 6.37 |
| 24 | 0.07 | 0.5 | 4.95 | 18 | 5.51 |
| 24 | 0.06 | 0.5 | 5.12 | 30 | 4.6 |
| 24 | 0.12 | 0.5 | 7 | 15 | 10.2 |
| 24 | 0.15 | 0.5 | 7.9 | 35 | 13.45 |
| 24 | 0.2 | 0.5 | 8.3 | 40 | 19.59 |
| 24 | 0.25 | 0.5 | 10 | 70 | 27.06 |
| 26 | 0.08 | 0.5 | 4.61 | 25 | 6.01 |
| 26 | 0.07 | 0.5 | 4.76 | 20 | 5.08 |
| 26 | 0.06 | 0.5 | 4.92 | 35 | 4.39 |
| 26 | 0.12 | 0.5 | 6.5 | 14 | 9.58 |
| 26 | 0.15 | 0.5 | 7.3 | 30 | 12.57 |
| 26 | 0.2 | 0.5 | 8 | 50 | 18.24 |
| 26 | 0.25 | 0.5 | 9.4 | 65 | 25.01 |

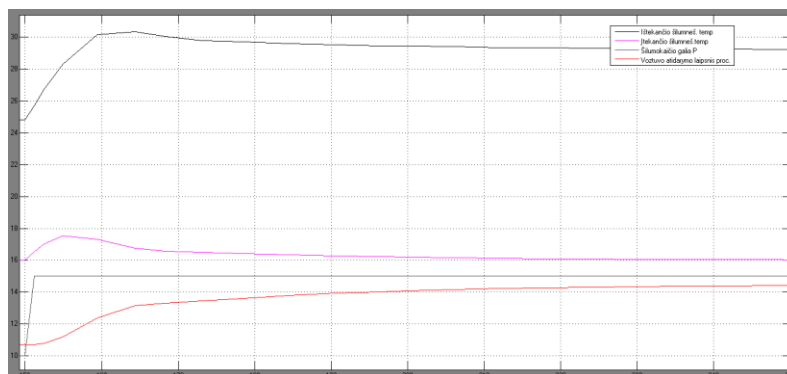
2.3.5 Keičiama pasirinktos temperatūros T °C ir debito Q2 reikšmė

Kaip ir ankstesniuose punktuose, keičiami modelio parametrai siekiant nustatyti modelio reguliavimo parametrus. Temperatūros reikšmė T °C nustatoma nuo 16°C iki 26 °C, o debito Q2 reikšmė keičiama nuo $0.3 m^3 h^{-1}$ iki $0.7 m^3 h^{-1}$. Debitas Q1 modelyje nustatomas $0.1 m^3 h^{-1}$. Siekiama nustatyti, kaip PI reguliatorius veikia keičiant Q2 debito ir T °C temperatūros reikšmes, bei kokios sistemoje nustatomi reguliavimo rodikliai. Keičiami modelio parametrai nurodyti (2.4) paveiksle.

Debito Q2 ir temperatūros T °C reikšmių reguliavimo rodikliai atvaizduoti žemiau esančiuose paveiksluose. Atsižvelgiant į tai, kad keičiant debito ir temperatūros reikšmes gausis daugybė

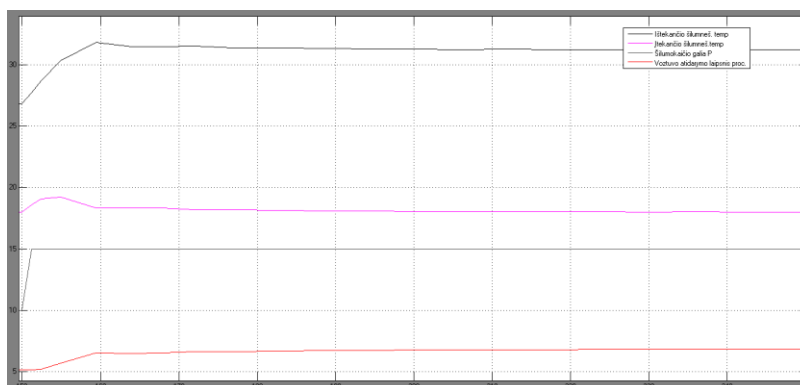
rezultatų, todėl atvaizduosime prie penkių skirtingų temperatūrų ir debitų reguliavimo rodiklius, kurie nurodyti žemiau esančiuose paveiksluose.

Kai pasirinktos temperatūros reikšmė T nustatoma 16°C , debito Q_2 reikšmė modelyje pasirenkama $0.4\text{ m}^3\text{h}^{-1}$:



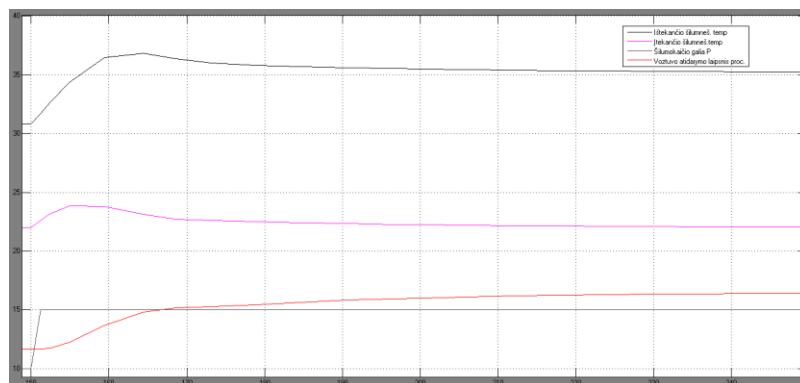
2.32 pav. $T = 16^{\circ}\text{C}$, debito Q_2 reikšmė $0.4\text{ m}^3\text{h}^{-1}$

Kai temperatūros reikšmė $T = 18^{\circ}\text{C}$, debitas $Q_2 = 0.7\text{ m}^3\text{h}^{-1}$:



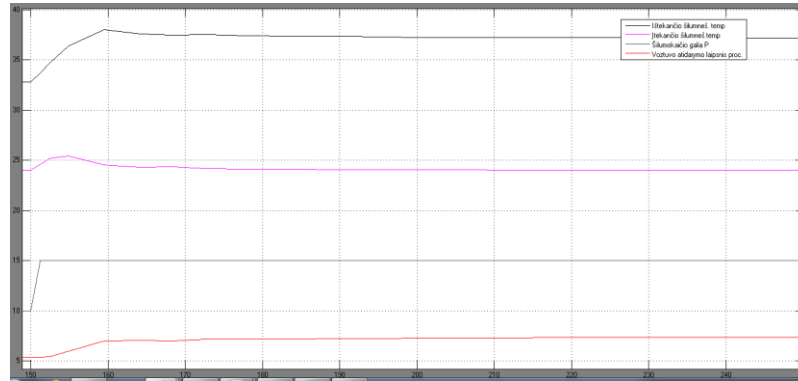
2.33 pav. $T = 18^{\circ}\text{C}$, debito Q_2 reikšmė $0.7\text{ m}^3\text{h}^{-1}$

Kai temperatūros reikšmė $T = 22^{\circ}\text{C}$, o debitas $Q_2 = 0.3\text{ m}^3\text{h}^{-1}$:



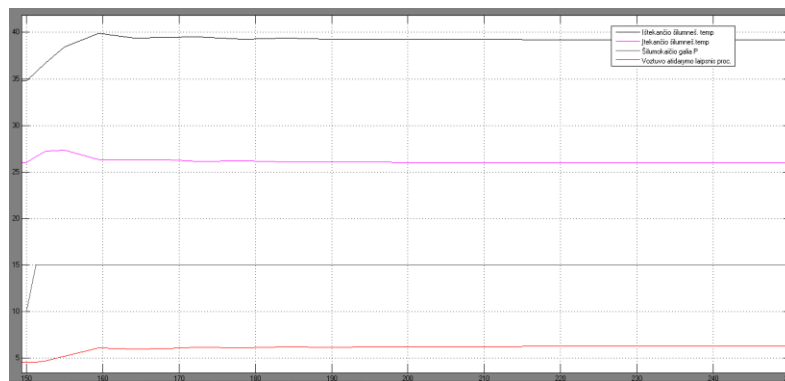
2.34 pav. $T = 22^{\circ}\text{C}$, debito Q_2 reikšmė $0.3\text{ m}^3\text{h}^{-1}$

Kai temperatūros reikšmė $T = 24^{\circ}\text{C}$, o debitas $Q_2 = 0.55 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$:



2.35 pav. $T = 24^{\circ}\text{C}$, debito Q_2 reikšmė $0.55 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$

Kai temperatūros reikšmė $T = 26^{\circ}\text{C}$, o debitas $Q_2 = 0.6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$:



2.36 pav. $T = 26^{\circ}\text{C}$, debito Q_2 reikšmė $0.6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$

Palaisnui didinant ir mažinant užduotą temperatūrą, bei debitą Q_2 analogiškai skaičiuojame pagal anksčiau minėtą (2.3) formulę ir gautus rezultatus surašome į (2.5) lentelę.

2.5 lentelė. Tyrimo rezultatai, keičiant temperatūrą, bei Q2 debitą

| T^o, C | Q1 | Q2 | σ % | Tr (s) | V. atidar. laipsnis |
|-------------------------|-----------|-----------|------------|---------------|----------------------------|
| 18 | 0.1 | 0.45 | 8.7 | 20 | 11.5 |
| 18 | 0.1 | 0.4 | 9.1 | 33 | 13.31 |
| 18 | 0.1 | 0.3 | 10 | 50 | 19.42 |
| 18 | 0.1 | 0.55 | 7.7 | 15 | 9.04 |
| 18 | 0.1 | 0.65 | 7 | 12 | 7.45 |
| 18 | 0.1 | 0.7 | 6.5 | 10 | 6.84 |
| 16 | 0.1 | 0.45 | 9.3 | 20 | 12.48 |
| 16 | 0.1 | 0.4 | 8.7 | 37 | 14.08 |
| 16 | 0.1 | 0.3 | 10.2 | 60 | 21.03 |
| 16 | 0.1 | 0.55 | 8.6 | 22 | 9.77 |
| 16 | 0.1 | 0.65 | 7.8 | 20 | 8.04 |
| 16 | 0.1 | 0.7 | 7.3 | 15 | 7.38 |
| 22 | 0.1 | 0.45 | 7.2 | 15 | 9.94 |
| 22 | 0.1 | 0.4 | 7.7 | 20 | 11.46 |
| 22 | 0.1 | 0.3 | 8.6 | 35 | 16.5 |
| 22 | 0.1 | 0.55 | 6.5 | 20 | 7.85 |
| 22 | 0.1 | 0.65 | 5.59 | 10 | 6.49 |
| 22 | 0.1 | 0.7 | 5.45 | 10 | 5.95 |
| 24 | 0.1 | 0.45 | 6.6 | 15 | 9.31 |
| 24 | 0.1 | 0.4 | 7.3 | 15 | 10.72 |
| 24 | 0.1 | 0.3 | 7.9 | 30 | 15.35 |
| 24 | 0.1 | 0.55 | 5.8 | 12 | 7.37 |
| 24 | 0.1 | 0.65 | 5.08 | 10 | 6.09 |
| 24 | 0.1 | 0.7 | 5 | 10 | 5.62 |
| 26 | 0.1 | 0.45 | 6.3 | 12 | 8.75 |
| 26 | 0.1 | 0.4 | 6.8 | 15 | 10.06 |
| 26 | 0.1 | 0.3 | 7.6 | 25 | 14.35 |
| 26 | 0.1 | 0.55 | 5.38 | 10 | 6.94 |
| 26 | 0.1 | 0.65 | 4.6 | 20 | 5.74 |
| 26 | 0.1 | 0.7 | 4.5 | 20 | 5.32 |

3. ŠILUMOKAIČIO TEMPERATŪROS VALDYMAS NAUDOJANT FUZZY REGULIATORIŲ

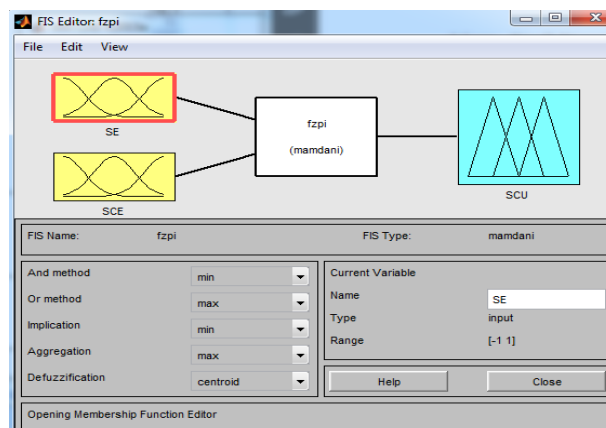
3.1 Neraiškios logikos reguliatoriaus projektavimas

Vieni iš svarbiausių neraiškios logikos elementų yra kintamieji, kurie yra suformuojami iš eilės persidengiančių „fuzzy“ aibių, fizikine prasme apibūdinančių tą kintamąjį. Pavyzdžiui, kintamasis „temperatūra“ gali būti sudarytas iš tokių „fuzzy“ aibių: „Žema“, „Vidutinė“, „Aukšta“. Atskirose situacijose „fuzzy“ aibės gali turėti skirtingas reikšmių sritis, skirtingas savybes. Elemento priklausomybė konkrečiai aibei yra išreiškiama priklausomumo funkcija $\mu()$, kuri gali įgyti reikšmes iš intervalo $[0,1]$. 0 reiškia, visišką nepriklausomybę, o 1 - visišką priklausomybę, o tarpinės reikšmės - dalinę priklausomybę. „Fuzzy“ aibė yra sutvarkytų porų aibė [20].

Reguliatoriaus projektavime naudosis grįžtamojo ryšio valdymo sistemą. Tai tokia sistema, kai valdymo poveikis u valdomajam objektui apskaičiuojamas atsižvelgiant į valdymo paklaidą e , kuri yra valdomo objekto išėjimas ir užduoties dydžių skirtumas (1.12 pav).

3.1.1 Reguliatoriaus įėjimų ir išėjimų apibrėžimas

Neraiškios logikos reguliatoriui parenkame du įėjimus ir juos užvardiname: SE – paklaida (skirtumas tarp grįžtamojo ryšio ir nuostatos signalų), bei SCE – paklaidos išvestinė. Reguliatoriaus išėjime formuojamas valdymo signalas. Žemiau esančiame paveiksle (3.1) pateiktas fuzzy reguliatoriaus nustatymų langas.



3.1 pav. Neraiškios logikos reguliatoriaus nustatymų langas

3.1.2 Lingvistinių kintamųjų apibrėžimas ir priklausomumo funkcijų parinkimas

Neraiškios logikos reguliatoriui buvo parinktos trikampio formos priklausomumo funkcijos. Paklaidos išvestinės funkcijos sutampa su paklaidos priklausomumo funkcijomis. Jų grafinis vaizdavimas pateiktas (3.2 pav). Išėjimo priklausomumo funkcijos irgi pasirenkamos trikampio formos, bei jos pateiktos (3.3 pav).

Priklausomumo funkcijos perdengia viena kitą. Įėjimai ir išėjimai gali įgyti vertes, kurios nusakomos lingvistiniais kintamaisiais. Reguliatoriuje paklaida aprašoma taip:

NB – neigiama didelė;

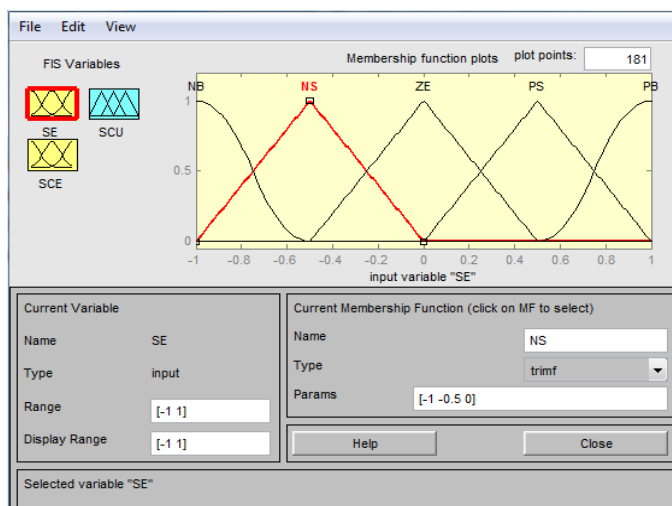
NS – neigiama maža;

ZE – nulinė;

PS – teigiama maža;

PB – teigiama didelė.

Aprašoma taip pat ir paklaidos išvestinė.



3.2 pav. Paklaidos ir paklaidos išvestinės funkcijų grafinis vaizdavimas

Neraiškios logikos reguliatoriuje išėjimas aprašomas taip:

NB – neigiama didelė;

NM – neigiama vidutinė;

NS – neigiama maža;

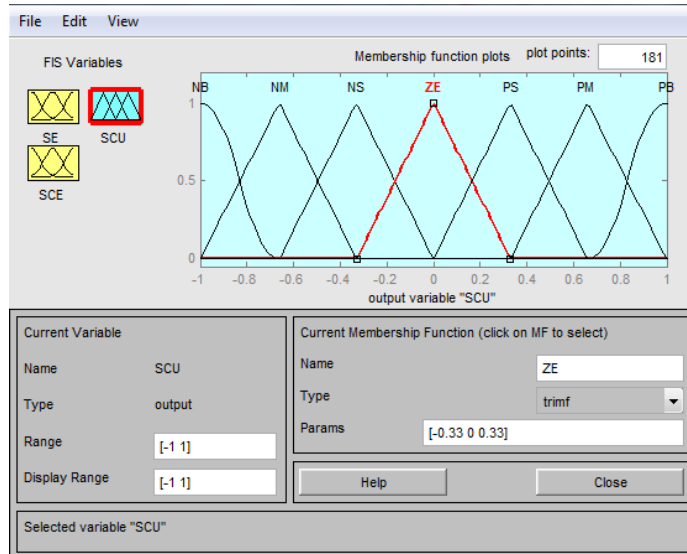
ZE – nulinė;

PS – teigiama maža;

PM – teigiama vidutinė;

PB – teigiama didelė.

Išėjimo priklausomumo funkcijos irgi pasirenkamos trikampio formos, bei jos pateiktos žemiau esančiame paveiksle.



3.3 pav. Regulatoriaus išėjimo priklausomumo funkcijų grafinis vaizdavimas

3.1.3 Neraiškaus regulatoriaus taisyklių bazės sudarymas

Naudojamas Mamdani tipo regulatorius, kuriam taisyklės sudaromos tokia logika: jei įėjimo paklaida yra neigiama maža (NS) ir jos išvestinė neigiama didelė (NB), tada išėjimas yra neigiamas didelis (NB). Tokia logika sudaroma taisyklių bazė, kuri nurodyta žemiau esančioje (3.1) lentelėje. Sudarant taisykles, galima remtis ir kitų ekspertų, ar savo asmeninėmis žiniomis.

3.1 lentelė. Fuzzy regulatoriaus taisyklių bazė

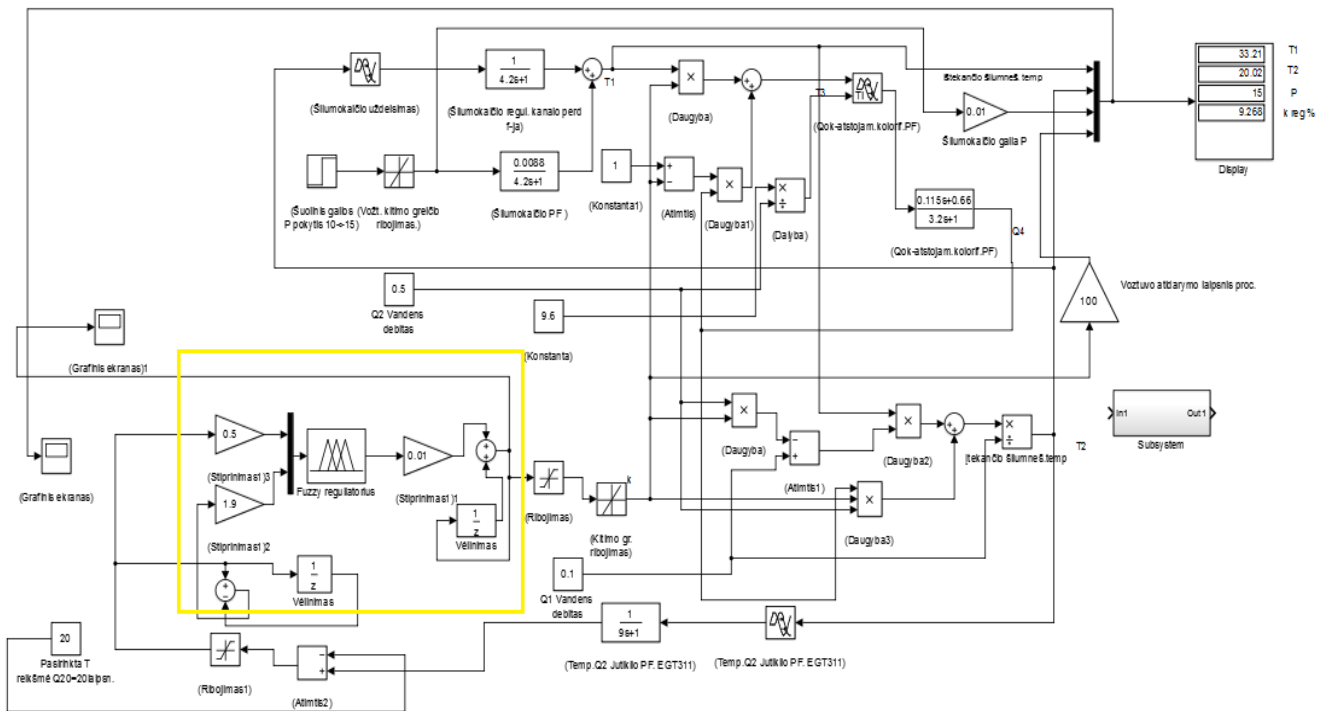
| SE\SCE | NB | NS | ZE | PS | PB |
|--------|----|----|----|----|----|
| NB | NB | NB | NM | NS | ZE |
| NS | NB | NM | NS | ZE | PS |
| ZE | NM | NS | ZE | PS | PM |
| PS | NS | ZE | PS | PM | PB |
| PB | ZE | PS | PM | PB | PB |

Projektuojamo neraiškios logikos regulatoriaus išėjimo signalas skaičiuojamas : $u(k)=u(k)+u(k-1)$. Regulatorius derinamas keičiant tris stiprinimo bloką parametrus. Keičiant

parametrus stiprinimo blokuose svarbu nepersistengti ir keisti tik po truputi didinant arba mažinant. Kitu atveju sistema tampa nestabili, reguliatorius išsiderina.

3.2 Valdymo sistemos su FR tyrimas

Sistemai reguliuoti naudojama grįžtamojo ryšio valdymo sistema. Tai tokia sistema, kai valdymo poveikis u valdomajam objektui apskaičiuojamas atsižvelgiant į valdymo paklaidą e , kuri yra valdomo objekto išėjimas ir užduoties dydžių skirtumas. Valdymo sistema su neraiškios logikos reguliatoriumi yra praktiškai analogiška valdymo sistemai su PI reguliatoriumi, keičiasi tik reguliatorių tipai. Šilumokaičio temperatūros reguliavimo sistemos Simulink modelis su neraiškios logikos reguliatoriumi pateiktas žemiau esančiame (3.4) paveiksle. Geltonu kontūru pažymėta su neraiškios logikos reguliatoriumi sistema.



3.4 pav. Kondensacinio šilumokaičio temperatūros reguliavimo sistemos modelis su neraiškiu reguliatoriumi

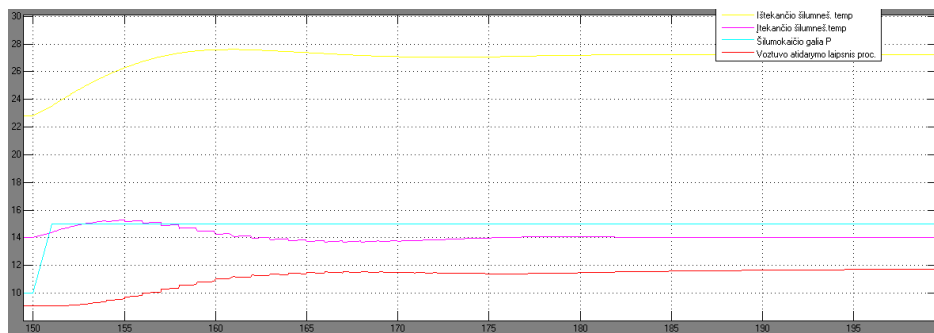
3.2.1 Keičiama užduotos temperatūros reikšmė T °C

Analogiškai, kaip ir šilumokaičio temperatūros reguliavimo sistemoje keičiama pasirinktos temperatūros reikšmė T °C nuo 14 °C iki 30 °C, o debito reikšmės nustatomos pastovios ir yra nekeičiamos, tai yra $Q1 = 0.1 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ ir $Q2 = 0.5 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$. Siekiama įvertinti, kaip prie tų pačių

reikšmių, kaip ir PI reguliatoriui, fuzzy reguliatorius veikia keičiant pasirinktą temperatūrą. Norima nustatyti, kokie yra reguliavimo rodikliai, tokie kaip: pereinamojo proceso trukmė, perreguliavimas, bei reguliavimo stabilumas ir kuris reguliatorius tinka labiau šiai sistemai. Keičiami modelio parametrai parodyti anksčiau minėtame (2.4 pav) paveiksle.

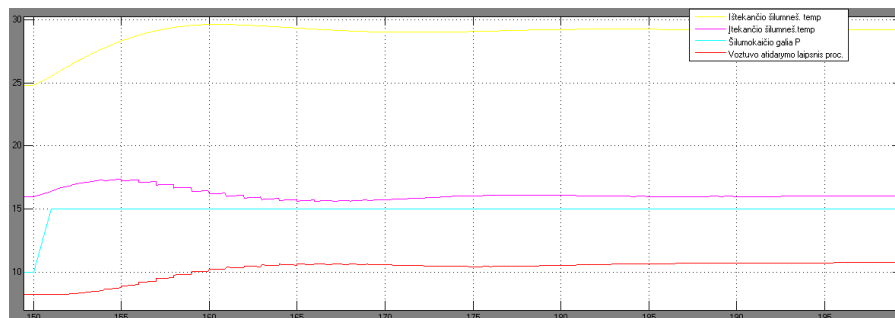
Tyrimo metu bandoma nustatyti neraiškios logikos reguliatoriaus reguliavimo diapazoną didinant ir mažinant pasirinktą temperatūrą. Temperatūros reguliavimo sistemos dinamikos rodikliai, palaipsniui keičiant pasirinktą temperatūrą atvaizduoti žemiau esančiuose paveiksluose.

Kai užduota temperatūra nustatoma 14 °C:



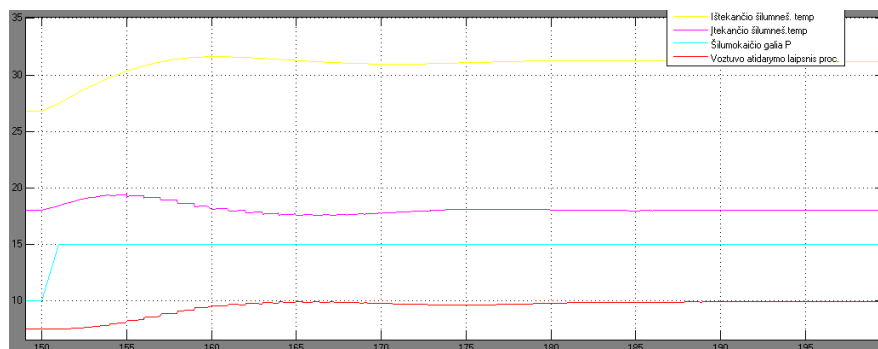
3.5 pav. Temperatūra užduota 14 °C

Pasirinkta temperatūra 16 °C:



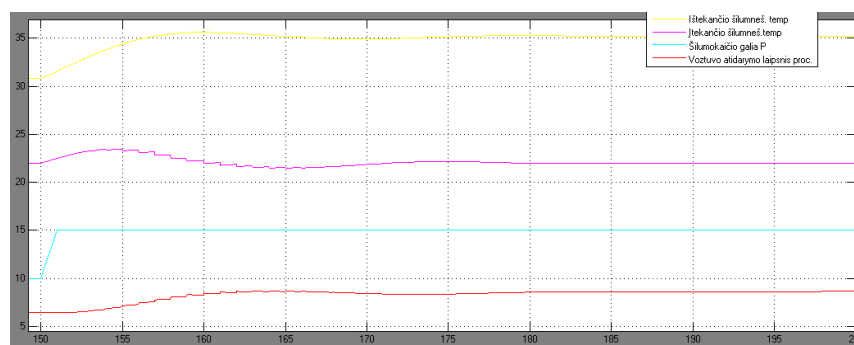
3.6 pav. Temperatūra užduota 16 °C

Pasirinkta temperatūra 18 °C:



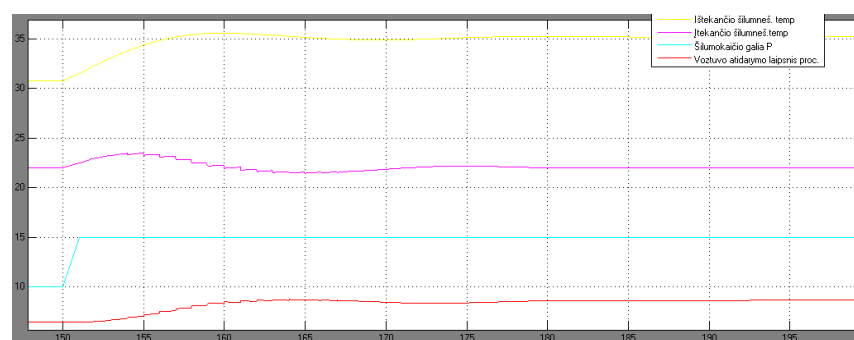
3.7 pav. Temperatūra užduota 18 °C

Pasirinkta temperatūra 20 °C:



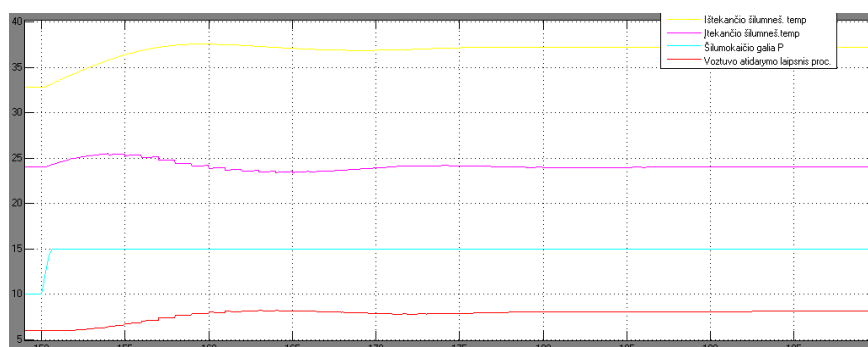
3.8 pav. Temperatūra užduota 20 °C

Pasirinkta temperatūra 22 °C:



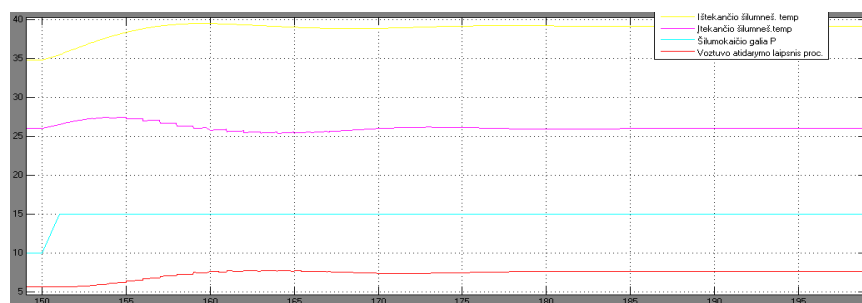
3.9 pav. Temperatūra užduota 22 °C

Pasirinkta temperatūra 24 °C:



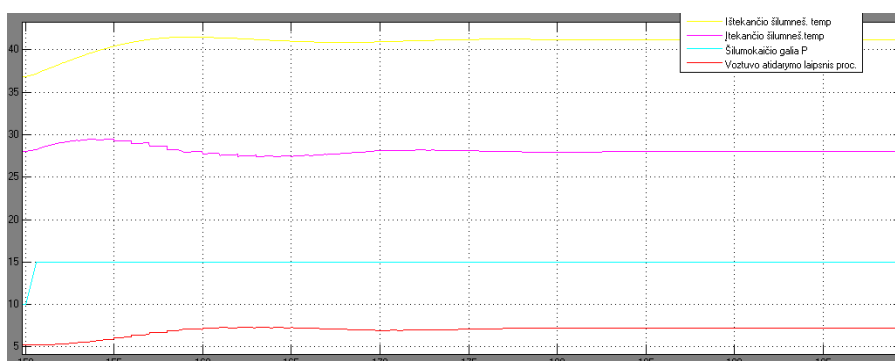
3.10 pav. Temperatūra užduota 24 °C

Pasirinkta temperatūra 26 °C:



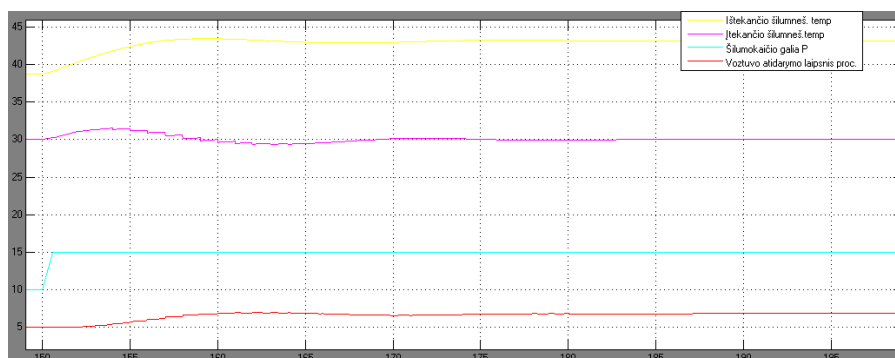
3.11 pav. Temperatūra užduota 26 °C

Pasirinkta temperatūra 28 °C:



3.12 pav. Temperatūra užduota 28 °C

Pasirinkta temperatūra 30 °C:



3.13 pav. Temperatūra užduota 30 °C

Palaispniui didinant ir mažinant užduotą temperatūrą, analogiškai skaičiuojame pagal anksčiau minėtą formulę (2.3) ir gautus rezultatus surašome į (3.2) lentelę.

3.2 lentelė. Tyrimo rezultatai keičiant temperatūrą

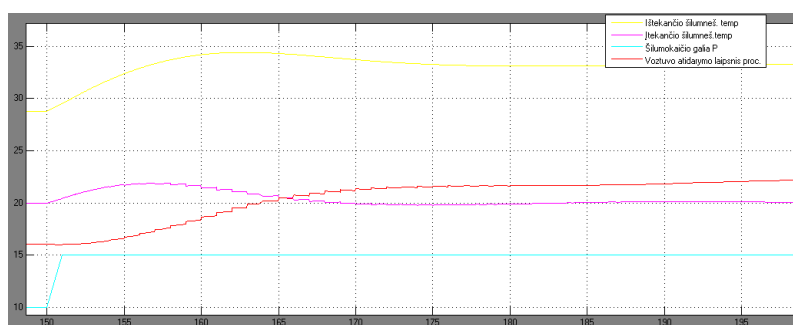
| T ^o , C | Q1 | Q2 | σ (%) | Tr(s) | V. atidar. laipsnis % |
|--------------------|-----|-----|-------|-------|-----------------------|
| 14 | 0.1 | 0.5 | 9 | 20 | 11,74 |
| 16 | 0.1 | 0.5 | 8.12 | 20 | 10,96 |
| 18 | 0.1 | 0.5 | 7.7 | 18 | 10,13 |
| 20 | 0.1 | 0.5 | 7.2 | 15 | 9,39 |
| 22 | 0.1 | 0.5 | 6.5 | 15 | 8,6 |
| 24 | 0.1 | 0.5 | 6.2 | 13 | 8,1 |
| 26 | 0.1 | 0.5 | 5.6 | 12 | 7,6 |
| 28 | 0.1 | 0.5 | 5 | 15 | 7,2 |
| 30 | 0.1 | 0.5 | 4.8 | 15 | 6,8 |

3.2.2 Keičiama debito Q2 reikšmė

Analogiškai, kaip ir PI reguliatoriuje, taip ir fuzzy reguliatoriuje pasirinktos temperatūros reikšmė T °C nustatoma 20°C, o debito Q2 reikšmė keičiama nuo 0.25 m³h⁻¹ iki 0.7 m³h⁻¹. Debitas Q1 modelyje nustatomas 0.1 m³h⁻¹. Siekiama įvertinti, kokie reguliavimo rodikliai pasireiškia reguliatoriuje keičiant Q2 debito reikšmes. Keičiami modelio parametrai nurodyti anksčiau minėtame (3.4 pav) paveiksle.

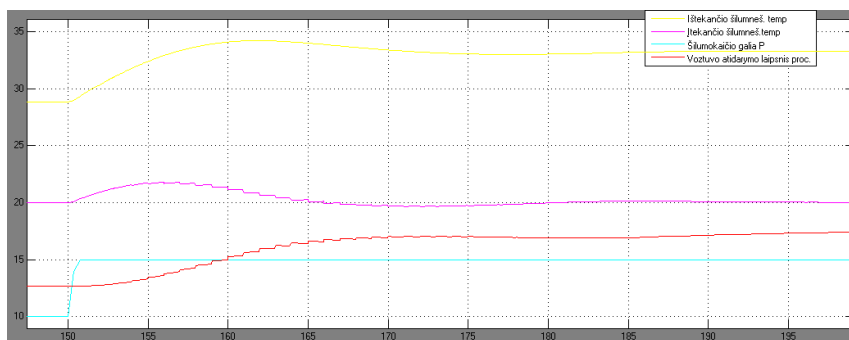
Reguliavimo rodikliai, palaipsniui keičiant debito Q2 reikšmę atvaizduoti žemiau esančiuose paveiksluose.

Kai debito Q2 reikšmė modelyje nustatoma 0.25 m³h⁻¹:



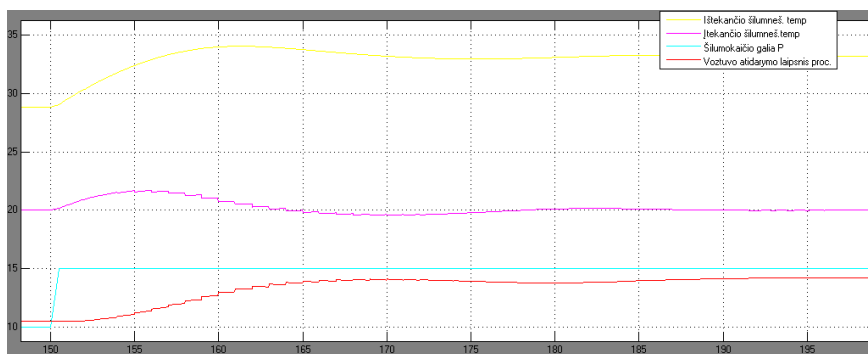
3.14 pav. Debito Q2 reikšmė 0.25 m³h⁻¹

Debito Q2 reikšmė modelyje nustatoma 0.3 m³h⁻¹:



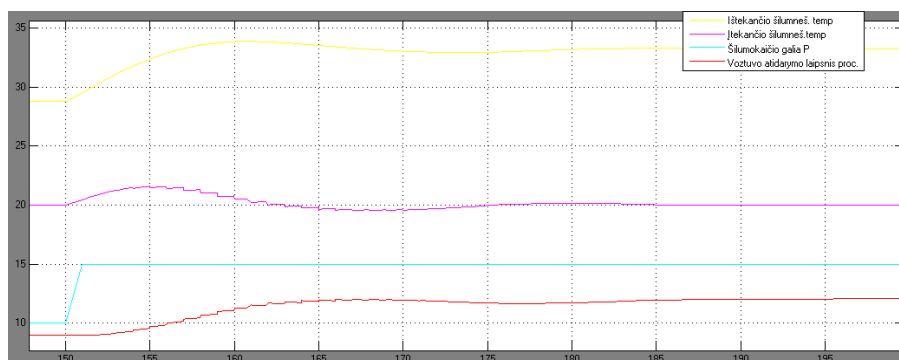
3.15 pav. Debito Q2 reikšmė $0.3 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$

Debito Q2 reikšmė modelyje nustatoma $0.35 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$:



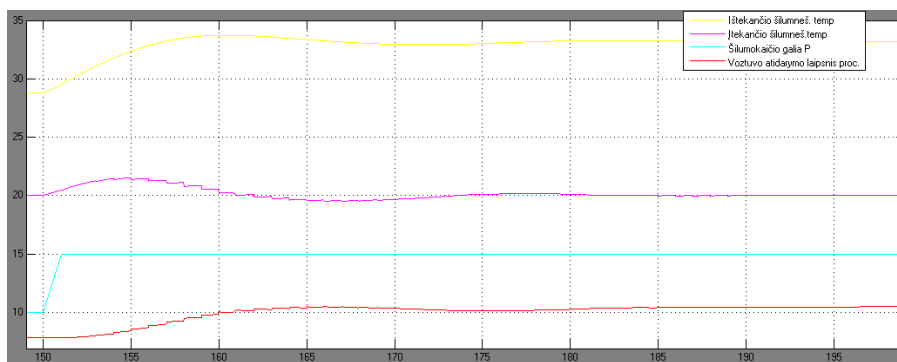
3.16 pav. Debito Q2 reikšmė $0.35 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$

Debito Q2 reikšmė modelyje nustatoma $0.4 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$:



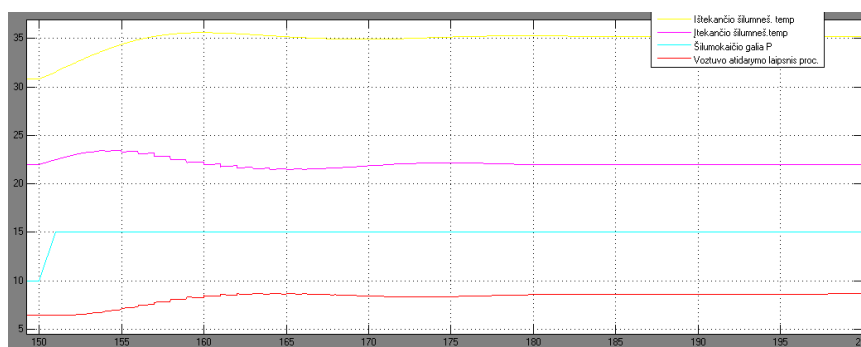
3.17 pav. Debito Q2 reikšmė $0.4 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$

Debito Q2 reikšmė modelyje nustatoma $0.45 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$:



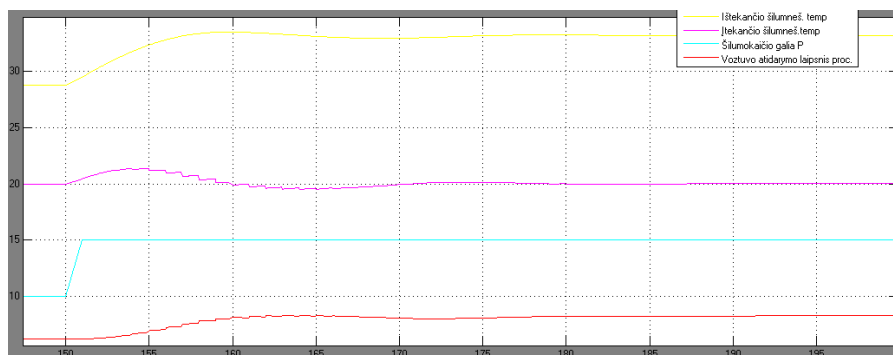
3.18 pav. Debito Q2 reikšmė $0.45 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$

Debito Q2 reikšmė modelyje nustatoma $0.5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$:



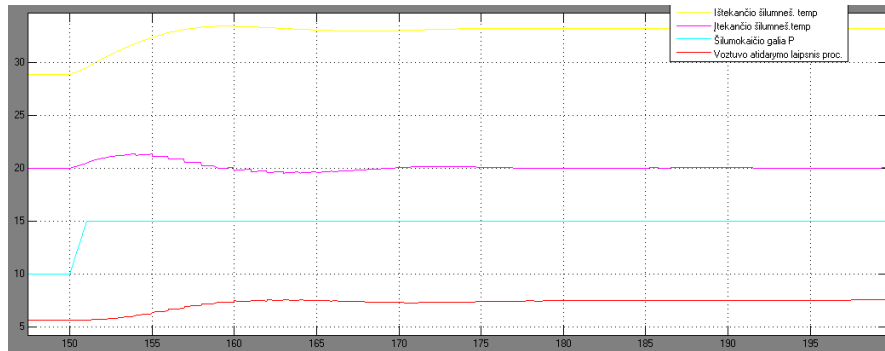
3.19 pav. Debito Q2 reikšmė $0.5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$

Debito Q2 reikšmė modelyje nustatoma $0.55 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$:



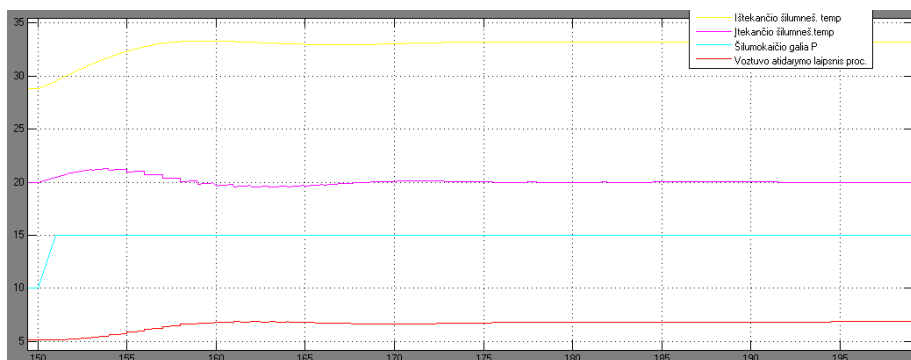
3.20 pav. Debito Q2 reikšmė $0.55 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$

Debito Q2 reikšmė modelyje nustatoma $0.6 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$:



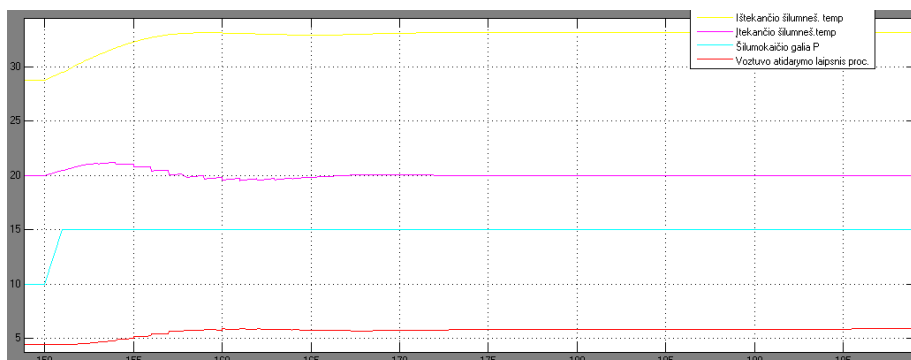
3.21 pav. Debito Q2 reikšmė $0.6 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$

Debito Q2 reikšmė modelyje nustatoma $0.65 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$:



3.22 pav. Debito Q2 reikšmė $0.65 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$

Debito Q2 reikšmė modelyje nustatoma $0.75 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$:



3.23 pav. Debito Q2 reikšmė $0.75 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$

Remiantis jau anksčiau pateikta(2.3) formule, apskaičiuojama perreguliovimo reikšmė, kai $T = 20^\circ\text{C}$, $Q_1 = 0.1 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$, o Q_2 reikšmė keičiama nuo $0.25 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ iki $0.75 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$. Gauti atsakymai pateikti žemiau esančioje (3.2) lentelėje.

3.3 lentelė. Tyrimo rezultatai keičiant debitą Q2

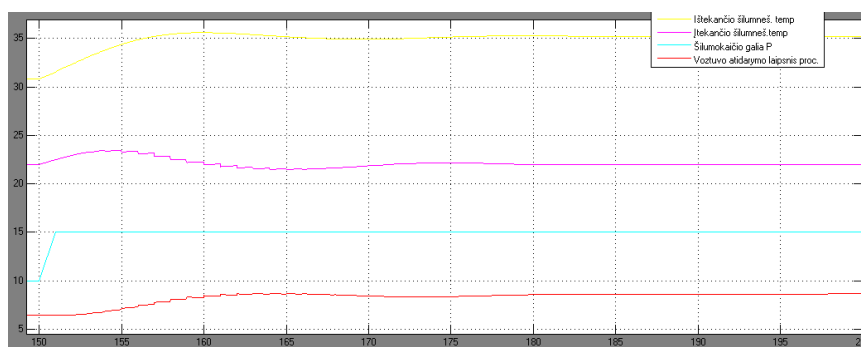
| T ^o , C | Q1 | Q2 | σ (%) | Tr (s) | V. atidar. laipsnis % |
|--------------------|-----|------|-------|--------|-----------------------|
| 20 | 0.1 | 0.25 | 9.5 | 25 | 22.2 |
| 20 | 0.1 | 0.3 | 8.5 | 23 | 17.3 |
| 20 | 0.1 | 0.35 | 8 | 20 | 14.26 |
| 20 | 0.1 | 0.4 | 7.8 | 19 | 12 |
| 20 | 0.1 | 0.45 | 7.5 | 16 | 10.4 |
| 20 | 0.1 | 0.5 | 7.2 | 14 | 9.26 |
| 20 | 0.1 | 0.55 | 6.9 | 20 | 8.3 |
| 20 | 0.1 | 0.60 | 6.7 | 18 | 7.5 |
| 20 | 0.1 | 0.65 | 6.1 | 17 | 6.8 |
| 20 | 0.1 | 0.75 | 5.7 | 16 | 5.8 |

3.2.3 Keičiama debito Q1 reikšmė

Temperatūros reikšmė T °C nustatoma 20 °C, ir debito Q1 reikšmė keičiama nuo 0.1 m³h⁻¹ iki 0.3 m³h⁻¹. Debitas Q2 modelyje nustatomas 0.5 m³h⁻¹. Siekiama nustatyti, kaip fuzzy reguliatorius veikia prie skirtingų Q1 debito reikšmių ir kokie sistemoje pasireiškia reguliavimo rodikliai. Keičiami modelio parametrai nurodyti (3.4) paveiksle.

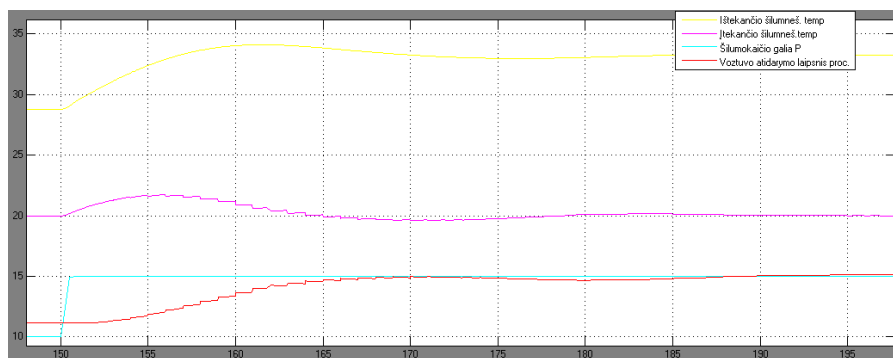
Palaipsniui keičiamų debito Q1 reikšmių reguliavimo rodikliai atvaizduoti žemiau esančiuose paveiksluose.

Kai debito Q1 reikšmė modelyje nustatoma 0.1 m³h⁻¹:



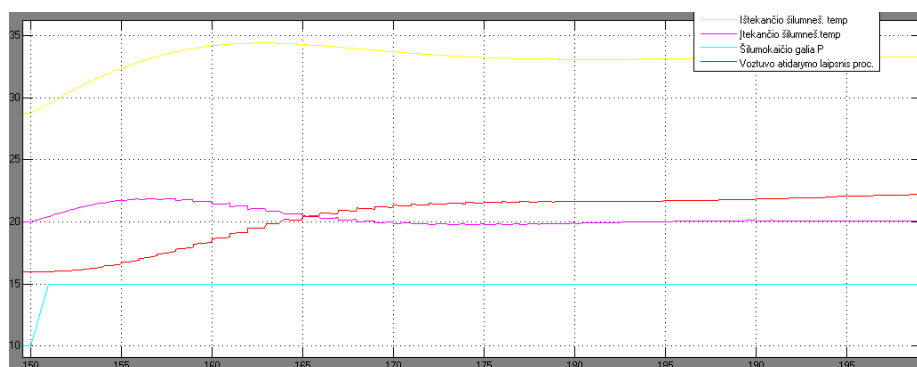
3.24 pav. Q1 debito reikšmė 0.1 m³h⁻¹

Debito Q1 reikšmė modelyje nustatoma $0.15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$:



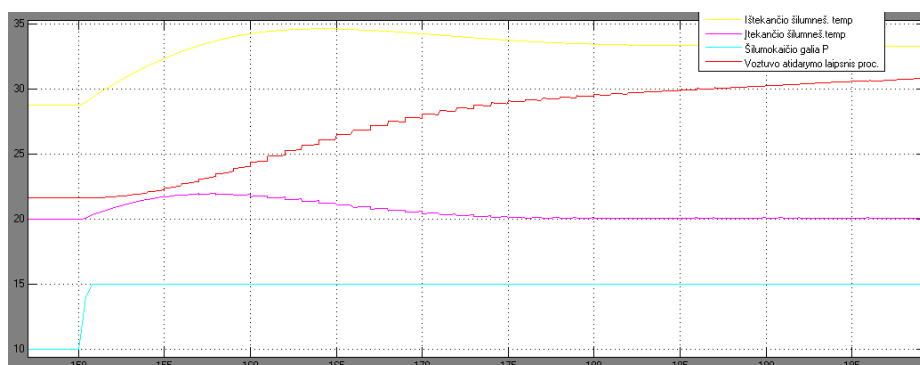
3.25 pav. Q1 debito reikšmė $0.15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$

Debito Q1 reikšmė modelyje nustatoma $0.2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$:



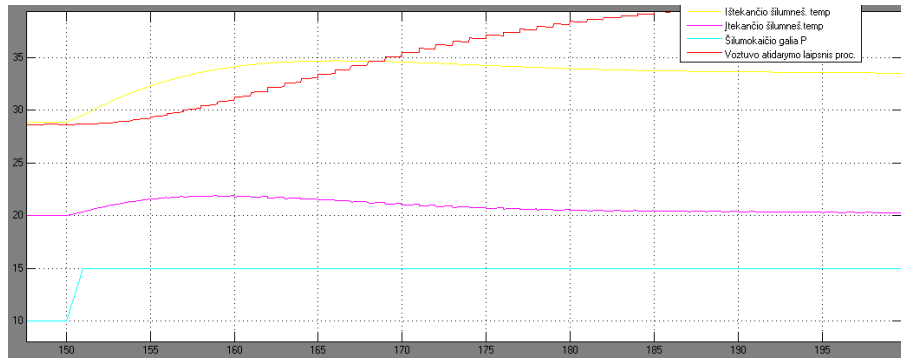
3.26 pav. Q1 debito reikšmė $0.2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$

Debito Q1 reikšmė modelyje nustatoma $0.25 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$:



3.27 pav. Q1 debito reikšmė $0.25 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$

Debito Q1 reikšmė modelyje nustatoma $0.3 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$:



3.28 pav. Q1 debito reikšmė $0.3 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$

3.4 lentelė. Tyrimo rezultatai keičiant debitą Q1

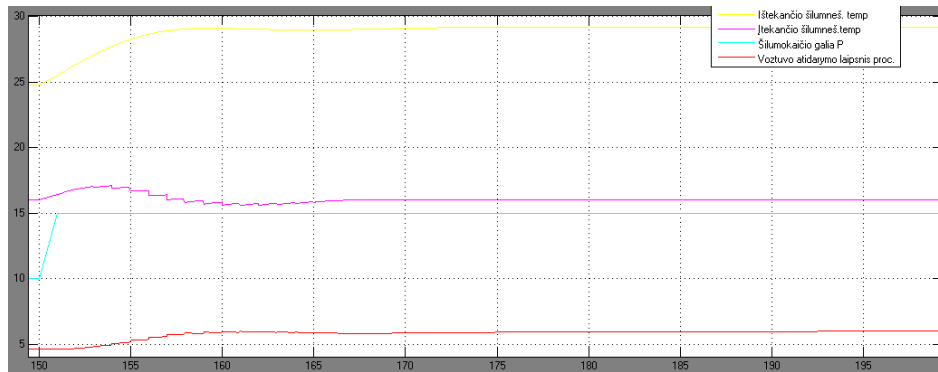
| T °C | Q1 | Q2 | σ (%) | Tr (s) | V. atidar. laipsnis % |
|------|------|-----|--------------|--------|-----------------------|
| 20 | 0.1 | 0.5 | 7.2 | 16 | 10.4 |
| 20 | 0.15 | 0.5 | 8.5 | 28 | 15.7 |
| 20 | 0.2 | 0.5 | 9.5 | 18 | 22.2 |
| 20 | 0.25 | 0.5 | 9.95 | 25 | 30.8 |
| 20 | 0.3 | 0.5 | 9.5 | 30 | 41.28 |

3.2.4 Keičiama užduotos temperatūros T °C ir debito Q1 reikšmė

Kaip ir ankstesniuose punktuose, keičiami modelio parametrai siekiant nustatyti modelio reguliavimo parametrus naudojant fuzzy reguliatorių. Temperatūros reikšmė T °C nustatoma nuo 16°C iki 26 °C, o debito Q1 reikšmė keičiama nuo $0.06 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ iki $0.25 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$. Debitas Q2 modelyje nustatomas $0.5 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$. Siekiama nustatyti, kaip PI reguliatorius veikia keičiant Q1 debito ir T °C temperatūros reikšmes, bei kokie sistemoje pasireiškia reguliavimo rodikliai. Keičiami modelio parametrai nurodyti (2.4) paveiksle.

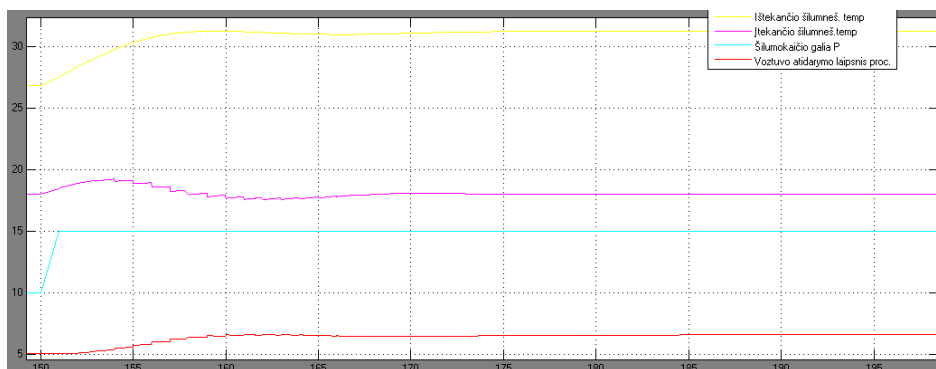
Debito Q1 ir temperatūros T °C reikšmių reguliavimo rodikliai atvaizduoti žemiau esančiuose paveiksluose. Atsižvelgiant į tai, kad keičiant debito ir temperatūros reikšmes gausis daugybė rezultatų, todėl atvaizduosime penkių skirtingų temperatūrų ir debitų reguliavimo rodiklius, kurie nurodyti žemiau esančiuose paveiksluose.

Kai užduotos temperatūros reikšmė T nustatoma 16 °C, debito Q1 reikšmė modelyje pasirenkama $0.06 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$:



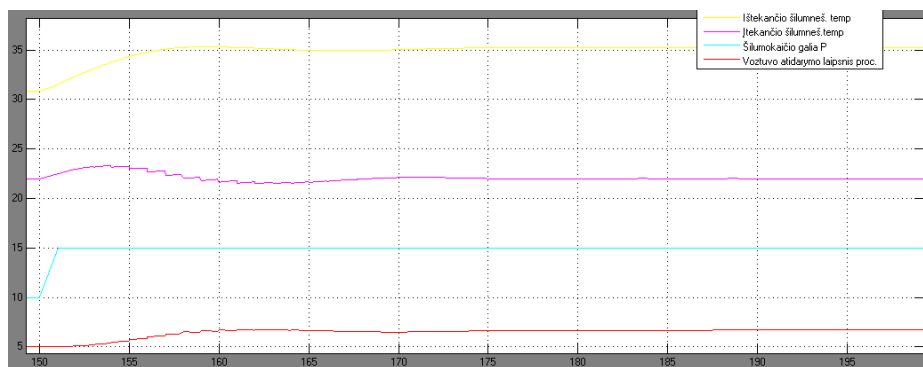
3.29 pav. T = 16 °C, debito Q1 reikšmė 0.06 m³h⁻¹

Kai temperatūros reikšmė T = 18 °C, debitas Q1 = 0.07 m³h⁻¹:



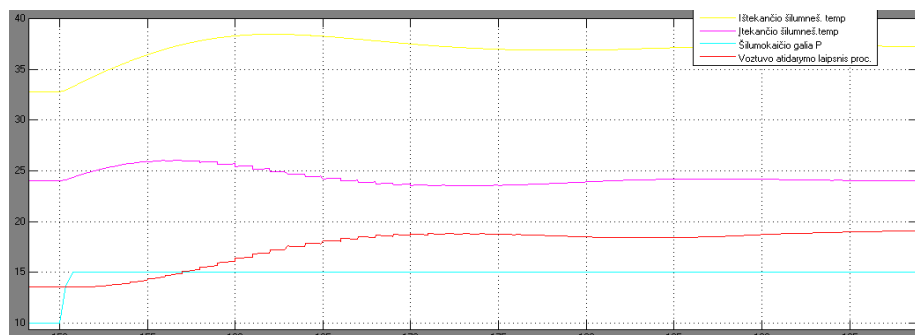
3.30 pav. T = 18 °C, debito Q1 reikšmė 0.07 m³h⁻¹

Kai temperatūros reikšmė T = 22 °C, debitas Q1 = 0.08 m³h⁻¹:



3.31 pav. T = 22 °C, debito Q1 reikšmė 0.08 m³h⁻¹

Kai temperatūros reikšmė T=24 °C, debitas Q1= 0.2 m³h⁻¹:



3.32 pav. $T = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$, debito $Q1$ reikšmė $0.2\text{ m}^3\text{h}^{-1}$

Palaisniui didinant ir mažinant užduotą temperatūrą, bei keičiant debitą analogiškai skaičiuojame pagal anksčiau minėtą formulę (2.3) ir gautus rezultatus surašome į (3.5) lentelę.

3.5 lentelė. Tyrimo rezultatai, keičiant temperatūrą, bei $Q1$ debitą

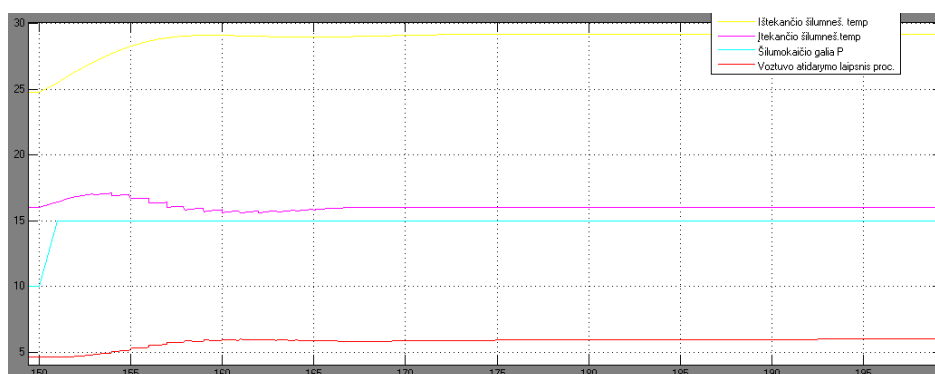
| T^0, C | $Q1$ | $Q2$ | $\sigma \%$ | $Tr \text{ (s)}$ | V. atidar. laipsnis % |
|-----------------|------|------|-------------|------------------|-----------------------|
| 18 | 0.08 | 0.5 | 6.8 | 15 | 6 |
| 18 | 0.07 | 0.5 | 6.4 | 18 | 6.6 |
| 18 | 0.06 | 0.5 | 5.9 | 20 | 6.7 |
| 18 | 0.12 | 0.5 | 8.3 | 28 | 19 |
| 18 | 0.15 | 0.5 | 9 | 33 | 15,3 |
| 18 | 0.2 | 0.5 | 10 | 45 | 22,2 |
| 18 | 0.25 | 0.5 | 10.6 | 50 | 30 |
| 16 | 0.08 | 0.5 | 7.7 | 20 | 8.2 |
| 16 | 0.07 | 0.5 | 7 | 15 | 7.1 |
| 16 | 0.06 | 0.5 | 6.3 | 23 | 5.8 |
| 16 | 0.12 | 0.5 | 9 | 36 | 13 |
| 16 | 0.15 | 0.5 | 9.7 | 43 | 16.7 |
| 16 | 0.2 | 0.5 | 10.8 | 56 | 26.3 |
| 16 | 0.25 | 0.5 | 10.3 | 75 | 38.2 |
| 22 | 0.08 | 0.5 | 5.6 | 20 | 6.3 |
| 22 | 0.07 | 0.5 | 5.2 | 16 | 5.4 |
| 22 | 0.06 | 0.5 | 4.9 | 23 | 4.5 |
| 22 | 0.12 | 0.5 | 7.2 | 18 | 9,3 |
| 22 | 0.15 | 0.5 | 7.7 | 30 | 13,8 |
| 22 | 0.2 | 0.5 | 9 | 55 | 21.16 |
| 22 | 0.25 | 0.5 | 9,8 | 65 | 27,5 |
| 24 | 0.08 | 0.5 | 5 | 20 | 6.1 |
| 24 | 0.07 | 0.5 | 4.5 | 15 | 5.3 |
| 24 | 0.06 | 0.5 | 4.9 | 26 | 4.8 |
| 24 | 0.12 | 0.5 | 6.7 | 13 | 9.9 |
| 24 | 0.15 | 0.5 | 7.5 | 30 | 12.3 |
| 24 | 0.2 | 0.5 | 8.1 | 35 | 18.9 |
| 24 | 0.25 | 0.5 | 9.2 | 56 | 25.6 |
| 26 | 0.08 | 0.5 | 4.4 | 20 | 5.8 |
| 26 | 0.07 | 0.5 | 4.4 | 18 | 4.8 |
| 26 | 0.06 | 0.5 | 4.5 | 30 | 4.1 |
| 26 | 0.12 | 0.5 | 6.1 | 12 | 7.8 |
| 26 | 0.15 | 0.5 | 7 | 28 | 11.6 |
| 26 | 0.2 | 0.5 | 7.8 | 43 | 17.3 |
| 26 | 0.25 | 0.5 | 9.1 | 43 | 23.8 |

3.2.5 Keičiama užduotos temperatūros T °C ir debito Q2 reikšmė

Kaip ir ankstesniuose punktuose, keičiami modelio parametrai siekiant nustatyti modelio reguliavimo parametrus. Temperatūros reikšmė T °C nustatoma nuo 16 °C iki 26 °C, o debito Q2 reikšmė keičiama nuo $0.3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ iki $0.7 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Debitas Q1 modelyje nustatomas $0.1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Siekiama nustatyti, kaip PI reguliatorius veikia keičiant Q2 debito ir T °C temperatūros reikšmes, bei kokie sistemoje nustatomi reguliavimo rodikliai. Keičiami modelio parametrai nurodyti (2.4) paveiksle.

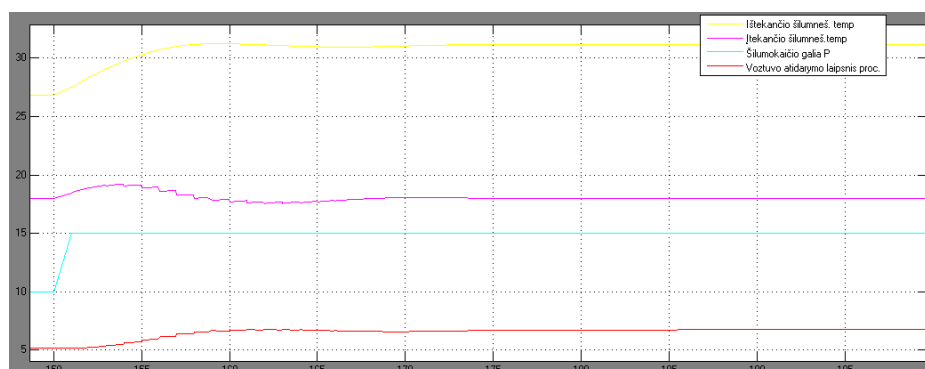
Debito Q2 ir temperatūros T °C reikšmių reguliavimo rodikliai atvaizduoti žemiau esančiuose paveiksluose. Atsižvelgiant į tai, kad keičiant debito ir temperatūros reikšmes gausis daugybė rezultatų, todėl atvaizduosime prie penkių skirtingų temperatūrų ir debitų reguliavimo rodiklius, kurie nurodyti žemiau esančiuose paveiksluose.

Kai pasirinktos temperatūros reikšmė T nustatoma 16 °C, o debito Q2 reikšmė modelyje pasirenkama $0.4 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$:



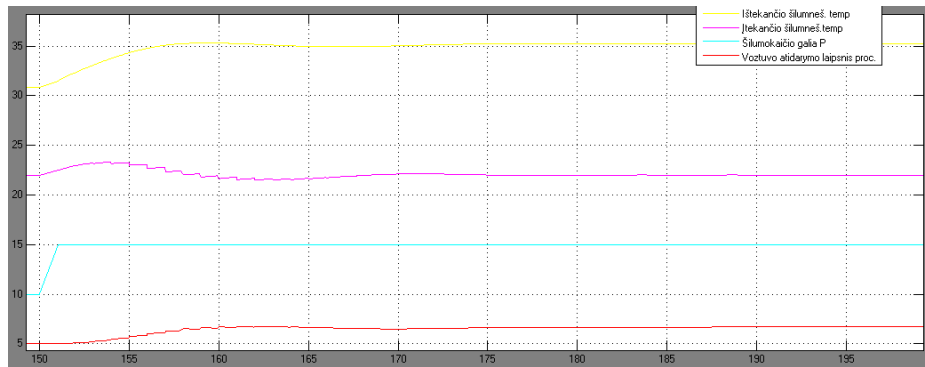
3.34 pav. T = 16 °C, debito Q2 reikšmė $0.4 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$

Kai temperatūros reikšmė T = 18 °C, ir debitas Q2 = $0.7 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$:



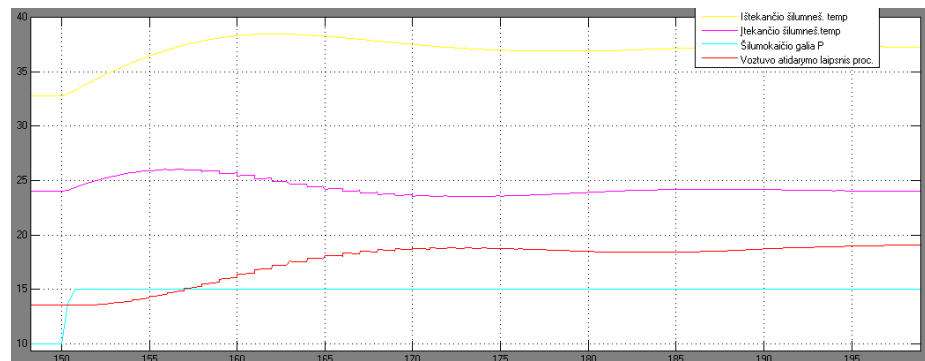
3.35 pav. T = 18 °C, debito Q2 reikšmė $0.7 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$

Kai temperatūros reikšmė $T = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$, ir debitas $Q_2 = 0.3\text{ m}^3\text{h}^{-1}$:



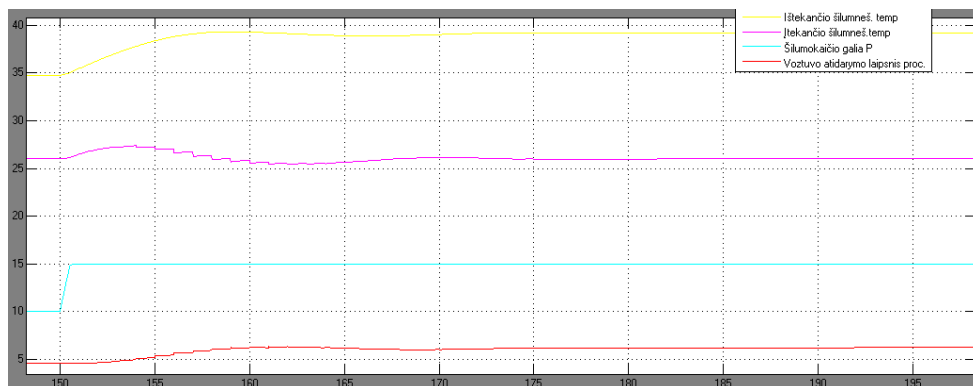
3.36 pav. $T = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$, debito Q_2 reikšmė $0.3\text{ m}^3\text{h}^{-1}$

Kai temperatūros reikšmė $T = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$, o debitas $Q_2 = 0.55\text{ m}^3\text{h}^{-1}$:



3.37 pav. $T = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$, debito Q_2 reikšmė $0.55\text{ m}^3\text{h}^{-1}$

Kai temperatūros reikšmė $T = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$, debitas $Q_2 = 0.65\text{ m}^3\text{h}^{-1}$:



3.38 pav. $T = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$, debito Q_2 reikšmė $0.6\text{ m}^3\text{h}^{-1}$

Palapsniui didinant ir mažinant užduotą temperatūrą, bei debitą Q_2 analogiškai skaičiuojame pagal anksčiau minėtą (2.3) formulę ir gautus rezultatus surašome į (3.6) lentelę.

3.6 lentelē. Tyrimo rezultatai, keičiant temperatūrā, bei Q2 debitā

| T^o, C | Q1 | Q2 | σ % | Tr (s) | V. atidar. laipsnis |
|-------------------------|-----------|-----------|------------|---------------|----------------------------|
| 18 | 0.1 | 0.45 | 8.5 | 20 | 10.3 |
| 18 | 0.1 | 0.4 | 8.3 | 30 | 12.5 |
| 18 | 0.1 | 0.3 | 9.5 | 38 | 19 |
| 18 | 0.1 | 0.55 | 7.5 | 15 | 8.8 |
| 18 | 0.1 | 0.65 | 6.7 | 10 | 7 |
| 18 | 0.1 | 0.7 | 6.2 | 10 | 6.3 |
| 16 | 0.1 | 0.45 | 9 | 18 | 11.8 |
| 16 | 0.1 | 0.4 | 7.5 | 33 | 13.5 |
| 16 | 0.1 | 0.3 | 9.6 | 45 | 18.5 |
| 16 | 0.1 | 0.55 | 7.5 | 20 | 8.7 |
| 16 | 0.1 | 0.65 | 7.1 | 18 | 7.1 |
| 16 | 0.1 | 0.7 | 7 | 14 | 7.1 |
| 22 | 0.1 | 0.45 | 6.8 | 15 | 8.7 |
| 22 | 0.1 | 0.4 | 7.2 | 18 | 9.8 |
| 22 | 0.1 | 0.3 | 8 | 30 | 14.1 |
| 22 | 0.1 | 0.55 | 6.1 | 20 | 6.8 |
| 22 | 0.1 | 0.65 | 5.4 | 10 | 6.1 |
| 22 | 0.1 | 0.7 | 5.1 | 10 | 5.41 |
| 24 | 0.1 | 0.45 | 5.4 | 12 | 8.3 |
| 24 | 0.1 | 0.4 | 7 | 15 | 9.8 |
| 24 | 0.1 | 0.3 | 7.2 | 25 | 13.3 |
| 24 | 0.1 | 0.55 | 5.2 | 12 | 6.8 |
| 24 | 0.1 | 0.65 | 5 | 10 | 5.6 |
| 24 | 0.1 | 0.7 | 4.8 | 10 | 5.1 |
| 26 | 0.1 | 0.45 | 6.1 | 12 | 8.3 |
| 26 | 0.1 | 0.4 | 5.9 | 13 | 8.8 |
| 26 | 0.1 | 0.3 | 7.1 | 20 | 12.7 |
| 26 | 0.1 | 0.55 | 5.1 | 10 | 6.4 |
| 26 | 0.1 | 0.65 | 4.4 | 15 | 5.2 |
| 26 | 0.1 | 0.7 | 4.3 | 17 | 4.8 |

4. TYRIMO REZULTATŲ PALYGINIMAS IR ĮVERTINIMAS

Iš atliktų tyrimų gautų parametrų apskaičiuosime, PI ar fuzzy reguliatorius pasiekia mažiausią perreguliavimą. Perreguliavimo reikšmę skaičiuosime viso skyriaus gautus parametrus sudedant kartu ir gaunant bendrą perreguliavimą procentais ir nusistovėjimo laiką sekundėmis. Sistemos dinamikos rodiklius nustatysime remiantis (4.1) formule.

$$\frac{\text{suma}}{\text{narių.sk}}; \quad (4.1)$$

4.1 lentelė. Tyrimo rezultatai keičiant temperatūrą

| PI reguliatorius | | Fuzzy reguliatorius | |
|----------------------------------|--------|---------------------|--------|
| σ % | Tr (s) | σ % | Tr (s) |
| 7.09 % | 16.8 s | 6.6 % | 15.8 s |
| Skirtumas (σ %) = 0.49 % | | | |
| Skirtumas (Tr (s)) = 1 s | | | |

4.2 lentelė. Tyrimo rezultatai keičiant Q2 debitą

| PI reguliatorius | | Fuzzy reguliatorius | |
|--------------------------------|--------|---------------------|--------|
| σ % | Tr (s) | σ % | Tr (s) |
| 7.82 % | 22.8 s | 7.3 % | 18.8 s |
| Skirtumas (σ %) = 0.52 | | | |
| Skirtumas (Tr (s)) = 4 s | | | |

4.3 lentelė. Tyrimo rezultatai keičiant Q1 debitą

| PI reguliatorius | | Fuzzy reguliatorius | |
|----------------------------------|--------|---------------------|--------|
| σ % | Tr (s) | σ % | Tr (s) |
| 9.83 % | 57 s | 8.9 % | 23.4 s |
| Skirtumas (σ %) = 0.93 % | | | |
| Skirtumas (Tr (s)) = 33.6 s | | | |

4.4 lentelė. Tyrimo rezultatai keičiant temperatūrą ir debitą Q1

| PI reguliatorius | | Fuzzy reguliatorius | |
|----------------------------------|--------|---------------------|--------|
| σ % | Tr (s) | σ % | Tr (s) |
| 7.69 % | 39 s | 6.92 % | 30 s |
| Skirtumas (σ %) = 0.77 % | | | |
| Skirtumas (Tr (s)) = 9 s | | | |

4.5 lentelė. Tyrimo rezultatai keičiant temperatūrą ir debitą Q2

| PI reguliatorius | | Fuzzy reguliatorius | |
|----------------------------------|--------|---------------------|--------|
| σ % | Tr (s) | σ % | Tr (s) |
| 7.16 % | 20.6 s | 6.4 % | 17.4 s |
| Skirtumas (σ %) = 0.76 % | | | |
| Skirtumas (Tr (s)) = 3.2 s | | | |

IŠVADOS IR REZULTATAI

Projekto tikslas buvo sudaryti šilumokaičio temperatūros reguliavimo sistemą naudojant PI ir fuzzy reguliatorius. Suprojektuoti PI ir fuzzy reguliatoriai bei jie suderinti. Atlikto tyrimo duomenimis buvo nustatyta, kaip PI ir fuzzy reguliatorius veikia prie skirtingų temperatūros T °C bei $Q1$ ir $Q2$ debito reikšmių ir kokie sistemoje pasireiškia reguliavimo rodikliai taip pat nustatyta, kuris reguliatorius tinkamiausias šiai sistemai.

1. Atlikus literatūros analizę buvo nuspręsta palyginimui naudoti PID ir fuzzy reguliatorius, kadangi literatūros analizės eigos metu nebuvo aptikta susijusių darbų lyginant šiuos du reguliatorius šilumokaičio temperatūros reguliavimo sistemose.
2. Sudarytos šilumokaičio temperatūros valdymo sistemos modelis su PI ir fuzzy reguliatoriais leidžia tirti kaip valdymo sistemos veikia prie skirtingų temperatūros T bei debito $Q1$ ir $Q2$ reikšmių.
3. Suprojektuotas PI reguliatorius užtikrina, kad valdymo sistemos dinaminiai rodikliai kito tokiose ribose: (σ % nuo 5 – 11.66 proc, Tr (s) nuo 10 – 110 s), keičiant temperatūrų ir debitų reikšmes.
4. Suprojektuotas neraiškios logikos reguliatorius užtikrina, kad valdymo sistemos dinaminiai rodikliai kito tokiose ribose: (σ % nuo 4.3 – 9.95 proc, Tr (s) nuo 8 – 80 (s)), keičiant temperatūrų ir debitų reikšmes.
5. Tyrimo metu nustatyta, kad šilumokaičio temperatūros reguliavimui gali būti naudojamas ir neraiškios logikos reguliatorius, kuris konkrečiu atveju užtikrina geresnius valdymo sistemos dinaminis rodiklius nei PI reguliatorius.

LITERATŪRA

1. Aleksa V. *Technologinių procesų automatizavimas*. „Technologija“, Kaunas, 2004. ISBN 9955-09-445-1.
2. Ivanauskas A. *Automatinio valdymo teoriniai pagrindai*. „Technologija“, Kaunas, 2005. ISBN 9955-09-964-X.
3. Brazdeikis L. *Kondensacinio šilumokaičio temperatūros reguliavimo modeliavimas*. Žemės ūkio inžinerija. Mokslo darbai, 2010, t. 42 (4), p. 16–28.
4. Kveselis V., Masaitis S., Urbonas P. *Quality assurance for hot water supply from DH system: simulation tool and application*. Journal of Civil Engineering and Management. Vilnius: Technika, 2006, t. 12, Nr. 1, p. 15–19.
5. Passino K. M., Yurkovich S. *Fuzzy Control*. 1998. ISBN 0-201-18074X.
6. Liutkevičius R., Barzdaitis V. *Netiesinio laboratorinio proceso „fuzzy“ regulatorius*. Informacinės visuomenės ir universitetinės studijos. 2001 konferencijos pranešimu medžiaga.
7. Abonyi J. *Fuzzy Model Identification for Control*. Boston, 2003. ISBN 0-8176-4238-2, ISBN3-7543-4232-2.
8. Kovacic Z., Bogdan S. *Fuzzy Controller Design Theory and Applications*. 2006 ISBN 0-8493-3747-X.
9. Brazdeikis L. *Šilumokaičio vanduo-oras perdavimo funkcija*. Žemės ūkio inžinerija: LŽŪ Universiteto mokslo darbai, 2010, t. 42 (1), p. 5–14.
10. Chen G., Pham T. T. *Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic and Fuzzy Control Systems*. CRC Press, USA, 2001. ISBN 0-8493-1658-8.
11. Komareji M. *Optimal Model-Based Control in HVAC Systems*. American Control Conference. Seattle, Washington, 2008, p. 1443–1448.
12. Regulatoriaus PID derinimas [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 m. gegužės 01 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.expertune.com/Tutor2.html>.
13. Parametriškai optimizuojami regulatoriai. PID regulatorius [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 m. balandžio 01 d.]. Prieiga per internetą: http://fcim.vdu.lt/~raimundas_liutkevicius/kvs/Dien/lab/vslab1.doc.
14. PID Controller Tutorial [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 m. kovo 05 d.]. Prieiga per internetą: http://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller.
15. Fuzzy Logic Tutorial [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 m. kovo 23 d.]. Prieiga per internetą: http://en.wikipedia.org/wiki/Fuzzy_logic.
16. Fuzzy Logic Tutorial [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 m. kovo 20 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.seattlerobotics.org/encoder/mar98/fuz/flindex.html>.

17. Proceso valdymas taikant „fuzzy“ logiką [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 m. vasario 12 d.]. Prieiga per internetą: <http://internet.ktu.lt/lt/mokslas/zurnalai/elektr/z64/Valiulio%20str.pdf>.
18. EGT 311 Clamp-on temperature detector. [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 m. balandžio 11 d.]. Prieiga per internetą: www.sautercontrols.com/pdm/docs/en_ds_en525903.pdf.
19. Wilhelmsson Ch. *Simulation of condensation in a heat exchanger*. Lund Institute of technology, 2004. – 18 p.
20. Fuzzy logika procesuose [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 m. gegužės 01 d.]. Prieiga per internetą: <http://ifveikla.vdu.lt/uploads/File/Data/FuzzyLogikaSistemuValdymui.exe>.
21. Neraiškių sistemų panaudojimas elektros energetikoje [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 m. kovo 03 d.]. Prieiga per internetą: http://www.lei.lt/_img/_up/File/atvir/pub_apie_lei/MT-2007_Nr.7-8
22. Petri Nets World: Online Services for the International Petri Nets Community [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 m. vasario 15 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.daimi.au.dk/PetriNets/>
23. Kriščiūnas D. Gyvenamojo namo šildymo ir vėdinimo sistemos kompiuterinio valdymo modelio sudarymas ir tyrimas naudojant Petri tinklą. Ktu magistro darbas, Kaunas, 2008, p. 11-16.
24. Cortés L. A., Eles P., Peng Z. A. *Survey on Hardware/Software Codesign Representation Models* [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 m. balandžio 09 d.]. Prieiga per internetą: www.ida.liu.se/labs/eslab/publications/pap/db/SAVE99.pdf
25. Jerraya A., O'Brien K. *SOLAR: An Intermediate Format for System-Level Modeling and Synthesis, in Codesign*. 1995.
26. Chiodo M., Giusto P., Hsieh H., Jurecska A., Lavagno L., Sangiovanni-Vicentelli A. *Formal Specification Model for Hardware/Software Codesign*. Techninis raportas UCB/ERL M93/48, Dept. EECS, Kalifornijos Berklio Universitetas, 1993.
27. Harel D. *A Visual Formalism for Complex Systems, in Science of Computer Programming*, p. 231-274, 1987.
28. Nacionalinė energetikos strategija. *Valstybės žinios*, 2007, Nr. 11– 430.
29. Honeywell. *Engineering manual of automatic control for commercial buildings*. 1997, 507 p.
30. Montgomery R., McDowall R. *Fundamentals of HVAC control systems*. Atlanta, ASHRAE, 2008, 365 p.
31. Крейт Ф., Блэк У. *Основы теплопередачи: Пер. с англ., М. Мир*, 1983, 512 с.
32. Clamp-on temperature detector. [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 m. gegužės 15 d.]. Prieiga per internetą: www.sautercontrols.com/pdm/docs/en_ds_en525903.pdf.