



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Garso katilo vandens lygio būgne režimų modeliavimas ir valdymas

Baigiamasis magistro projektas

Laurynas Pilibaitis

Projekto autorius

Prof. hab. dr. Rimvydas Simutis

Vadovas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Garo katilo vandens lygio būgne režimų modeliavimas ir valdymas

Baigiamasis magistro projektas

Valdymo technologijos (6211EX014)

Laurynas Pilibaitis

Projekto autorius

(parašas)
(data)

Prof. hab. dr. Rimvydas Simutis

Vadovas

(parašas)
(data)

Doc. Kęstutis Brazauskas

Recenzentas

(parašas)
(data)

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Laurynas Pilibaitis

Garų katilo vandens lygio būgne režimų modeliavimas ir valdymas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Lauryno Pilibaičio, baigiamasis projektas tema „Garų katilo vandens lygio būgne režimų modeliavimas ir valdymas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir 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)

Laurynas Pilibaitis. Garo katilo vandens lygio būgne režimų modeliavimas ir valdymas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas / prof. hab. dr. Rimvydas Simutis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir Elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Elektronikos inžinerija, inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: garo katilas, imitatorius, proceso modeliavimas, lygio valdymas, valdymo režimai, verifikavimas.

Kaunas, 2019. 63 p.

Santrauka

Šiame tiriamajame darbe atlikta garo katilo vandens lygio režimų analizė, realizuotas supaprastintas ir išplėstinis garo katilo vandens lygio režimų matematinis modeliai. Buvo parinkti modelio parametrai remiantis realiais duomenimis, sukurta vartoto sąsaja *Matlab Simulink* programiniame pakete įvairių valdymo režimų realizavimui. Imitacinis garo katilo vandens lygio režimų matematinis modelis verifikuotas taikant realius elektrinės duomenis. Atlikti tyrimai parodė, kad modelis adekvatus ir jį rekomenduojama taikyti procesų operatoriams tiriant įvairius valdymo režimus, efektyvumą ir derinant valdymo sistemą.

Laurynas Pilibaitis. Modeling and Control of Drum Water Level Regimes in the Boiler. Master's Final Degree / supervisor prof. hab. dr. Rimvydas Simutis; Electrical and Electronics Engineering Faculty, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Electronics engineering, engineering science.

Keywords: steam drum, simulator, process modeling, level control, control regimes, verification.

Kaunas, 2019. p.63

Summary

In this research, steam boiler water level mode analysis was performed, simplified and extended mathematical models of steam boiler water level modes were implemented. Model parameters were selected based on real data, user interface created in Matlab Simulink software package for realization of various control modes. Simulation model of steam boiler water level modes has been verified using real power plant data. The research has shown that the model is adequate and recommended for process operators in the study of various control modes, efficiency and tuning.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Įvadas.....	10
1. Garo katilo charakterizavimas.....	12
2. Garo katilo dinamika	13
3. Garo katilo vandens lygio būgne palaikymas	14
3.1. Vandens lygio palaikymas naudojant vieną matavimo elementą.....	15
3.2. Vandens lygio palaikymas naudojant du matavimo elementus.....	16
3.3. Vandens lygio palaikymas naudojant tris matavimo elementus.....	17
4. Garo katilo darbo režimų analizė	18
4.1. Normalus (tinklo) režimas	18
4.2. Kintamas (salos) režimas.....	18
5. Matematinis garo katilo būgno darbo režimo modeliavimas.....	20
5.1. Supaprastintas garo katilo modelis	20
5.2. Išplėstinis garo katilo modelis	21
6. Garo katilo modelio modeliavimas ir proceso imitatoriaus kūrimas	26
6.1. Supaprastinto modelio realizavimas.....	26
6.1.1. Proceso įėjimo/išėjimo kintamieji, trikdžiai, manipuluojami kintamieji ir jų kitimo ribos .	26
6.1.2. Modeliavimo parametrų parinkimas.....	27
6.1.3. Modelio realizavimas	27
6.1.4. Proceso valdymas, regulatoriaus parametrų parinkimas bei derinimas ir režimų modeliavimas.....	29
6.1.5. Išvados.....	33
6.2. Išplėstinio modelio realizavimas	34
6.2.1. Proceso įėjimo/išėjimo kintamieji, trikdžiai, manipuluojami kintamieji ir jų kitimo ribos .	34
6.2.2. Modeliavimo parametrų parinkimas.....	35
6.2.3. Modelio realizavimas	36
6.2.4. Proceso valdymas, reguliatorių parametrų parinkimas bei derinimas ir režimų modeliavimas	40
7. Modelio verifikavimas.....	55
7.1. Elektrinės duomenys	55
7.2. Modelio verifikavimas remiantis elektrinės duomenimis	55
Resultatai ir išvados	59
Literatūros sąrašas	60
Priedai.....	64
1 priedas. Garo katilo modelio <i>S-function</i> kodas.....	64
2 priedas. Elektrinės duomenys	72

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Supaprastinto modelio proceso būsenos kintamieji	26
2 lentelė. Supaprastinto modelio proceso įėjimo kintamieji	26
3 lentelė. Išplėstinio modelio proceso būsenos kintamieji.....	34
4 lentelė. Išplėstinio modelio proceso įėjimo kintamieji	35
5 lentelė. Lygio valdymo rezultatai naudojant abi valdymo opcijas.....	53
6 lentelė. Slėgio valdymo rezultatai naudojant abi valdymo opcijas	54

Paveikslų sąrašas

1 pav. Vandens garavimo, garo susidarymo procesas [1].....	15
2 pav. Teisingai suderintos sistemos kintamųjų tarpusavio ryšio grafikas [1]	15
3 pav. Lygio valdymas naudojant vieną elementą [2]	16
4 pav. Lygio valdymas naudojant du elementus [2]	16
5 pav. Lygio valdymas naudojant tris elementus [2]	17
6 pav. Apie cilindrą apibrėžtas stačiakampis	23
7 pav. Supaprastinto modelio realizavimas <i>Matlab Simulink</i> aplinkoje	28
8 pav. Matematinų lygčių realizacija <i>DEE</i> blokuose.....	28
9 pav. Slėgio ir tūrio grafikai be regulatoriaus (slėgis dešinėje, tūris kairėje).....	29
10 pav. Supaprastinto modelio realizavimas, kuriame integruota valdymo sistema	30
11 pav. Slėgio (kairėje) ir tūrio (dešinėje) grafikai, kai pridedamas regulatorius bei pradinės sąlygos padidintos vienetu.....	31
12 pav. Ištekėjimo srauto pasikeitimas (sistemos trikdys).....	31
13 pav. Slėgio kitimo grafikas, kai sistemą veikia trikdys.....	32
14 pav. Tūrio kitimo grafikas, kai sistemą veikia trikdys.....	32
15 pav. Slėgio kitimo grafikas keičiantis užduoties signalams.....	33
16 pav. Tūrio kitimo grafikas keičiantis užduoties signalams	33
17 pav. Išplėstinio modelio realizavimas, kuriame integruota valdymo sistema.....	36
18 pav. „2 el“ posistemės vaizdas <i>Simulink</i> aplinkoje	37
19 pav. „Trikdys“ posistemės vaizdas <i>Simulink</i> aplinkoje	37
20 pav. „Valdymo modulis - 1“ posistemės vaizdas <i>Simulink</i> aplinkoje.....	37
21 pav. „Valdymo modulis - 2“ posistemės vaizdas <i>Simulink</i> aplinkoje.....	37
22 pav. Tankių ir entalpijų skaičiavimas. Programos fragmentas	38
23 pav. Išvestinių skaičiavimas. Programos fragmentas.....	38
24 pav. Parametrų įvedimo langas	39
25 pav. Suderintos sistemos lygio kitimo grafikas. x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – lygis %... 40	40
26 pav. Suderintos sistemos slėgio kitimo grafikas. x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – slėgis bar.41	41
27 pav. Sistemos trikdys (šilumos kiekio pokytis). x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – šilumos kiekis MW.....	41
28 pav. Lygio ir slėgio kitimo grafikai, kai įvedamas trikdys. x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – atitinkamai slėgis bar, lygis %.....	42
29 pav. Valdymo signalai (viršuje vandens srautas, apačioje garo srautas). x ašis – laikas sekundėmis, y ašis- kg/s	42
30 pav. Sistemos reakcija į išorinius srautų pokyčius. x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – atitinkamai slėgis bar, lygis %.....	43
31 pav. Valdymo signalų bei šilumos kiekio kitimo grafikas. x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – atitinkamai srautai kg/s, šilumos kiekis MW.....	43
32 pav. Sistemos reakcija į trikdžius. x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – atitinkamai slėgis bar, lygis %.....	45
33 pav. Valdymo signalai (viršuje vandens srautas, viduryje šilumos kiekis, apačioje garo kiekis). x ašis – laikas sekundėmis, y ašis- atitinkamai srautams kg/s, šilumos kiekiui MW	45
34 pav. Suderintos sistemos lygio kitimo grafikas. x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – lygis % 46	46
35 pav. Suderintos sistemos slėgio kitimo grafikas. x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – slėgis bar.47	47

36 pav. Sistemos trikdys (garo srauto pokytis). x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – šilumos kiekis kg/s	47
37 pav. Lygio ir slėgio kitimo grafikai, kai įvedamas trikdys. x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – atitinkamai slėgis bar, lygis %	48
38 pav. Valdymo signalai (viršuje vandens srautas, apačioje šilumos kiekis). x ašis – laikas sekundėmis, y ašis- atitinkamai srautui kg/s, šilumos kiekiui MW	48
39 pav. Sistemos reakcija į išorinius srautų pokyčius. x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – atitinkamai slėgis bar, lygis %	49
40 pav. Valdymo signalų bei garo srauto kitimo grafikas. x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – atitinkamai srautai kg/s, šilumos kiekis MW.....	49
41- pav. Lygio bei valdančiojo signalo (įtekančio vandens) kitimo grafikas. Aukščiau pateikiamas lygio kitimo grafikas, žemiau – srauto. x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – atitinkamai srautai kg/s, lygis %	50
42 pav. Sistemos reakcija į trikdžius. x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – atitinkamai slėgis bar, lygis %	51
43 pav. Valdymo signalai (viršuje vandens srautas, viduryje šilumos kiekis, apačioje garo kiekis). x ašis – laikas sekundėmis, y ašis- atitinkamai srautams kg/s, šilumos kiekiui MW	51
44 pav. Lygio bei valdančiojo signalo (įtekančio vandens) kitimo grafikas. Aukščiau pateikiamas srauto kitimo grafikas, žemiau – lygio. x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – atitinkamai srautai kg/s, lygis %	52
45 pav. Elektrinės duomenys. x ašis – laikas valandomis, y ašis – atitinkamai kiekvienam matavimui (galia [MW], srautai [kg/s], slėgis [bar], vandens lygis [%])	55
46 pav. Įtekančio vandens srautai, kai šilumos kiekis sumažėja. x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – srautai kg/s.....	56
47 pav. Įtekančio vandens srautai, kai šilumos kiekis padidėja. x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – srautai kg/s.....	56
48 pav. Garo srautai, kai šilumos kiekis sumažėja. x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – srautai kg/s	56
49 pav. Garo srautai, kai šilumos kiekis padidėja. x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – srautai kg/s	57
50 pav. Vandens lygiai, kai šilumos kiekis sumažėja. x ašis – laikas sekundėmis, y ašis (kairėje sumodeliuotam, o dešinėje elektrinės) – lygis %	57
51 pav. Vandens lygiai, kai šilumos kiekis padidėja. x ašis – laikas sekundėmis, y ašis (kairėje sumodeliuotam, o dešinėje elektrinės) – lygis %	57
52 pav. Garo slėgiai, kai šilumos kiekis sumažėja. x ašis – laikas sekundėmis, y ašis (kairėje sumodeliuotam, o dešinėje elektrinės) – slėgis bar	58
53 pav. Garo slėgiai, kai šilumos kiekis padidėja. x ašis – laikas sekundėmis, y ašis (kairėje sumodeliuotam, o dešinėje elektrinės) – slėgis bar	58

Įvadas

Garas yra pagrindinis produktas gaminamas garo katilinėse. Jis gali būti naudojamas technologiniuose procesuose ar pastatam šildyti. Technologiniuose procesuose naudojamas garas turi būti aukštos kokybės, slėgio bei temperatūros. Jis yra gaminamas specialiuose katiluose (būgnuose) palaikant pastovų vandens lygį. Tokiame katile slėgis yra didesnis už atmosferinį slėgį [3,5]. Tik dėl garo katilo yra sukama garo turbina ir generuojama elektros energija, nes jis tiekia garo turbina aukštos kokybės, temperatūros bei slėgio garą.

Garų katilo dinamika yra sudėtinga todėl projektuojant valdymo sistemą pravartu turėti garo katilo imitacinį modelį. Toks modelis leistų proceso operatoriams testuoti įvairius valdymo algoritmus ir katilo eksploatavimui pasirinkti tuos valdymo režimus, kurie yra efektyviausi todėl egzistuoja nemažai tyrimų, kuriuose modeliuojamas garo katilas, valdymo būdai ir atskiri garo katilo funkcionavimo elementai.

S. R. Tawfeic straipsnyje „Boiler drum-level modeling“ [27] modeliavimui naudoja Astrom ir Bell [9] matematinę lygtį, kurios gerai apibūdina garo katilo bei jo komponentų dinamiką. Pačiame straipsnyje taip pat daug dėmesio skiriama garo katilo dinamikai, tačiau apie patį modelio realizavimą bei vartotojo sąsają informacija nepateikiama.

Sunil P U, Jayesh Barve, P.S.V. Nataraj savo straipsnyje [25] nagrinėja kelis modelius (taip pat įskaitant minėtą Astrom ir Bell modelį). Jų realizuoto modelio reakcija vykstant elektrinės paleidimui yra geresnė nei straipsnyje nagrinėjamuose modeliuose, gautas modelis gali dirbti plačiame dinaminiame diapozone, o gauti rezultatai atitinka realius duomenis.

Cristina Halauca ir Corneliu Lazar [21] realizavo tris modelius: garo katilo, perkaitintuvo bei pakylančių/nusileidžiančių vamzdžių. Straipsnyje aiškiai išnagrinėtas procesas, modeliai verifikuoti remiantis realiais duomenimis.

Graciano Dieck-Assad, José Luis Vega-Fonseca, Isaías Hernández-Ramírez ir Antonio Favela-Contreras realizuotas modelis [26] yra kiek kitoks. Jų modelis apima visus elektrinės komponentus (perkaitintuvus, garintuvus, pašildytuvus) bei jų valdymo sistemas. Garo katilas nėra detalizuojamas, užsimenama apie trijų elementų valdymą.

Pastarasis modelis yra truputį panašus į M. E. Flynn ir M. J. O' Malley tyrimą [15], nes čia taip pat aprašomi ir nagrinėjami kiti šiluminės elektinės komponentai darantys įtaką garo katilo valdymui. Nagrinėjama ne tik dinamika, bet ir garo katilo lygio valdymas. Straipsnio pabaigoje pateikiami rezultatai bei palyginami su realiais šiluminės elektrinės duomenimis.

Daniel Bouskela straipsnyje [13] daug dėmesio skiriama pasikeitimo iš vienos būsenos į kitą dinamikai. Nors ji detalai aprašyta ir išnagrinėta, tačiau kaip vyko testavimas neužsimenama.

Priešingai E.Cheres straipsnyje [14]. Čia detalai nurodoma kaip reikia surinkti duomenis, koeficientus norint verifikuoti garo katilo modelį, kokiomis matematinėmis išraiškomis buvo remiamasi atliekant bandymus, tačiau straipsnyje minimi metodai reikalauja nemažai išteklių bei neturi patogios vartotojo sąsajos.

Svarbiausias valdymo uždavinys yra palaikyti vandens lygį – nei per aukštą, nei per žemą, tačiau tai padaryti ne visada yra lengvas uždavinys. Modeliuojant verta atkreipti dėmesį į vandens bangavimą,

pakylančiuose bei nusileidžiančiuose vamzdžiuose vykstančią vandens cirkuliaciją, garo kokybę bei garo tūrį vandenyje.

Nemažai mokslinių straipsnių nagrinėja tik garo katilo valdymą. Tokiuose straipsniuose dažniausiai garo katilo dinamika nėra detalai nagrinėjama, nes daugiau dėmesio skiriama valdymo būdams bei jų verifikavimui. Nemažai atlikta tyrimų, kuriuose tradicinius PID reguliatorius siūloma keisti į neraiškios logikos (angl. *fuzzy*) reguliatorius [16, 19], naudoti QFT ar kaskadinį valdymą [17, 20], bet daugiausia yra straipsnių, kuriuose nagrinėjamas vieno – trijų elementų valdymas, jų privalumai ir trūkumai [12, 18, 23].

Nors minėtuose straipsniuose dažniausiai detalai nagrinėjamas vykstantis procesas, garo katilo dinamika bei valdymo būdai, jie neapima patogaus proceso imitatoriaus, kurį galėtų lengvai naudoti proceso operatoriai ar valdymo sistemų kūrėjai.

Tyrimo tikslas - sukurti garo katilo vandens lygio būgne režimų imitacinį matematinį modelį, kuris būtų instrumentas - pagalbinkas proceso operatoriams ir valdymo sistemų derintojams. Sukurtą matematinį modelį verifikuoti remiantis realiais duomenimis.

Uždaviniai:

1. išanalizuoti garo katilo dinamiką;
2. išsiaiškinti garo katilo vandens lygio valdymo būdus, galimus šiluminės elektrinės darbo režimus;
3. parengti garo katilo vandens lygio matematinius modelius (supaprastintą ir išplėstinį), realizuoti ir išbandyti taikant *Matlab* programinę aplinką;
4. išanalizuoti galimus garo katilo vandens lygio valdymo būdus ir juos palyginti;
5. verifikuoti išplėstinį garo katilo vandens lygio kitimo matematinį modelį remiantis realiais duomenimis.

1. Garo katilo charakterizavimas

Garų katilo būgnas gali būti dviejų tipų: ugnies vamzdžių (angl. *fire-tube*) arba vandens vamzdžių (angl. *water-tube*). Pirminio tipo būgnai yra dažnai riboto dydžio, vidutiniškai pagaminantys 11,340 kg/h ir 1.7MPa slėgio prisotinto garo. Tokio tipo būgnai yra žinomi dėl jų gebėjimo reaguoti į besikeičiančius poreikius, tačiau dydis ir slėgio apribojimai neleidžia būgno naudoti dideliuose pramoniniuose objektuose. Dėl termodinaminių priešaščių, katilai turėtų gaminti aukštos temperatūros ir slėgio garą, kad būtų pasiektas didžiausias darbo efektyvumas. Tokios sąlygos yra tenkinamos naudojant vandens vamzdžių katilą [1,9].

Garų katilai yra naudojami elektros gamybos pramonėje, kur aukštos temperatūros ir slėgio garas yra reikalingas garo turbinai, kuri suka generatorių, o šis gamina elektros energiją, taip pat, jie dar yra naudojami gamybos ir perdirbimo pramonėje, kur garas reikalingas technologiniuose procesuose (pvz.: romo gamybai reikalingas cukrus, kuris gaunamas iš cukranendrių, o cukrui gauti reikalingas aukštos temperatūros garas). Elektros pramonėje naudojami katilai linkę būti didesni ir galintys veikti aukštesniuose slėgio intervaluose: tipinis anglimi kūrenamos elektrinės katilas gali pagaminti $1,36 \cdot 10^8$ g/h (arba 1,36 milijonų kilogramų per valandą) perkaitinto garo, kurio slėgis 16,5 MPa [1,6,22]. Tipinis katilas skirtas ne elektros, o gamybos ar perdirbimo pramonei, gali pagaminti 181,0 kg/h garo, kurio slėgis 6,2 MPa. Kadangi elektros pramonėje daugiau naudojami vandens vamzdžių tipo katilai, tai toliau bus nagrinėjamas tik tokio tipo katilas.

Pagrindiniai vandens vamzdžių tipo katilo komponentai yra krosnis, kur oras ir kuras susimaišo ir sudega (todėl susidaro išmetamosios dujos), ir vandens vamzdžių sistema, kuri yra šildoma vykstant degimo procesui. Vandens vamzdžiai yra sujungti su būgnu, kur skystis ir garai yra atskiriami ir susidaręs garas yra pašalinamas. Jei yra gaminamas perkaitintas garas, tai garas iš būgno keliauja į perkaitintuvą, kuris yra šildomas išmetamosiomis dujomis. Superkritiniuose katiluose, kurie veikia ties kritiniu tašku, kur nėra skirtumo tarp skystos ir dujinės fazės, garo katilas nėra aprūpintas būgnu (būgnas tokiose sistemose nereikalingas) [1,9,22].

2. Garo katilo dinamika

Katilo reakcija į apkrovos pasikeitimus paprastai yra ribota tiek įrangos konstrukcijos, tiek neigiamo laiko požiūriu. Paprastai maksimalus apkrovos pokytis, kurį galima suvaldyti, yra nuo 20 % iki 100 % per minutę. Šis apribojimas yra susijęs su didžiausiomis degiklių liepsnos pasikeitimo normomis ir „susitraukimo / bangavimo“ poveikiu vandens lygiui. Tipiško katilo svyravimo periodas yra nuo 2 iki 5 min [1,6].

Katilo transportavimo vėlavimas atsiranda iš dalies dėl kuro kiekio pokyčio. Pavyzdžiui, jei pakeičiamas oro ir kuro santykis, kuro kiekis esantis krosnyje turi pasikeisti anksčiau nei tai atspindės išmetamosiose dujose. Kuo mažesnis oro srautas, tuo žemesnė apkrova ir tuo daugiau laiko reikės sunaudoti kurą esantį katile norint sumažinti jo tūrį. Todėl neveiklos periodas padidėja, kai apkrova sumažėja katile [1,9].

Transportavimo vėlavimas yra tik vienas neveiklumo periodo komponentų. Deguonies analizatorius taip pat prisideda prie visiško delsimo dėl jo buvimo vietos ir jo lakiųjų pelenų filtro. Be to, dėl neveiklumo periodo instrumentų įtakos, taip yra sukuriamas valdymo neveiklumo periodas, kurio priežastis - kuro/oro skerspjūvio ribojimas [1,6].

Kitas būdas sumažinti neveiklumo periodą ir taip padidinti būgno reakciją yra naudoti patariamojo ryšio (angl. *feedforward*) grandines. Kuro degimo greičio užduoties signalas gali būti jautresnis nuspėjant garo srautą, kuris reaguoja į apkrovos pokyčius greičiau nei garų slėgis [1,2].

3. Garo katilo vandens lygio būgne palaikymas

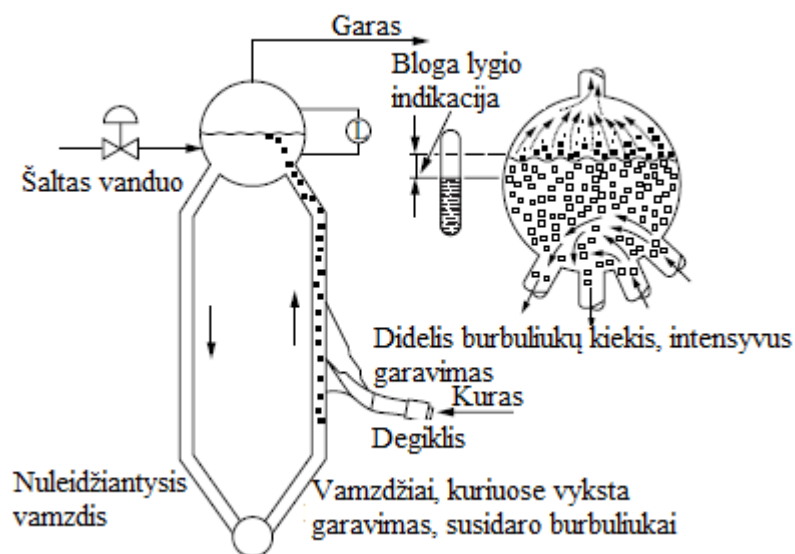
Pagrindinė garo katilo užduotis yra efektyviai ir saugiai gaminti reikiamą kiekį aukštos kokybės garą. Garas yra gaminamas iš vandens, kuris yra šildomas su degančio kuro (gali būti anglis, bio-kuras, dujos) šiluma. Vanduo, kuris tiekiamas į garo katilo būgną, yra filtruojamas, dejonizuojamas, apdorojamas ir deaeruojamas. Dažniausiai jis pašildomas vieno ar kelių paduodamo vandens pašildytuvų. Tiekiamo vandens srautui užtikrinti dažniausiai naudojama elektrinė pavara su vožtuvu arba kontroliuojamas siurblių sukimosi greitis [11]. Efektyviai ir saugiai garo gamybai reikia užtikrinti pastovų garo katilo būgno vandens lygį tokį, kokį nurodo katilo gamintojas.

Palaikyti vandens lygį garo katilo būgne yra nelengvas uždavinys. Garo katilo apkrovai padidėjus, norint išlaikyti pastovų garo slėgį katile, su degančio kuro šilumos kiekis taip pat padidėja. Lygis taip pat padidėja, nes burbuliukai, esantys būgno apačioje, kyla į viršų. Todėl minėti burbuliukai didina vandens lygį ir lygio palaikymo sistema nebesugeba tam tikru laiko momentu išlaikyti vandens lygio norimoje padėtyje. Vandens lygiui būgne įtaką daro ir maitinimo vanduo, kuris visada yra šaltesnis, nei vanduo esantis būgne, o kaisdamas vanduo plečiasi. Remiantis šiais dėsniais, jeigu apkrova yra didinama, tai įtekančio šalto vandens srautas taip pat turi būti didinamas. Vandens kaitinimo procesas pateiktas 1 paveiksle, ir ryšys tarp garo srauto (apkrovos), maitinančio vandens (manipuliuojamo kintamojo) ir lygio (kontroliuojamo kintamojo) teisingai suderintoje sistemoje, pateikiamas 2 paveiksle.

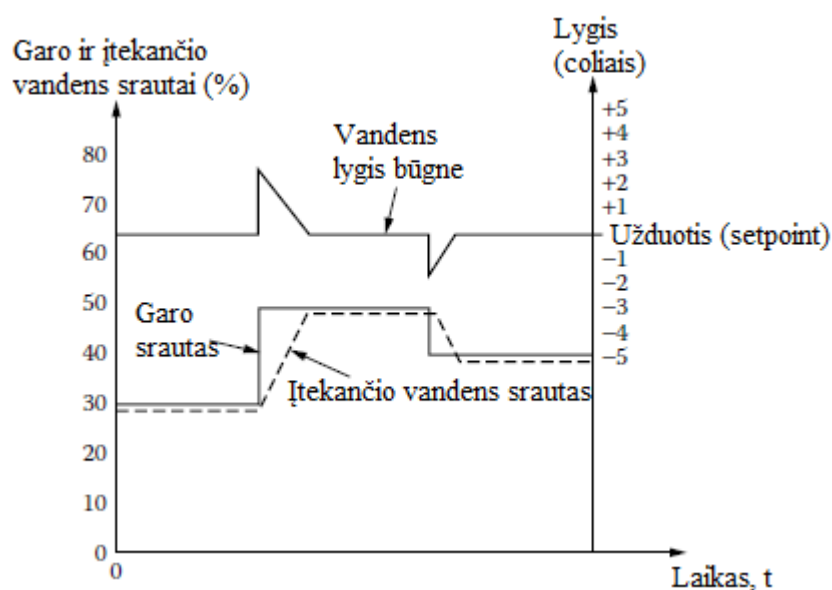
Labai svarbu, kad būgne vandens lygis nebūtų labai žemas ir nebūtų labai aukštas. Per žemas lygis gali būti būgne esančių vamzdžių perkaitimo priežastimi, o tai nėra gerai garo katilui, nes vamzdžiai, kurie nėra apsemti vandens ir nėra atvėsunami dėl greitai padidėjusios temperatūros, praranda metalo stiprumą, taip pat gali atsirasti ir įtrūkimų/įplėsimų. Ant įkaitintų vamzdžių užpylus šaltą vandenį gali įvykti netgi sproginimas, todėl dažniausiai žemas vandens lygis turi apsaugas, kurios apsaugo nuo tokių nemalonių įvykių. Aukštas vandens lygis taip pat nėra gerai. Vandens padidėjimas galimas tada, kai garo vartojimas padidėja, tuomet slėgis sumažėja. Turint aukštą vandens lygį atsiranda pavojus garo turbinai ir kitiems garą naudojančioms įrenginiams, kur vanduo nepageidaujamas, nes su garu gali būti įtraukiamas ir vanduo. Taip pat, kai vandens lygis katile yra per didelis, lieka nedaug vietos garui susidaryti, o tai įtakoja garo kokybę. Bloga garo kokybė neigiamai veikia turbinos sparnuotes, perkaitintuvo vamzdžius [7, 24]. Kaip ir žemas vandens lygis, jis turi apsaugas, kurios padeda užkirsti kelią aukštam vandens lygiui.

Būgne esančio vandens lygio tikslai:

1. nustatyti žemą lygį ir imtis atitinkamų veiksmų;
2. nustatyti aukštą vandens lygį ir sumažinti lygį katile (pvz.: nutraukiant vandens tiekimą į katilą);
3. išlaikyti pastovų lygį būgne.



1 pav. Vandens garavimo, garo susidarymo procesas [1]



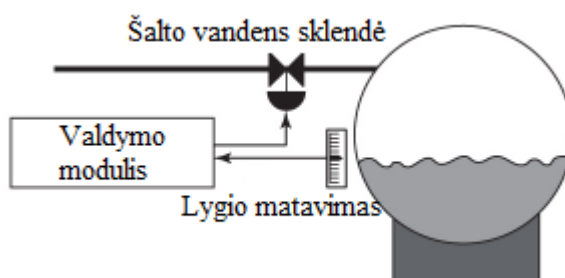
2 pav. Teisingai suderintos sistemos kintamųjų tarpusavio ryšio grafikas [1]

Kaip jau buvo minėta anksčiau, būgno reakcijai pagerinti gali būti naudojamos nuspėjamojo ryšio (angl. *feedforward*) grandinės. Taip pat būgno lygio valdyme, priklausomai nuo apkrovos kitimo ir pačio katilo dydžio, sistemos turi vieną, du ar tris matavimo elementus. Šių sistemų ypatybės, privalumai ir trūkumai bus aptariami tolimesniuose skyriuose.

3.1. Vandens lygio palaikymas naudojant vieną matavimo elementą

Tai paprasčiausias, bet nelabai veiksmingas būgno lygio valdymo būdas (dar kitaip vadinamas „ON/OFF“ valdymu). Lygio valdymas yra vykdomas remiantis paklaida tarp išmatuotos lygio vertės ir užduotos vertės. Tuomet valdymo signalas yra paduodamas į sklendę, kuri valdo įtekancio vandens

srautą ir priklausomai nuo paklaidos, srautą didina arba mažina (sklendė atsidaro arba užsidaro). Paveikslėlis iliustruojantis vieno elemento valdymą pateiktas 3 paveiksle.



3 pav. Lygio valdymas naudojant vieną elementą [2]

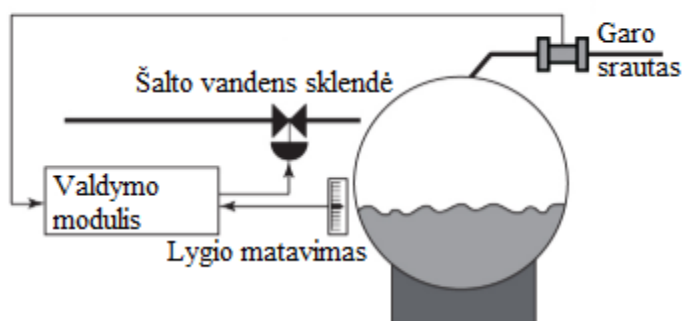
Ypatumai:

1. reikalingas tik vienas analoginis įėjimas (lygio vertė) ir vienas analoginis išėjimas (valdymo signalas);
2. naudojamas tuomet, kai apkrova yra pastovi arba mažai kinta;
3. galimas netikslus lygio valdymas dėl bangavimo efekto greitai keičiantis apkrovai [2, 12].

3.2. Vandens lygio palaikymas naudojant du matavimo elementus

Šis valdymo būdas dažniausiai naudojamas su bet kokio dydžio katilais, kurie turi vidutinį apkrovos kitimą ir dažniausiai ten, kur tiekiamo vandens slėgis yra pastovus. Šioje sistemoje vienas elementas matuoja garo srautą, o kitas vandens lygį būgne.

Vandens lygis, kaip ir vieno elemento valdyme, yra lyginamas su užduota verte. Gauta paklaida yra siunčiama į valdiklį. Garo srautas taip yra matuojamas. Jo padidėjimas ar sumažėjimas tiesiogiai įtakoja vandens lygį todėl valdiklis apdorojęs garo srauto ir lygio signalus siunčia valdomąjį signalą vandens padavimo sklendei (atidarinėja arba uždarinėja). Tokia vandens lygio palaikymo sistema, reaguoja ne tik į lygio pokyčius, bet ir srauto. Garo srautui didėjant, didėja ir įtekančio (šalto) vandens srautas ir atvirkščiai, mažėjant garo poreikiui mažėja ir šalto vandens srautas. 4 paveiksle pateikiamas paveikslėlis iliustruojantis dviejų elementų lygio valdymą.



4 pav. Lygio valdymas naudojant du elementus [2]

Ypatumai:

1. griežtesnė būgno lygio kontrolė nei tik su vienu elementu;

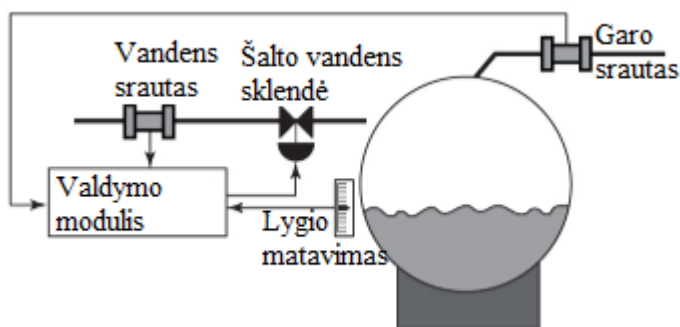
2. garo srautas veikia kaip nuspėjamo valdymo signalas (angl. *feedforward*), leidžiantis greičiau keisti lygį;
3. negali kontroliuoti šalto (įtekančio) vandens sistemos darbo sutrikimo [1,2].

3.3. Vandens lygio palaikymas naudojant tris matavimo elementus

Trijų elementų būgno lygio reguliatorius idealiai tinka tais atvejais, kai elektrinę sudaro keletas katilų ir keletas maitinačio vandens siurblių arba kai maitinantis vanduo turi slėgio ar srauto pasikeitimus. Trijų elementų valdymas susideda iš šių elementų:

1. lygio ir garo srauto: kompensuojami tokie trikdžiai sistemoje, kaip būgno nuleidimai, katilo ar perkaitinto garo nutekėjimai;
2. įtekančio srauto: greitai reaguoja į tiekiamo vandens paklausos svyravimus, arba iš garo srauto numanomo valdymo signalo, arba įtekančio vandens srauto arba slėgio svyravimų signalo [1,2].

Norint pasiekti optimalią kontrolę, tiek garo tiek šalto (įtekančio) vandens srautų vertės turi būti pataisytos pagal tankį. Paveikslėlis iliustruojantis trijų elementų valdymą pateiktas 5 paveiksle.



5 pav. Lygio valdymas naudojant tris elementus [2]

Ypatumai:

1. trijų elementų sistema užtikrina griežtesnę būgno lygio kontrolę su svyruojančia garo apkrova. Idealiai tinka, kai sistema kenčia nuo svyruojančio įtekančio vandens slėgio ar srauto;
2. reikalingas sudėtingesnis kontrolės lygis;
3. reikalingas papildomas matavimas (vandens srauto).

4. Garo katilo darbo režimų analizė

Praktikoje egzistuoja du elektrinės darbo režimai: normalus (kitaip dar vadinamas tinklo režimu) ir kintamas (kitaip vadinamas salos režimu).

4.1. Normalus (tinklo) režimas

Šis režimas taip pat žinomas kaip turbinos režimas (arba katilo atsilikimo režimas). Paprastai tai yra pageidaujamas veikimo būdas, nes jis yra skirtas elektros tinklų poreikiams tenkinti (priklauso nuo elektros poreikio). Trumpai tariant, apkrovos poreikis pirmiausia yra valdomas turbinos generatoriuje, kai katilas tiekia garą, nepriklausomai nuo turbinos reikalavimo [1, 4, 10].

Jei pasirinktas šis režimas, operatorius nurodo generatoriaus elektros išvestį kaip nustatytą reikšmę: operatorius nustato tikslinį elektros galingumą (MW arba procentais visos galios) ir tikslinę galios pasikeitimo spartą (% / s) [10].

Valdymo programa vadinama elektrinės energijos reguliatoriumi (EER):

1. EER nuolat palygina faktinę generatoriaus galią iki nustatytosios vertės;
2. jei yra paklaida, tai valdymo signalas siunčiamas reguliavimo vožtuvams, tam, kad ji būtų pašalinta;
3. turbinos vožtuvų atidarymas/uždarymas įtakoja garo tiekimą į turbiną (padidėja ar sumažėja), o tai didina (jeigu srautas sumažėja) arba mažina (jeigu srautas padidėja) slėgį būgne;
4. kadangi sistema yra skirta išlaikyti garo generatoriaus slėgį esant pastoviai apkrovai, tai atsiradus slėgio pokyčiui (padidėjus ar sumažėjus) sistema norės atkurti slėgį iki nustatytos vertės todėl atitinkamai keisis šilumos kiekis, įtekantis srautas.

4.2. Kintamas (salos) režimas

Jis dar žinomas kaip katilo režimas (arba turbinos atsilikimo režimas). Paprastai tai nėra pageidaujamas veikimo būdas, tačiau naudojamas tam tikromis aplinkybėmis. Trumpai tariant apkrovos poreikis valdomas pagal katilo degimo greitį, o turbina reaguoja į katilą (droselio slėgio valdymas su turbinos vožtuvais) [1, 4, 10].

Jei pasirenkamas šis režimas, operatorius nurodo galią kaip nustatytąją vertę: operatorius nustato tikslinės elektrinės galingumą (tarkime, procentais visos galios) ir tikslią galios pokyčio spartą (pvz.: % / s) [10].

Ypatumai:

1. valdymo sistema nuolatos tikrina faktinę galią su nustatyta verte;
2. jei yra paklaida, tai tada yra didinamas arba mažinamas šilumos kiekis (paduodama daugiau arba sumažinama kuro degimo kameroje) todėl keičiasi garo slėgis garo katile (didėja arba mažėja);
3. tikslas yra garo katile palaikyti pastovų slėgį, tai sistema stengsis grįžti prie nustatytos vertės;
4. tai įtakoja garo, tiekiamo į turbiną, pokyčius;
5. tai įtakoja elektros energijos pokyčius (padidėja arba sumažėja);
6. tokio režimo metu, pirmiausia pokyčiai juntami būgne, garo katile, o tik tada turbinoje.

Egzistuoja dar katilo ir turbinos suderintas valdymo režimas bei kintamo slėgio ir laisvo slėgio valdymo režimai:

1. katilo ir turbinos suderintas valdymo režimas: turbinos vožtuvai ir katilo degimo greitis yra suderinami, atsižvelgiant į apkrovos paklausą, tuo tarpu išlaikomas antraeilis slėgis;
2. kintamo slėgio ir laisvo slėgio valdymo režimai: valdymo strategijos, kurios pagal konstrukciją, leidžia slėgio svyravimus su apkrova, siekiant pagerinti efektyvumą, greičio atsaką į apkrovos pokyčius ir turbinos patikimumą [10].

5. Matematinis garo katilo būgno darbo režimo modeliavimas

Egzistuoja nemažai katilų sistemų ir valdymo perspektyvų modelių, kurie buvo paskelbti garsių mokslininkų. Vienas iš seniausių modelių yra išleistas Astrom ir Eklund. Kitas pagrįsto tikslumo modelis yra paprastas netiesinis modelis paskelbtas Astrom ir Bell. Modelis yra sukurtas pagal pirmąjį principą ir sukonfigūruotas su pagrindiniais katilo projektavimo duomenimis. Šis modelis naudoja trijų būsenų struktūrą su slėgiu, vandens kiekiu būgne ir vidutine garo kokybe stove. Vėliau tai buvo išplėsta į išsamesnį Astrom ir Bell penkių būsenų modelį [9], kuriuo remtasi šiame tiriamajame darbe. Adam ir Marchetti pasiūlė sukurti natūralų recirkuliacijos katilo būgno modelį su garų savybių derinimu prie dujų lygčių. Be to, burbulų greitis naudojamas, norint įvertinti garų masės srautą iš dviejų fazių srauto režimo į garų fazės režimą. Kim ir Choi pristatė katilo modelį, papildantį Astrom ir Bell modelį [9] su greičio koreliacijos metodu, panašiu į anglimi kūrenamo katilo modelį, kurį pateikė Sreepadha ir kt.[8].

Šiame tiriamajame darbe buvo išbandyti du modeliai. Supaprastintas garo katilo modelis, kuriame neatsižvelgiama į vandens cirkuliacijos dinamiką pakylančiais ir nusileidžiančiais vamzdžiais (angl. *risers and downcomers*), garo kokybę pakylančių vamzdžių išėjime bei garo turį po vandeniu (vandens burbuliukų tūrį vandenyje), o išplėstiniame garo katilo modelyje minėtoji vandens dinamika, garo kokybė bei burbuliukų tūris yra įvertinami.

5.1. Supaprastintas garo katilo modelis

Minėtas Astrom ir Bell modelis yra apibūdinamas taikant energetines ir masių balanso lygtis. Prieš sudarant modelį svarbu apibrėžti sistemos pagrindinius kintamuosius. Nagrinėjamos sistemos įėjimo kintamieji yra: šilumos kiekis suteikiamas katilui (Q), įtekančio šalto vandens srautas (q_f) bei išeinančio garo srautas (q_s), o išėjimo kintamieji- slėgis (p) bei katile esančio vandens tūris (V). Toliau naudotos lygtys (5.1.1) - (5.1.10) yra iš [9] šaltinio.

Bendra masių balanso lygtis:

$$\frac{d}{dt} [\rho_s V_{st} + \rho_w V_{wt}] = q_f - q_s; \quad (5.1.1)$$

čia ρ_s - garo tankis [kg/m^3]; V_{st} - bendras garo tūris [m^3]; ρ_w - vandens tankis [kg/m^3]; V_{wt} - bendras vandens tūris [m^3]; q_f - įtekančio vandens srautas [kg/s]; q_s - ištekančio garo srautas [kg/s].

Energijos lygtis garo katilui:

$$\frac{d}{dt} [\rho_s V_{st} u_s + \rho_w V_{wt} u_w + m_t C_p t_m] = Q + q_f h_f - q_s h_s; \quad (5.1.2)$$

čia u_s - garo vidinė energija [J]; u_w - vandens vidinė energija [J]; m_t - bendra viso katilo masė [kg]; C_p - specifinė metalo šiluma [$\text{J}/(\text{K} \cdot \text{kg})$]; t_m - metalo temperatūra [$^{\circ}\text{C}$]; h_f - įtekančio vandens entalpija [J]; h_s - išeinančio garo entalpija [J]; Q - šilumos kiekis [J].

Kadangi, vidinė energija gali būti užrašoma $u = h - \frac{p}{\rho}$, tai energijos lygtis (2) gali būti perrašyta:

$$\frac{d}{dt} [\rho_s h_s V_{st} + \rho_w h_w V_{wt} - p V_t + m_t C_p t_m] = Q + q_f h_f - q_s h_s; \quad (5.1.3)$$

čia p - bendras katilo slėgis [Pa]; V_t - bendras tūris [m^3].

Bendras katilo tūris gali būti išreikštas:

$$V_d = V_{wt} + V_{st}. \quad (5.1.4)$$

Paprastas garo katilo modelis yra sudaromas sujungiant (5.1.1), (5.1.3) ir (5.1.4) lygtis su sočiųjų garų lentelėmis.

$$e_{11} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{12} \frac{dp}{dt} = q_f - q_s; \quad (5.1.5)$$

$$e_{21} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{22} \frac{dp}{dt} = Q + q_f h_f - q_s h_s; \quad (5.1.6)$$

čia

$$e_{11} = \rho_w - \rho_s; \quad (5.1.7)$$

$$e_{12} = V_{st} \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + V_{wt} \frac{\partial \rho_w}{\partial p}; \quad (5.1.8)$$

$$e_{21} = \rho_w h_w - \rho_s h_s; \quad (5.1.9)$$

$$e_{22} = V_{st} \left(h_s \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + \rho_s \frac{\partial h_s}{\partial p} \right) + V_{wt} \left(h_w \frac{\partial \rho_w}{\partial p} + \rho_w \frac{\partial h_w}{\partial p} \right) - V_d + m_t C_p \frac{\partial t_s}{\partial p}. \quad (5.1.10)$$

Šis modelis pakankamai tiksliai apibūdina slėgio bei tūrio pasikeitimus pakitus šilumos kiekiui, įtekėjimo ar ištekėjimo srautams. Tačiau modelis turi vieną rimtą trūkumą. Nors jis apibūdina bendrą vandens kiekį sistemoje, tačiau jis neatspindi būgno lygio elgesio, nes joje neaprašomas garo ir vandens pasiskirstymas sistemoje.

Šis modelis buvo sumodeliuotas ir išbandytas *Matlab Simulink* aplinkoje. Kadangi modeliuojamos sistemos išėjimai yra slėgis bei tūris, tai iš (5.1.5) bei (5.1.6) lygčių reikia išsireikšti slėgį (p) bei bendrą vandens tūrį (V_{wt}). Slėgio bei tūrio išraiškos atrodo šitaip:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{(q_f - q_s) - e_{11} \frac{dV_{wt}}{dt}}{e_{12}}; \quad (5.1.11)$$

$$\frac{dV_{wt}}{dt} = \frac{Q + q_f h_f - q_s h_s - e_{22} \frac{dp}{dt}}{e_{21}}. \quad (5.1.12)$$

5.2. Išplėstinis garo katilo modelis

Sudarant išplėstinį modelį, kuris atspindėtų tikrą garo katilą, reikia atsižvelgti į garo ir vandens pasiskirstymą katile. Vandens virimas katile sukelia bangavimo efektą todėl tai apsunkina lygio matavimą. Dar svarbu pabrėžti, kad vandens lygis katile padidės, kai atidarysime garo sklendę, nes tuo metu slėgis nukris ir garo burbuliukai, kurie yra vandenyje kils į viršų.

Labai svarbus modeliavimo elementas yra masės ir energijos perdavimas tarp garo ir vandens kondensacijos ir garinimo būdu. Lygtys (5.2.1) - (5.2.8), (5.2.18)-(5.2.31) yra iš [9] šaltinio.

Paklylančių (angl. *risers*) vamzdžių masės balanso lygtis atrodo taip:

$$\frac{d}{dt} [\rho_s \bar{\alpha}_v V_r + \rho_w (1 - \bar{\alpha}_v) V_r] = q_{dc} - q_r; \quad (5.2.1)$$

čia ρ_s - garo tankis [kg/m³]; V_r - pakylančių vamzdžių tūris [m³]; q_{dc} - bendras pakylančių vamzdžių įėjimo srautas [kg/s]; $\bar{\alpha}_v$ - kokybės faktorius; ρ_w - vandens tankis [kg/m³]; q_r - bendras pakylančių vamzdžių išėjimo srautas [kg/s].

Energijos lygtis pakylantiems vamzdžiams:

$$\frac{d}{dt} [\rho_s h_s \bar{\alpha}_v V_r + \rho_w h_w (1 - \bar{\alpha}_v) V_r - p V_r + m_r C_p t_s] = Q + q_{dc} h_w - (\alpha_r h_c + h_w) q_r; \quad (5.2.2)$$

čia α_r - garo kokybė pakylančio vamzdžio išėjime.

Cirkuliacija pakylančiuose vamzdžiuose gali būti natūrali ir priverstinė. Priverstinės cirkuliacijos atveju q_{dc} yra valdymo kintamasis. Natūralios cirkuliacijos atveju (kurį mes ir naudosime) bendras pakylančių vamzdžių įėjimo srautas priklauso nuo tankių gradientų pakylančiuose ir nusileidžiančiuose vamzdžiuose. Tiriamajame darbe buvo priimtas pastovios būsenos santykį:

$$\frac{1}{2} k q_{dc}^2 = \rho_w A_{dc} (\rho_w - \rho_s) g \bar{\alpha}_v V_r. \quad (5.2.3)$$

Kaip jau minėta anksčiau, garo katilo modeliavime taip pat labai svarbus burbuliukų tūris vandenyje (arba garo tūris vandenyje). Jo masės balanso lygtis:

$$\frac{d}{dt} [\rho_s V_{sd}] = \alpha_r q_r - q_{sd} - q_{cd}; \quad (5.2.4)$$

čia V_{sd} - garo tūris po vandenyje [m³]; q_{sd} - garo srautas per vandens paviršių būgne [kg/s]; q_{cd} - kondensacijos srautas [kg/s].

Kondensacijos srautas katile gali būti išreikštas:

$$q_{cd} = \frac{h_w - h_f}{h_c} q_f + \frac{1}{h_c} \left(\rho_s - V_{sd} \frac{dh_s}{dt} + \rho_w V_{wd} \frac{dh_w}{dt} - (V_{sd} + V_{wd}) \frac{dp}{dt} + m_d C_p \frac{dt_s}{dt} \right). \quad (5.2.5)$$

Srautas q_{sd} priklauso nuo vandens ir garo tankio skirtumų bei į būgną patenkančio srauto. Jis gali būti išreikštas:

$$q_{sd} = \frac{\rho_s}{T_d} (V_{sd} - V_{sd}^0) + \alpha_r q_{dc} + \alpha_r \beta (q_{dc} - q_r); \quad (5.2.6)$$

čia V_{sd}^0 - pradinis garo kiekis po vandeniu, kai nėra garo kondensacijos katile [m³]; T_d - garo gyvavimo laikas katile [s].

Žinodami ir įvertindami garo tūrį vandenyje, galime nesudėtingai surasti vandens tūrį katile:

$$V_{wd} = V_{wt} - V_{dc} - (1 - \bar{\alpha}_v) V_r. \quad (5.2.7)$$

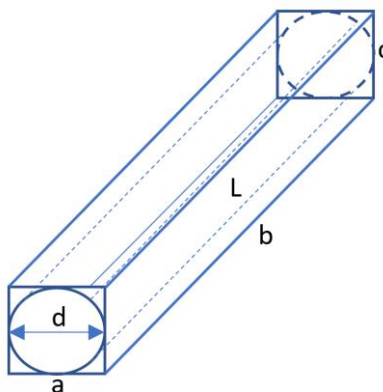
Garo katilas turi sudėtingą geometriją. Tokia sudėtinga geometrija apsunkina lygio skaičiavimą. Paprasčiausias būdas apskaičiuoti vandens lygį yra toks:

$$l = \frac{V_{wd} + V_{sd}}{A_d} * 1000; \quad (5.2.8)$$

čia V_{wd} - vandens tūris būgne [m³]; V_{sd} - garo tūris būgne [m³]; A_d - paviršiaus plotas [m²]; l - vandens lygis katile [mm].

Toks lygio skaičiavimas pateikiamas [9] šaltinyje, tačiau siekiant didesnio tikslumo minėtas skaičiavimas netinka. Remiantis matematinėmis žiniomis, nesudėtingai buvo apskaičiuotas būgno lygis.

Kadangi būgnas yra cilindro formos, apie jį galime apibrėžti stačiakampį gretasienį (pav.6). Tokio stačiakampio kraštinės tuomet yra lygios $a=d$, $b=L$, $c=d$, čia a - stačiakampio plotis, b -ilgis, c -aukštis, d - cilindro skersmuo, L - cilindro ilgis.



6 pav. Apie cilindrą apibrėžtas stačiakampis

Stačiakampio tūris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$V_{stač} = a \cdot b \cdot c; \quad (5.2.9)$$

arba

$$V_{stač} = S_{pav} \cdot h = (a \cdot b) \cdot c = (a \cdot c) \cdot b; \quad (5.2.10)$$

čia S_{pav} – paviršiaus plotas

Kaip matome iš 6 paveikslo, stačiakampio gretasienio kraštinė a yra lygi apskritimo skersmeniui d , o d taip pat yra lygi kraštinei c todėl $a = c$. Taip pat matome, kad stačiakampio gretasienio paviršiaus plotas yra didesnis už apskritimo plotą ($a^2 > \pi \frac{d^2}{4}$), o figūros tūris yra tiesiogiai proporcingas paviršiaus plotui todėl galime teigti, kad stačiakampio tūris didesnis už cilindro tūrį.

Tarkime, kad mūsų cilindras yra vertikalus (6 paveiksle cilindras horizontalus) ir apie jį apibrėžtas tas pats stačiakampis gretasienis. Kadangi mums reikalingas lygis, o lygis yra ne kas kita kaip aukštinė, tai jis gali būti apskaičiuotas iš tūrio formulės išsireiškiant aukštinei:

$$h_{cilindro} = \frac{V_{cilindro}}{S_{pav.cilindro}}. \quad (5.2.11)$$

Analogiškai tai padarome stačiakampiui gretasieniui:

$$h_{stač} = \frac{V_{stač}}{S_{pav.stač}}. \quad (5.2.12)$$

Šiuo atveju aktualu kiek kartų aukštinė cilindre turi būti didesnė arba mažesnė negu stačiakampyje gretasienyje, kai tūriai vienodi ($V_{stač} = V_{cilindro} = V$). Tuomet galima parašyti tokią proporciją:

$$\frac{h_{cilindro}}{h_{stač}} = \frac{\frac{V_{cilindro}}{S_{pav.cilindro}}}{\frac{V_{stač}}{S_{pav.stač}}} = \frac{\frac{V}{S_{pav.cilindro}}}{\frac{V}{S_{pav.stač}}} = \frac{S_{pav.stač}}{S_{pav.cilindro}}. \quad (5.2.13)$$

Kadangi $S_{pav.stač} > S_{pav.cilindro}$, tai $h_{cilindro} > h_{stač}$. Tai reiškia, kad esant tokiam pačiam tūriui, cilindro aukštinė bus didesnė negu stačiakampio aukštinė, kitaip tariant, jeigu turėsime tokį patį kiekį vandens cilindre ir stačiakampyje gretasienyje, tai lygis cilindre bus didesnis už lygį stačiakampyje gretasienyje ir visai nesvarbu kaip kūnas padėtas, t.y. ar jis horizontalus ar vertikalus. Remiantis tokia išvada ir žinant, kad tūris yra tiesiogiai proporcingas paviršiaus plotui, galima užrašyti tokią proporciją:

$$\frac{V_{stač}}{V_{cilindro}} = \frac{h_{cilindro}}{h_{stač}}. \quad (5.2.14)$$

Remiantis (5.2.14) proporcija galime išsireikšti cilindro aukštį:

$$h_{cilindro} = \frac{V_{stač} \cdot h_{stač}}{V_{cilindro}}. \quad (5.2.15)$$

Kaip matyti (5.2.15) išraiškoje, nereikalingas paviršiaus plotas, todėl tokia išraiška tolimesniuose skaičiavimuose tinka, nes surasti vandens paviršiaus plotą yra gan sudėtingas uždavinys (paviršiaus plotas kinta keičiantis vandens tūriui) todėl, kad cilindras (būgnas) yra horizontalus, o ne vertikalus.

Būgno tūris yra pastovus dydis, stačiakampio tūris nesudėtingai gali būti apskaičiuojamas taip kaip stačiakampio lygis. Kadangi šis lygio skaičiavimas bus naudojamas tolimesniuose tyrimuose, jis yra perrašomas laikantis bendros modelio filosofijos:

$$L_d = \frac{A_d \cdot L_{da} \cdot (V_{wd} + V_{sd})}{V_d \cdot A_d}, \quad (5.2.16)$$

čia L_d - būgno lygis [m]; L_{da} - būgno skersmuo [m].

Dažniausiai lygis yra matuojamas procentais arba milimetrais. Tyrime nuspręsta lygį išsireikšti procentais. Tuomet lygio formulė atrodo taip:

$$L_d = \frac{\left(\frac{A_d \cdot L_{da} \cdot (V_{wd} + V_{sd})}{V_d \cdot A_d} \right)}{L_{da}} \cdot 100\%. \quad (5.2.17)$$

Sudėtingesnis garo modelis yra sudaromas sujungiant (5.1.1), (5.1.3), (5.2.1), (5.2.2) ir (5.2.4) lygtis. Taip pat yra nemažai algebrinių lygčių, tokių kaip (5.2.3), (5.2.6) ir (5.2.17). Apjungę šias lygtis gauname pagrindinį išplėstinį modelį:

$$e_{11} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{12} \frac{dp}{dt} = q_f - q_s; \quad (5.2.18)$$

$$e_{21} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{22} \frac{dp}{dt} = Q + q_f h_f - q_s h_s; \quad (5.2.19)$$

$$e_{32} \frac{dp}{dt} + e_{33} \frac{d\alpha_r}{dt} = Q - \alpha_r h_c q_{dc}; \quad (5.2.20)$$

$$e_{42} \frac{dp}{dt} + e_{43} \frac{d\alpha_r}{dt} + e_{44} \frac{dV_{sd}}{dt} = \frac{\rho_s}{T_d} (V_{sd}^0 - V_{sd}) + \frac{h_f - h_w}{h_c} q_f; \quad (5.2.21)$$

čia e_{11} , e_{12} , e_{21} , e_{22} reikšmės tokios pat kaip paprastajame modelyje (žr.lygtis (5.1.7), (5.1.8), (5.1.9), (5.1.10));

$$h_c = h_s - h_w; \quad (5.2.22)$$

$$e_{32} = \left(\rho_w \frac{\partial h_w}{\partial p} - \alpha_r h_c \frac{\partial \rho_w}{\partial p} \right) (1 - \bar{\alpha}_v) V_r + \left((1 - \bar{\alpha}_v) h_c \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + \rho_s \frac{\partial h_s}{\partial p} \right) \bar{\alpha}_v V_r + (\rho_s + (\rho_w - \rho_s) \alpha_r) h_c V_r \frac{\partial \alpha_r}{\partial p} - V_r + m_r C_p \frac{\partial t_s}{\partial p}; \quad (5.2.23)$$

$$e_{33} = ((1 - \alpha_r) \rho_s + \alpha_r \rho_w) h_c V_r \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial \alpha_r}; \quad (5.2.24)$$

$$e_{42} = V_{sd} \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + \frac{1}{h_c} \left(\rho_s V_{sd} \frac{\partial h_s}{\partial p} - \rho_w V_{wd} \frac{\partial h_w}{\partial p} - V_{sd} - V_{wd} + m_d C_p \frac{\partial t_s}{\partial p} \right) + \alpha_r (1 + \beta) V_r \left(\bar{\alpha}_v \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + (1 - \bar{\alpha}_v) \frac{\partial \rho_w}{\partial p} + (\rho_s - \rho_w) \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial p} \right); \quad (5.2.25)$$

$$e_{43} = \alpha_r (1 + \beta) (\rho_s - \rho_w) V_r \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial \alpha_r}; \quad (5.2.26)$$

$$e_{44} = \rho_s. \quad (5.2.27)$$

Šis modelis buvo sumodeliuotas ir išbandytas naudojant *Matlab* programinį paketą. Kadangi modeliuojamos sistemos išėjimai yra vandens slėgis, tūris, garo kokybė kylančių vamzdžių išėjime bei garo tūris po vandeniu, tai iš (5.2.18) (5.2.19) (5.2.20) bei (5.2.21) lygčių reikia išsireikšti slėgį (p), bendrą vandens tūrį (V_{wt}), garo kokybę (α_r) bei bendrą garo tūrį vandenyje (V_{sd}). Išraiškos atrodo šitaip:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{(q_f - q_s) - e_{11} \frac{dV_{wt}}{dt}}{e_{12}}; \quad (5.2.28)$$

$$\frac{dV_{wt}}{dt} = \frac{Q + q_f h_f - q_s h_s - e_{22} \frac{dp}{dt}}{e_{21}}; \quad (5.2.29)$$

$$\frac{d\alpha_r}{dt} = \frac{Q - \alpha_r h_c q_d - e_{32} \frac{dp}{dt}}{e_{33}}; \quad (5.2.30)$$

$$\frac{dV_{sd}}{dt} = \frac{\frac{\rho_s}{T_d} (V_{sd}^0 - V_{sd}) + \frac{h_f - h_w}{h_c} q_f - e_{42} \frac{dp}{dt} - e_{43} \frac{d\alpha_r}{dt}}{e_{44}}. \quad (5.2.31)$$

6. Garo katilo modelio modeliavimas ir proceso imitatoriaus kūrimas

Garo katilo vandens lygio būgne režimų imitaciniam matematiniam modeliui buvo naudojamas *Matlab* programinis paketas. Šiame tyrime buvo sumodeliuoti du garo katilo modeliai. Pirmas (paprastas) modelis sumodeliuotas *Matlab Simulink* aplinkoje. Antram modeliui realizuoti buvo naudojamas *S-function Matlab* programinio paketo papildinys, o testavimui naudojama *Simulink* aplinka. Tolimesniuose poskyriuose/skyreliuose pateikiamos modeliavimo prielaidos, kintamieji, trikdžiai, reguliatorių parametrų parinkimas bei garo katilo simulatorius.

6.1. Supaprastinto modelio realizavimas

6.1.1. Proceso įėjimo/išėjimo kintamieji, trikdžiai, manipuluojami kintamieji ir jų kitimo ribos

Garo katilo slėgio (p) bei tūrio (V_{wt}) būseną charakterizuoja kintamieji ρ_w , ρ_s , V_{st} , q_f , q_s , e_{12} , e_{21} , e_{22} , Q , h_f , h_s , V_t , $\frac{dV_{wt}}{dt}$, $\frac{dp}{dt}$, $\frac{\partial \rho_w}{\partial p}$, $\frac{\partial \rho_s}{\partial p}$, $\frac{\partial h_s}{\partial p}$, $\frac{\partial h_f}{\partial p}$. Srautai, šilumos kiekis yra matuojami jutikliais, o kiti apskaičiuojami arba randami iš lentelių. Slėgis valdomas šilumos kiekiu (Q), o vandens tūris įtekančiu srautu (q_f).

1 lentelė. Supaprastinto modelio proceso būsenos kintamieji

Kintamasis	Aprašymas	Kitimo ribos
e_{12}	Tarpinis kintamasis apibūdinantis garo katilo dinamiką	-50... -10
e_{22}	Tarpinis kintamasis apibūdinantis garo katilo dinamiką	$1 \cdot 10^8 \dots 2 \cdot 10^8$
$\frac{dV_{wt}}{dt}$	Vandens tūrio išvestinė	-0,2...0,8
$\frac{dp}{dt}$	Slėgio išvestinė	-0,4...0,4

2 lentelė. Supaprastinto modelio proceso įėjimo kintamieji

Kintamasis	Aprašymas	Kitimo ribos
ρ_w	Vandens tankis	0...1000 kg/m ³
ρ_s	Garo tankis	0...3 kg/m ³
V_{st}	Garo tūris katile	0...19,40 m ³
q_f	Įtekančio vandens srautas	0...50 kg/s
q_s	Ištekančio vandens srautas	0...50 kg/s
Q	Šilumos kiekis	0...20 MJ
h_f	Vandens entalpija	0...700 kJ/kg
h_s	Garo entalpija	0...3000 kJ/kg
V_t	Bendras garo katilo tūris	0...19,4 m ³
$\frac{\partial \rho_w}{\partial p}$	Dalinė vandens tankio išvestinė nuo slėgio	-10...0

$\frac{\partial \rho_s}{\partial p}$	Dalinė garo tankio išvestinė nuo slėgio	0...1
$\frac{\partial h_f}{\partial p}$	Dalinė vandens entalpijos išvestinė nuo slėgio	0...40000
$\frac{\partial h_s}{\partial p}$	Dalinė garo entalpijos išvestinė nuo slėgio	0...9000
e_{21}	Katilo dinamiką apibūdinantis dydis	0...600000000 J/m ³

Gali nutikti taip, kad slėgio bei vandens lygio užduotos vertės bus pakeistos, taip pat gali būti, kad padidės arba sumažės garo poreikis todėl pakis garo katile esančio vandens slėgis bei tūris. Šiame modeliavime išorinis trikdys buvo išėjimo srautas q_s .

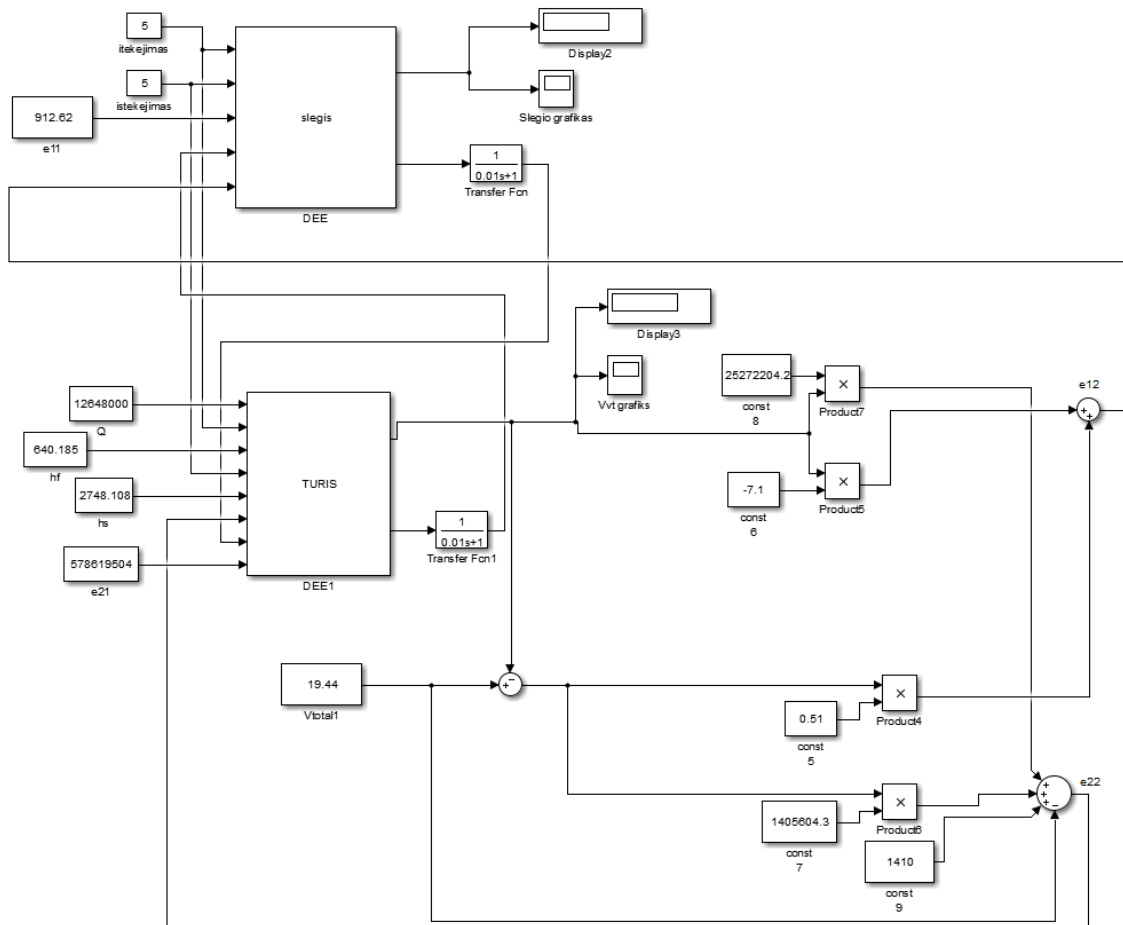
Kadangi šis modelis priklauso nuo vandens ir garo entalpijų, tankių, jų dalinių išvestinių nuo slėgio, kurios turi būti perskaičiuojamos pasikeitus slėgiui, priimta, kad darbo taške šie dydžiai nekinta ir jų dalinės išvestinės yra pastovios. Taip pat priimta, jog šiame modelyje lygis nėra apskaičiuojamas. Tolimesniame tyrime priimtas sprendimas kaip perskaičiuoti entalpijas keičiantis slėgiui ir lygiui (tūriui), bet apie tai plačiau išplėstinio modelio realizavimo poskyryje.

6.1.2. Modeliavimo parametrų parinkimas

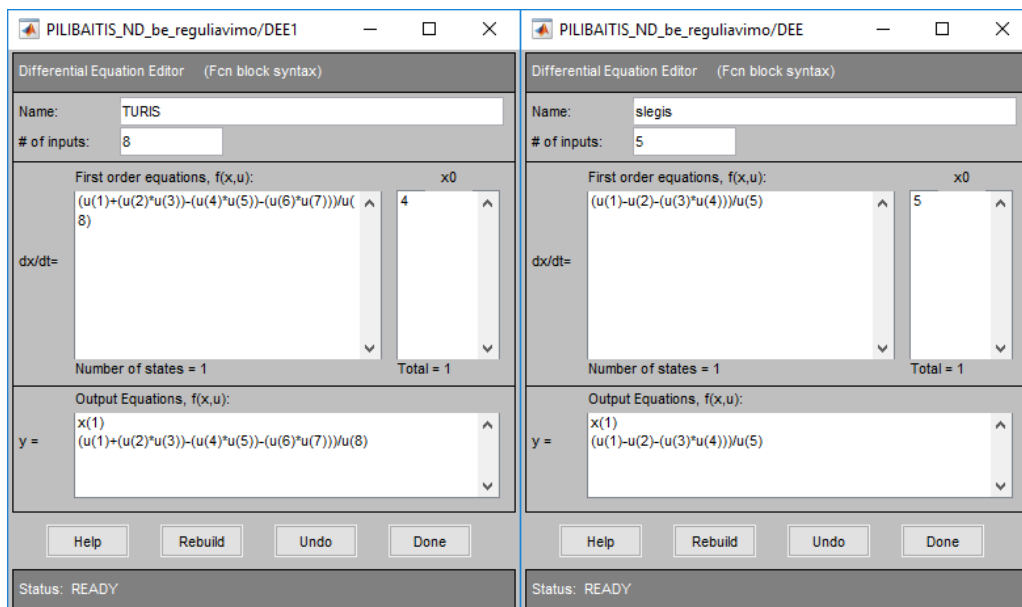
Priimta, jog slėgis garo katile yra 5 bar, o tūris 4 m³. Prie tokio slėgio iš lentelių surandamos vandens ir garo entalpijos: $h_s = 2748,2$ kJ/kg, $h_v = 640,51$ kJ/kg. Taip pat randami ir tankiai: garo $\rho_s = 2,67$ kg/m³, vandens $\rho_w = 915,21$ kg/m³. Bendras katilo tūris $V_t = 19,40$ m³. Remiantis anksčiau pateiktomis išraiškomis buvo apskaičiuotas e_{21} dydis, kuris lygus 578619503,76 J/m³. Reikėtų atkreipti dėmesį, jog e_{12} ir e_{21} skaičiavime reikalingos dalinės išvestinės: garo tankio nuo slėgio, vandens tankio nuo slėgio, vandens entalpijos nuo slėgio ir garo entalpijos nuo slėgio. Šios dalinės išvestinės apskaičiuojamos remiantis reikšmėmis iš lentelių imant reikšmes, kai slėgis 5.01 bar ir 4.99 bar: $\frac{\partial \rho_w}{\partial p} = -7,1$, $\frac{\partial \rho_s}{\partial p} = 0,51$, $\frac{\partial h_w}{\partial p} = 32575,25$, $\frac{\partial h_s}{\partial p} = 8913$. Parinkus šiuos parametrus apskaičiuota, jog šilumos kiekis, kai sistema nusistovi prie pradinių sąlygų, yra 12648000 J ir kai įtekėjimo srautai pastovūs, todėl įtekėjimo ir ištekėjimo srautai lygus 5 kg/s.

6.1.3. Modelio realizavimas

Matlab Simulink aplinkoje sumodeliuotas katile esančio vandens tūris ir slėgis. Anksčiau pateiktos diferencialinės lygtys su pradinėmis sąlygomis aprašytos *DEE* blokuose (8 pav.). Proceso laikas kinta sekundėmis. Proceso būsenos stebėjimui yra naudojami *Scope* bei *Display* elementai, o dėl skaičiavimo sklandumo, tūrio ir slėgio išvestinės turi mažą vėlinimą (tam naudojama inercinė grandis su maža laiko pastoviaja). Sistemos modelis pateikiamas 7 paveiksle.

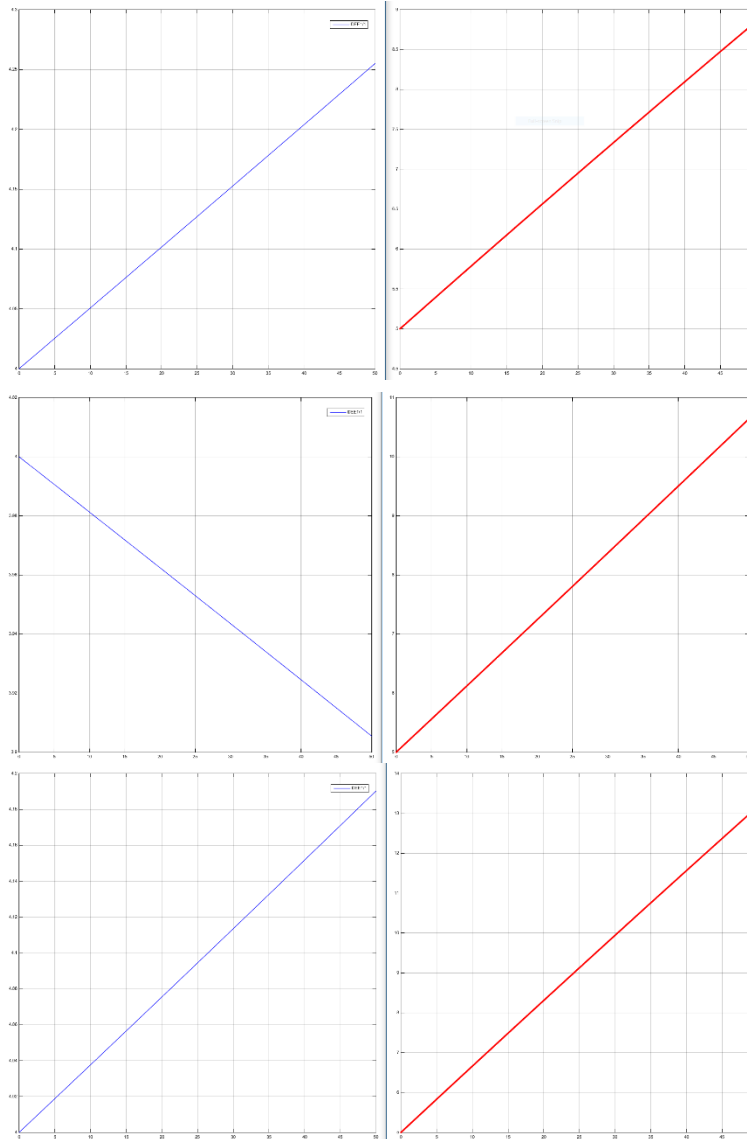


7 pav. Supaprastinto modelio realizavimas *Matlab Simulink* aplinkoje



8 pav. Matematinų lygčių realizacija *DEE* blokuose

Žemiau pateikiami grafikas, kuriame be regulatoriaus buvo keičiamas įtekėjimo (9 paveiksle viršutiniai grafikai), ištekėjimo (9 paveiksle viduriniai grafikai) srautai bei šilumos kiekis (9 paveiksle apatiniai grafikai).

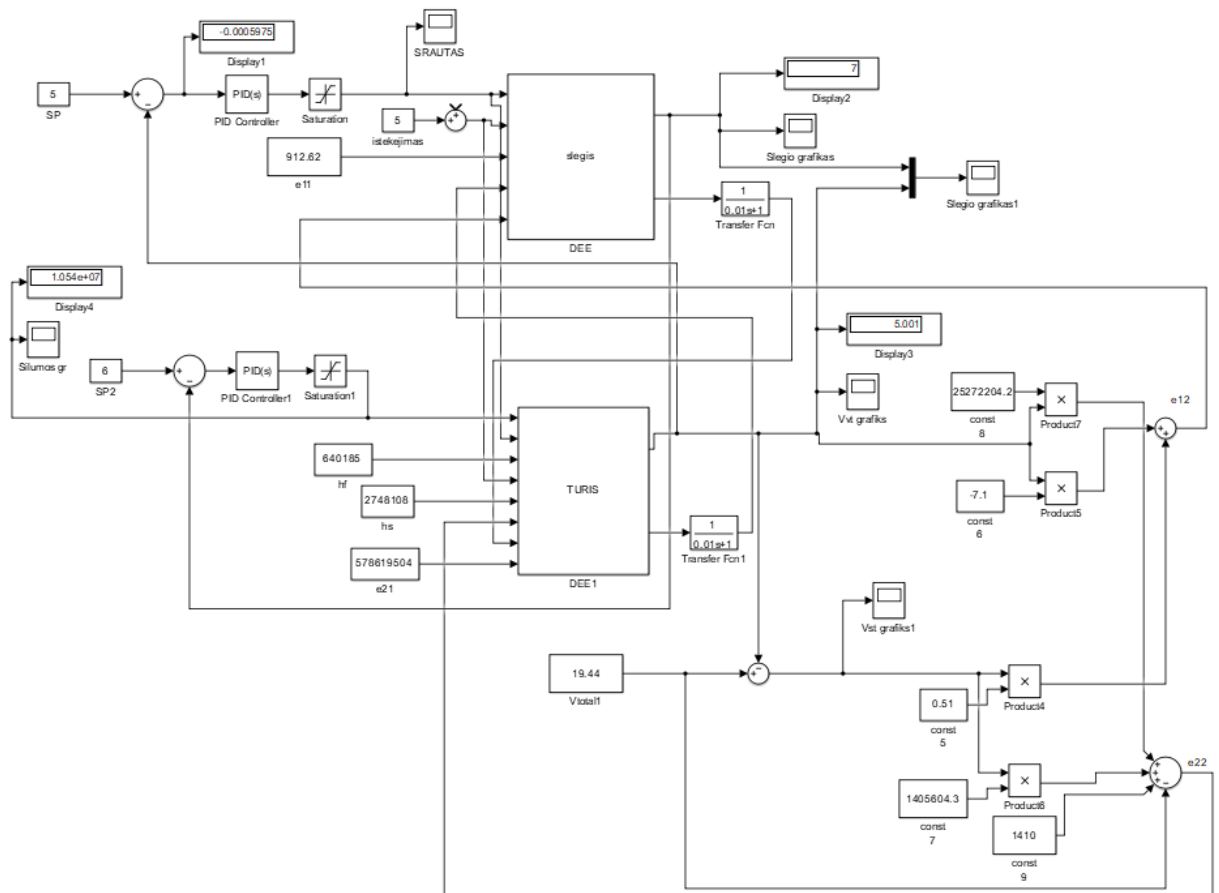


9 pav. Slėgio ir tūrio grafikai be regulatoriaus (slėgis dešinėje, tūris kairėje)

Iš aukščiau pateiktų grafikų matyti, kad šilumos ir srauto pokyčiai teisiogiai veikia tiek slėgį, tiek tūrį.

6.1.4. Proceso valdymas, regulatoriaus parametrų parinkimas bei derinimas ir režimų modeliavimas

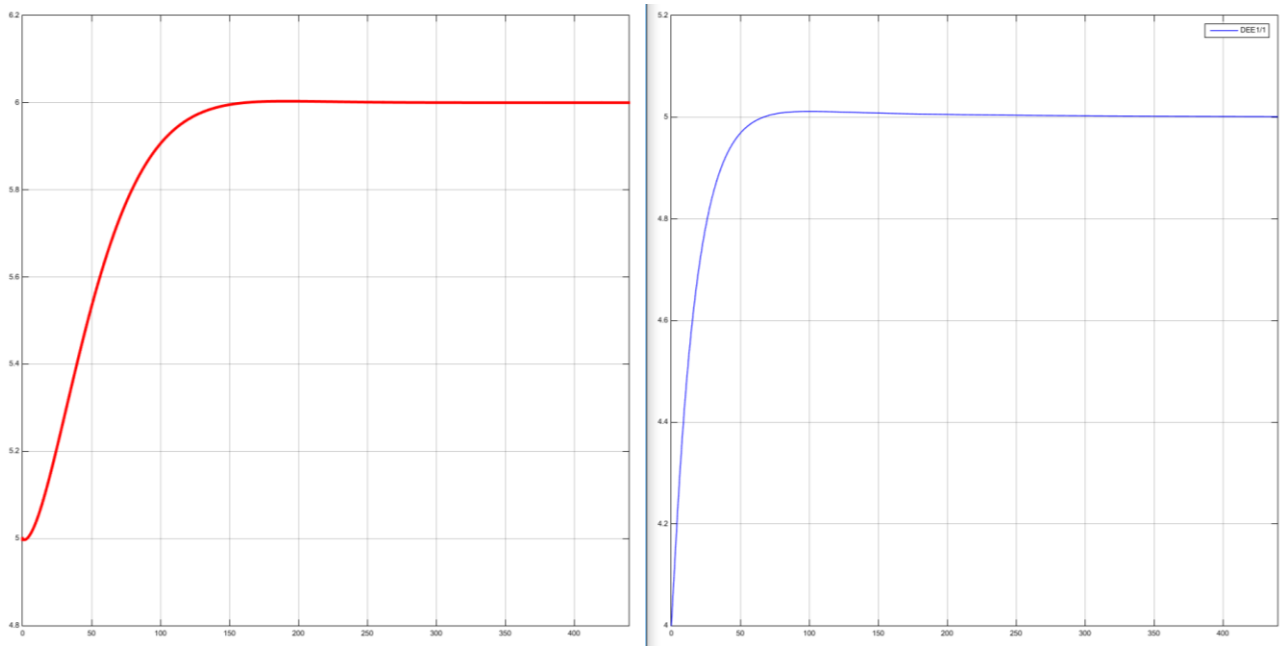
Buvo nuspręsta slėgį valdyti keičiant šilumos kiekį, tūrį – keičiant įtekėjimo srautą, o ištekėjimo srautas laikomas pastovus. Vėliau, norint ištirti sistemos reakciją į trikdį, ištekėjimo srauto kitimas laikomas trikdžiu. Tiek slėgio tiek tūrio valdymui buvo nuspręsta naudoti PI regulatorius. Suprojektuotas modelis su valdymo sistema pateikiamas 12 pav.



10 pav. Supaprastinto modelio realizavimas, kuriame integruota valdymo sistema

Regulatoriai buvo derinami žinomais metodais. Pirmiausia buvo didinama P dedamoji tol, kol atsirado neslopstantys švytavimai. Atsiradus švytavimams buvo surastas švytavimų periodas ir tuomet remiantis Ziegler–Nichols metodu apskaičiuotos PI dedamosios. Įstačius apskaičiuotas vertes, dedamosios buvo papildomai derinamos rankomis atsižvelgiant į proceso reakciją. PI dedamosios tūrio reguliavimui yra tokios: $P=60$, $I=0,006$. PI dedamosios slėgio reguliavimui: $P=10^3$, $I=0,02$.

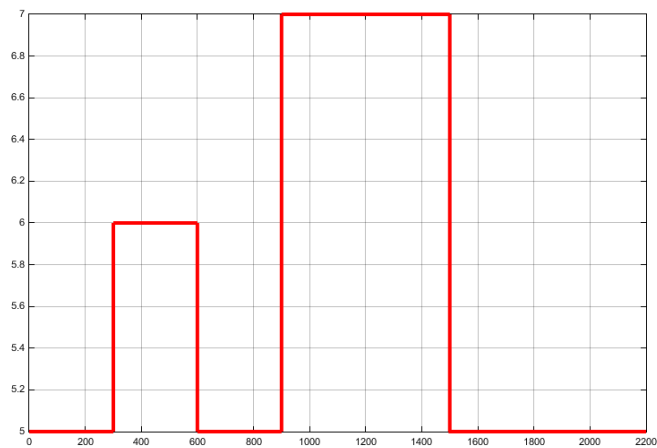
11 paveiksle pateikiamas grafikas, kai tūris padidinamas iki 5 m^3 , o slėgis – 6 bar.



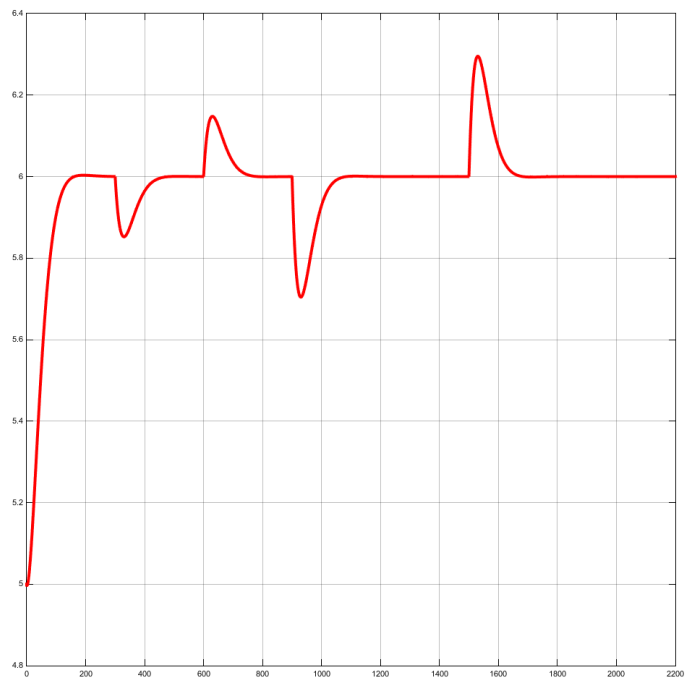
11 pav. Slėgio (kairėje) ir tūrio (dešinėje) grafikai, kai pridamas reguliatorius bei pradinės sąlygos padidintos vienetu

Absoliutinių paklaidų integralas tūriui yra lygus 17,58, o slėgiui 53,18.

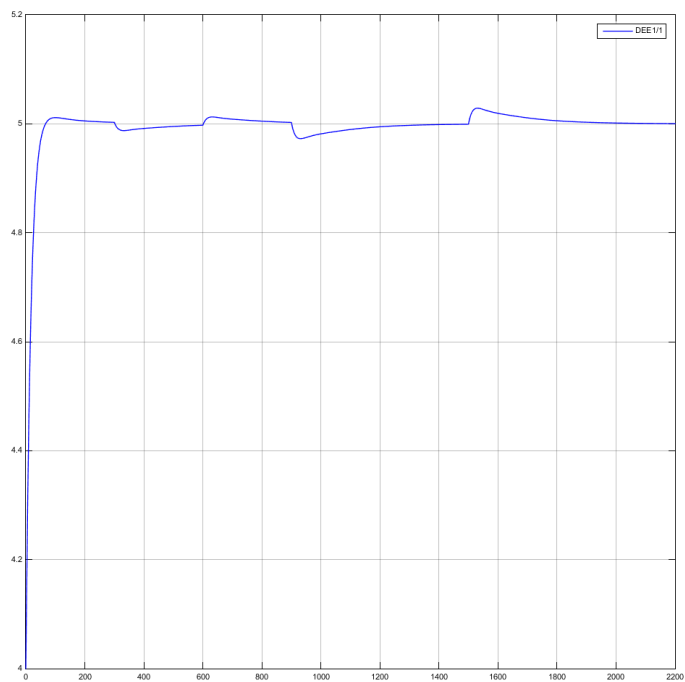
Toliau tiriama sistemos reakcija į trikdį. Kadangi sistema nusistovi, kai $T=300$ s, ištekėjimas padidėja vienetu, ir kai $T=600$ s ištekėjimo srautas sumažėja vienetu, kai $T=900$ s, ištekėjimo srautas padidėja iki 7 kg/s, o esant $T=1500$ s grįžta prie 5 kg/s. 12 paveiksle pateikiamas trikdžių grafikas, 13 paveiksle slėgio kitimo grafikas, o 14 paveiksle tūrio grafikas.



12 pav. Ištekėjimo srauto pasikeitimas (sistemos trikdys)



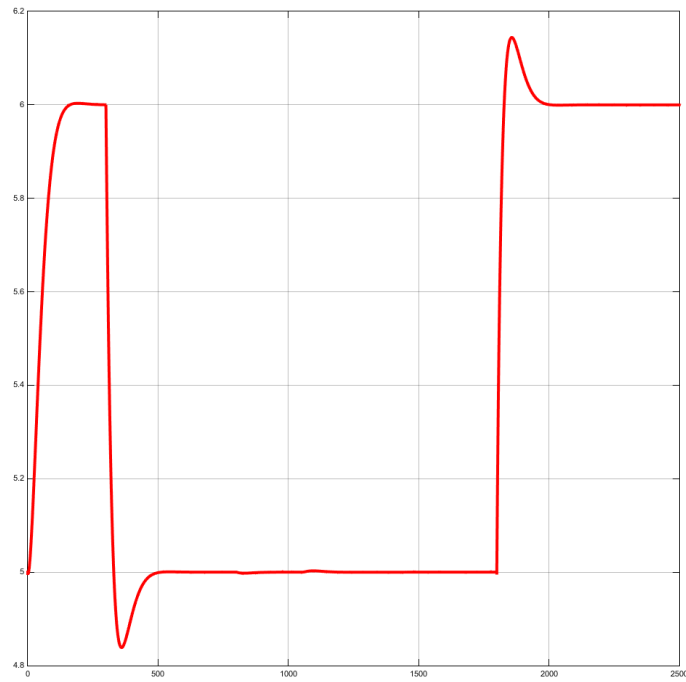
13 pav. Slėgio kitimo grafikas, kai sistemą veikia trikdys



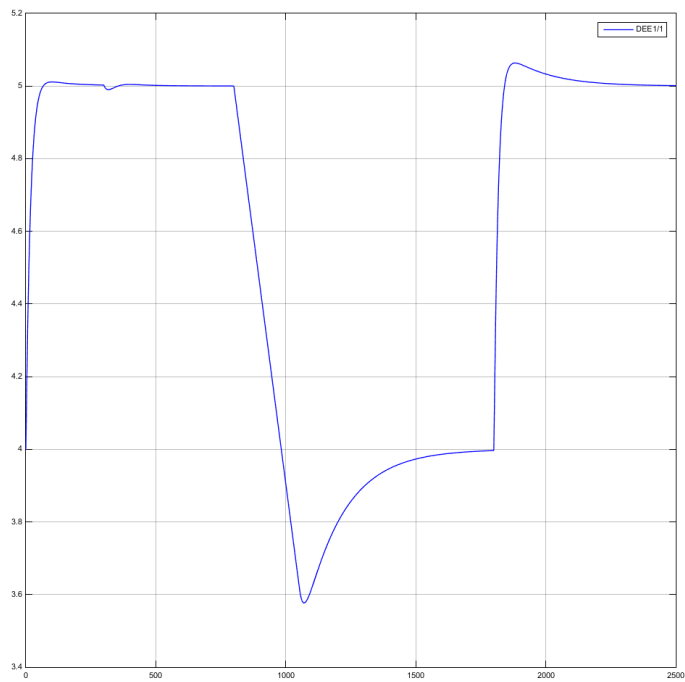
14 pav. Tūrio kitimo grafikas, kai sistemą veikia trikdys

Absoliutinių paklaidų integralas tūriui yra lygus 31,74, o slėgiui 116,9.

Taip pat buvo įvestas trikdys užduoties atžvilgiu. Kai laikas $T=300$ s slėgis nukrenta iki 4 bar, kai $T=800$ s tūris nukrenta iki 4 m^3 , o kai $T=1800$ s slėgis padidėja vėl iki 7 bar, o tūris iki 5 m^3 . 15 paveiksle pavaizduotas slėgio kitimo grafikas, o 16 paveiksle tūrio kitimo grafikas.



15 pav. Slėgio kitimo grafikas keičiantis užduoties signalams



16 pav. Tūrio kitimo grafikas keičiantis užduoties signalams

Absoliutinių paklaidų integralas tūriui yra lygus 225,9, o slėgiui 97,17.

6.1.5. Išvados

1. Patikrinta, jog modelis tiksliai apibūdina slėgio bei tūrio pasikeitimus pakitus šilumos kiekiui, įtekėjimo ar ištekėjimo srautams.
2. Sistemai valdyti buvo realizuoti PI reguliatoriai ir jie buvo derinami žinomais metodais.

3. Sistema į trikdžius reaguoja gerai, statinių paklaidų nėra, slėgio maksimalus perreguliavimas neviršija 5 %, o tūrio- neviršija 1 %.

Kaip jau buvo minėta anksčiau, šis modelis neatspindi būgno lygio elgesio, nes joje neaprašomas garo ir vandens pasiskirstymas sistemoje. Šio modelio tobulinimas turi prasidėti nuo sprendimo kaip perskaičiuoti entalpijas keičiantis slėgiui ir lygiui, tuomet remiantis Astrom ir Bell [9] matematinio modeliu, kuriame atsižvelgiama į garo pasiskirstymą būgne ir vamzdžiuose, kokybę, vandens stovų dinamiką bei trintį vamzdžiuose.

6.2. Išplėstinio modelio realizavimas

6.2.1. Proceso įėjimo/išėjimo kintamieji, trikdžiai, manipuluojami kintamieji ir jų kitimo ribos

Garo katilo slėgio (p) bei tūrio (V_{wt}) būseną charakterizuoja kintamieji $\rho_w, \rho_s, V_{st}, q_f, q_s, e_{11}, e_{12}, e_{21}, e_{22}, e_{32}, e_{33}, e_{42}, e_{43}, Q, h_f, h_w, h_s, V_{sd}, V_{wd}, \alpha_r, \alpha_v, h_c, q_{dc}, e_{32}, e_{33}, \alpha_r, e_{42}, e_{43}, e_{44}, \frac{dV_{wt}}{dt}, \frac{dp}{dt}, \frac{\partial \rho_w}{\partial p}, \frac{\partial \rho_s}{\partial p}, \frac{\partial h_s}{\partial p}, \frac{\partial h_f}{\partial p}, \frac{\partial h_w}{\partial p}, \frac{d\alpha_r}{dt}, \frac{dV_{sd}}{dt}, \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial p}, \frac{\partial t_s}{\partial p}, \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial \alpha_r}$. Srautai, šilumos kiekis yra matuojami jutikliais, o kiti apskaičiuojami arba randami iš lentelių. Slėgis valdomas išeinančiu srautu (garo srautu q_s), o vandens lygis įtekančiu srautu (vandens srautu q_f). Trikdys šioje sistemoje yra šilumos kiekio pasikeitimas (Q).

3 lentelė. Išplėstinio modelio proceso būsenos kintamieji

Kintamasis	Aprašymas	Kitimo ribos
e_{12}	Tarpinis kintamasis apibūdinantis garo katilo dinamiką	-10... 1,5·10 ⁻⁴
e_{11}	Tarpinis kintamasis apibūdinantis garo katilo dinamiką	0... 700
e_{21}	Tarpinis kintamasis apibūdinantis garo katilo dinamiką	0...10·10 ⁸
e_{22}	Tarpinis kintamasis apibūdinantis garo katilo dinamiką	0...2·10 ⁴
e_{32}	Tarpinis kintamasis apibūdinantis garo katilo dinamiką	0... 1000
e_{33}	Tarpinis kintamasis apibūdinantis garo katilo dinamiką	0...14·10 ⁹
e_{42}	Tarpinis kintamasis apibūdinantis garo katilo dinamiką	-10...12·10 ⁻³
e_{43}	Tarpinis kintamasis apibūdinantis garo katilo dinamiką	-0,2...1
$\frac{dV_{wt}}{dt}$	Vandens tūrio išvestinė	-0,1...0,3
$\frac{dp}{dt}$	Slėgio išvestinė	-1...0,5·10 ⁴
$\frac{d\alpha_r}{dt}$	Garo kokybės išvestinė	-3...1·10 ⁻³
$\frac{dV_{sd}}{dt}$	Garo tūrio vandenyje išvestinė	-2,5...0,5

4 lentelė. Išplėstinio modelio proceso įėjimo kintamieji

Kintamasis	Aprašymas	Kitimo ribos
ρ_w	Vandens tankis	0...1000 kg/m ³
ρ_s	Garų tankis	0...100 kg/m ³
V_{st}	Garų tūris katile	0...15 m ³
q_f	Įtekančio vandens srautas	0...50 kg/s
q_s	Ištekančio garų srautas	0...50 kg/s
q_{dc}	Nusileidžiančių vamzdžių srautas	0...40 kg/s
Q	Šilumos kiekis	0...30 MW
h_f	Įtekančio vandens entalpija	0...0,5·10 ⁶ J/kg
h_w	Vandens entalpija	0...2·10 ⁶ J/kg
h_s	Garų entalpija	0...3·10 ⁶ J/kg
h_c	Paslėptoji energija	0...1,5·10 ⁶ J/kg
V_t	Bendras garų katilo tūris	0...15,904 m ³
V_{wt}	Bendras vandens tūris	0...15,904 m ³
V_{sd}	Bendras garų tūris po vandeniu	0...2 m ³
α_v	Tūrio dalis	0...10·10 ⁻⁶
α_r	Garų kokybė	0...10·10 ⁻⁷
$\frac{\partial \rho_w}{\partial p}$	Dalinė vandens tankio išvestinė nuo slėgio	-2·10 ⁻⁵ ...0
$\frac{\partial \rho_s}{\partial p}$	Dalinė garų tankio išvestinė nuo slėgio	0...10·10 ⁻⁶
$\frac{\partial h_w}{\partial p}$	Dalinė vandens entalpijos išvestinė nuo slėgio	0...0,1
$\frac{\partial h_s}{\partial p}$	Dalinė garų entalpijos išvestinė nuo slėgio	-0,1...0
$\frac{\partial t_s}{\partial p}$	Dalinė sotinimo temperatūros išvestinė nuo slėgio	0...10·10 ⁻⁶
$\frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial p}$	Dalinė vidutinio tūrio dalies išvestinė nuo slėgio	-1,5·10 ⁻¹² ...0
$\frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial \alpha_r}$	Dalinė vidutinio tūrio dalies išvestinė nuo garų kokybės	0...10

6.2.2. Modeliavimo parametrų parinkimas

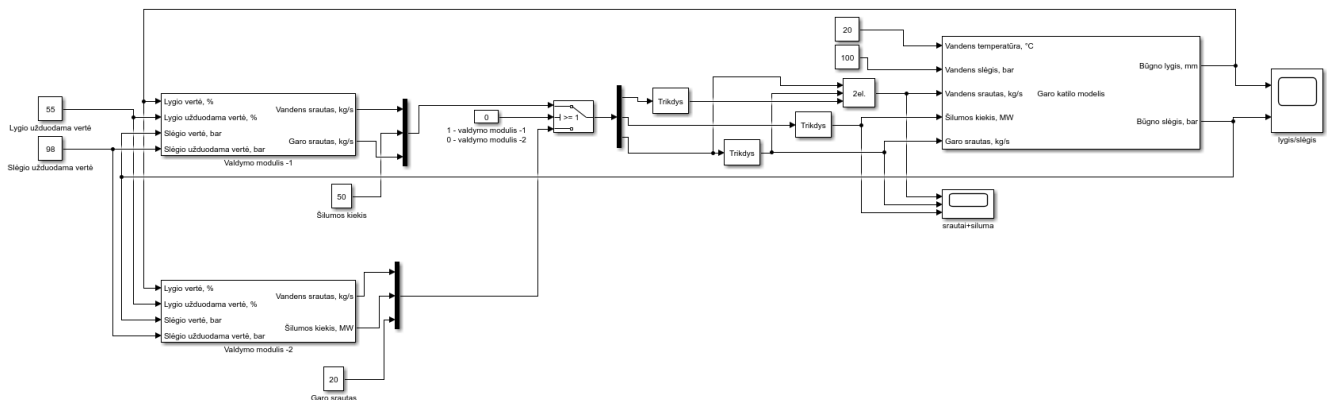
Kadangi modelis buvo kuriamas su tikslu jį verifikuoti, tai reikalingi parametrai paimti remiantis elektrinėje gautais duomenimis. Apskaičiuota, jog vandens paviršiaus plotas esant darbiniam lygiui (50 %) yra 13,5m², bendra garų katilo masė 50 tonų, būgno tūris 15,904 m³, kylančių (angl. *risers*) tūris 25 m³, nusileidžiančių vamzdžių tūris 8m³, nusileidžiančių vamzdžių trinties koeficientas 8, garų

buvimo laikas katile 12 s, konstanta $\beta = 0,3$, plotas kurį kertą nusileidžiančiais vamzdžiais judėdamas vanduo yra 4 m^2 , nusileidžiančių vamzdžių masė 25 tonos.

Priimta, kad, jeigu garo kokybė pakylančiuose vamzdžiuose yra mažesnė arba lygi 0, tai jai suteikiama 10^{-6} vertė, jei apskaičiuota garo kokybė didesnė arba lygi 1, tai tolimesniuose skaičiavimuose suteikiama vertė lygi 1. Tokie pat apribojimai galioja ir vidutinei tūrio daliai (α_v). Vandens kiekis būgne bei garo tūris vandenyje yra lygūs 0, jeigu jų apskaičiuota vertė yra mažesnė už 0.

6.2.3. Modelio realizavimas

Matlab Simulink ir *S-Function* aplinkose sumodeliuotas katile esančio vandens tūris, slėgis, garo kokybė bei tūris vandenyje (burbuliuko tūris). Skirtingai nuo supaprastinto, šio modelio diferencialinės lygtys, pradinės sąlygos, tarpiniai skaičiavimai, vidiniai kintamieji aprašyti naudojant *Matlab S-Function* (pilnas programos kodas pateikiamas 1 priede). Bendras sistemos vaizdas pateikiamas 17 paveiksle.



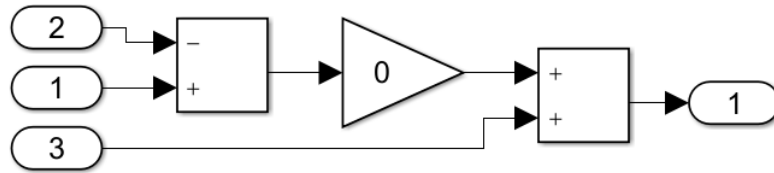
17 pav. Išplėstinio modelio realizavimas, kuriame integruota valdymo sistema

17 paveiksle matyti, kad bendrą sistemą sudaro:

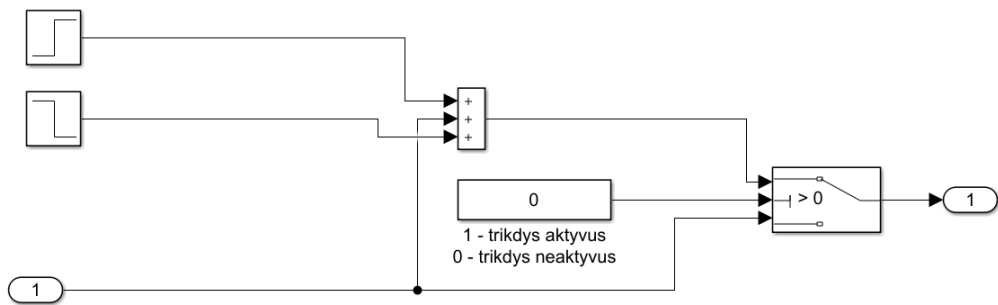
- *Switch* – tai elementas, kuris vartotojui suteikia galimybę nesudėtingai keisti valdymo būdus – lygio bei slėgio valdymui naudoti pirmąjį arba antrąjį valdymo modulius keičiant *Constant* elemento vertę;
- *Constant* – tai elementas savo išėjime duodantis pastovią reikšmę;
- *Scope* – tai elementas stebėti proceso būseną;
- „Garo katilo modelis“ - tai *M-S-Function* elementas padedantis ištestuoti parašytą funkciją *Matlab* redaktoriuje (angl.*editor*) *Simulink* aplinkoje;
- „2el“ – tai posistemė (18 pav.), kurią sudaro pora *Sum* ir vienas *Gain* elementas. Ši posistemė skirta lygio valdymui remiantis dviem matavimo elementais (angl.*two element control*);
- „Trikdys“ – tai posistemė (19 pav.), kurią sudaro du *Step* elementai, vienas *Sum*, *Constant*, *Switch* elementai. Šie elementai imituoja sistemos trikdį. *Constant* ir *Switch* elementai suteikia galimybę vartotojui nesudėtingai įjungti/išjungti trikdį testavimo metu;
- „Valdymo modulis - 1“ – tai posistemė (20 pav.), kurią sudaro du *Sum* elementai bei du PID reguliatoriai. Šioje posistemėje lygis yra valdomas įtekančio vandens srautu, o slėgis garo

srautu. Jeigu modeliavimui naudojamas toks valdymo modulis, tai tokios sistemos trikdys yra šilumos kiekis;

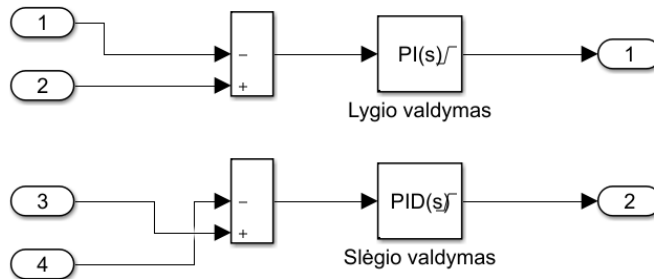
- „Valdymo modulis - 2“ – tai posistemė (21 pav.), kuri iš esmės niekuo nesiskiria nuo posistemės pateiktos 21 pav., tačiau šioje posistemėje slėgis yra valdomas šilumos kiekiu, o tokios sistemos trikdys yra ištekancio garo srautas.



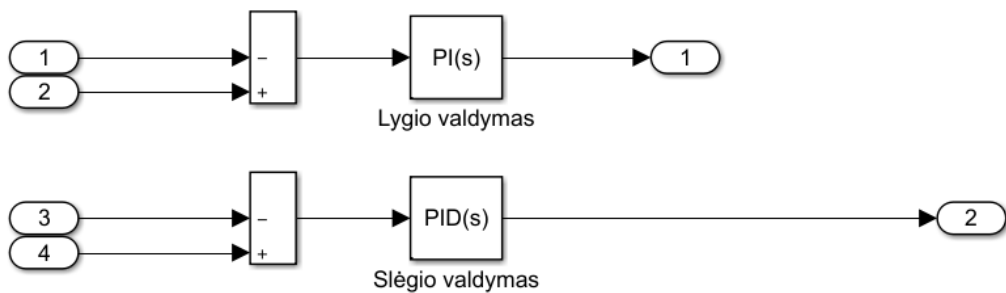
18 pav. „2 el“ posistemės vaizdas *Simulink* aplinkoje



19 pav. „Trikdys“ posistemės vaizdas *Simulink* aplinkoje



20 pav. „Valdymo modulis - 1“ posistemės vaizdas *Simulink* aplinkoje



21 pav. „Valdymo modulis - 2“ posistemės vaizdas *Simulink* aplinkoje

„Garo katilo modelis“ yra pagrindinis blokas be kurio ši sistema nefunkcionuotų. Po šiuo modeliui slepiasi funkcija, kurioje aprašytos anksčiau nagrinėtos matematinės lygtys (5.2 skyrius). Ši funkcija padėjo nesudėtingai išspręsti tankių bei entalpijų skaičiavimus (programos fragmentas kaip apskaičiuojamos entalpijos ir tankiai pateikiamas 22 paveiksle). Šiame modelyje yra skaičiuojamos keturios išvestinės: bendro vandens tūrio, būgno slėgio, garo kokybės pakylančiuose vamzdžiuose ir garo tūrio po vandeniu. Išvestinių išraiška programoje pateikiama 23 paveiksle.

```

hs=XSteam('hV_p', Pd)*1000; %Būgne esančio garo entalpija J/kg
hw=XSteam('hL_p', Pd)*1000; %Būgne esančio vandens entalpija J/kg
dhs=(XSteam('hV_p', Pd+0.5*dp)*1000-XSteam('hV_p', Pd-0.5*dp)*1000)/(dp*10^5); %Dalinė garo entalpijos išvestinė pagal slėgį J/(kg Pa)
dhw=(XSteam('hL_p', Pd+0.5*dp)*1000-XSteam('hL_p', Pd-0.5*dp)*1000)/(dp*10^5); %Dalinė vandens entalpijos išvestinė pagal slėgį J/(kg Pa)
rhos=XSteam('rhoV_p', Pd); %Garo tankis kg/m3
rhov=XSteam('rhoV_p', Pd); %Vandens tankis kg/m3
drhos=(XSteam('rhoV_p', Pd+0.5*dp)-XSteam('rhoV_p', Pd-0.5*dp))/(dp*10^5); %Dalinė garo tankio išvestinė pagal slėgį kg/(m3 Pa)
drhov=(XSteam('rhoL_p', Pd+0.5*dp)-XSteam('rhoL_p', Pd-0.5*dp))/(dp*10^5); %Dalinė vandens tankio išvestinė pagal slėgį kg/(m3 Pa)
dts=(XSteam('Tsat_p', Pd+0.5*dp)-XSteam('Tsat_p', Pd-0.5*dp))/(dp*10^5); %Dalinė temperatūros pagal slėgį išvestinė C / Pa
hf=XSteam('h_pI', Pf, tf)*1000; %Įtekančio vandens entalpija J/kg

```

22 pav. Tankių ir entalpijų skaičiavimas. Programos fragmentas

```

block.Derivatives.Data(1) = -(Fs - Ff + (Q + hf*Ff - hs*Fs - (e21*(Ff - Fs))/e11)/(e22 - (e12*e21)/e11)*e12)/e11; %Bendras vandens tūris (apskaičiuotas) m3
block.Derivatives.Data(2) = (Q + hf*Ff - hs*Fs - (e21*(Ff - Fs))/e11)/(e22 - (e12*e21)/e11); %Būgno slėgis (apskaičiuotas) Pa
block.Derivatives.Data(3) = ((e32*(Q + hf*Ff - hs*Fs - (e21*(Ff - Fs))/e11))/(e22 - (e12*e21)/e11) - Q + ar*hc*Fdc)/e33; %Garo kokybė pakylančiuose vamzdžiuose (apskaičiuotas)
block.Derivatives.Data(4) = -((e42*(Q + hf*Ff - hs*Fs - (e21*(Ff - Fs))/e11))/(e22 - (e12*e21)/e11) - (Ff*(hf - hw))/hc - (e43*((e32*(Q + hf*Ff - hs*Fs - (e21*(Ff - Fs))/e11))/(e22 - (e12*e21)/e11) - Q + ar*hc*Fdc))/e33 + (rhos*(Vsd - Vsd0))/Td)/e44; %Garo tūris po vandeniu (apskaičiuotas), m3

```

23 pav. Išvestinių skaičiavimas. Programos fragmentas

Tam, kad šis modelis būtų universalus ir parametrai būtų nesudėtingai keičiami, buvo sukurtas iššokantis langas, kuriame galima keisti pagrindinius garo katilo parametrus (24pav.).

Block Parameters: MSFunction (mask)

Parameters

Pradinis slėgis būgne, bar
98

Pradinis lygis būgne, %
55

Būgne esančio vandens paviršiaus plotas, m2
13.5

Būgno skersmuo, m
1.5

Būgno metalo masė, kg
50000

Būgno tūris, m3
15.904

Pakylančių vamzdžių (risers) tūris, m3
25

Nusileidžiančių vamzdžių (downcomers) tūris, m3
8

Pakylančių vamzdžių masė, kg
1000

Nusileidžiančių vamzdžių trinties koeficientas
8

Garų gyvavimo laikas būgne, s
12

Parametras Beta
0.3

Pradinė garų kokybė
0

Pradinis garų turis vandenyje, m3
0

Nusileidžiančių vamzdžių masė, kg
25000

OK Cancel Help Apply

24 pav. Parametrų įvedimo langas

6.2.4. Proceso valdymas, reguliatorių parametų parinkimas bei derinimas ir režimų modeliavimas

Šiame imitaciniame matematiname modelyje yra dvi valdymo galimybės:

- Valdyti sistemos slėgį keičiant ištekėjimo (garo) srautą;
- Valdyti sistemos slėgį keičiant šilumos kiekį.

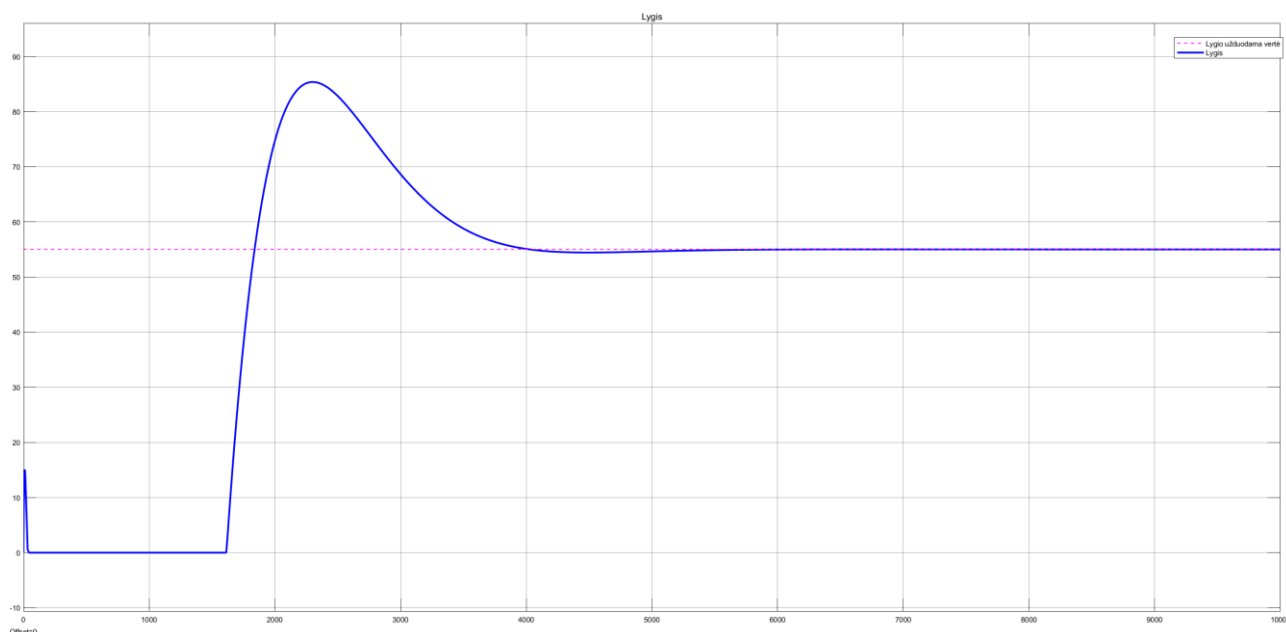
Abiem atvejais sistemos lygis yra valdomas keičiant įtekėjimo (vandens) srautą.

Regulatoriai buvo derinami žinomais metodais: pirmiausia didinama P dedamoji tol, kol atsirado neslopstantys švytavimai, tuomet suradus švytavimų periodą ir remiantis Ziegler–Nichols metodu apskaičiuotos PI dedamosios. Kadangi modeliuojamoje sistemoje slėgis priklauso nuo tūrio ir atvirkščiai, tai regulatoriai buvo derinami paraleliai.

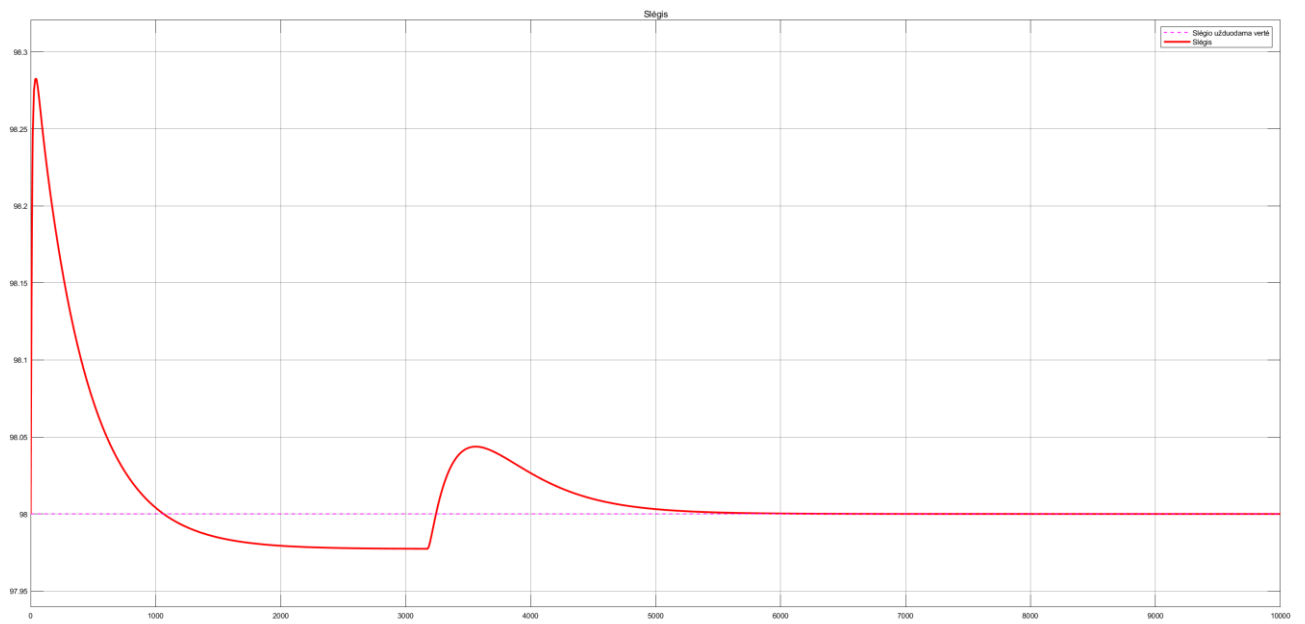
6.2.4.1. Sistemos valdymas, kai slėgis valdomas keičiant garo srautą

Kaip jau buvo minėta ankstesniuose skyreliuose, esant tokiam sistemos valdymui (salos darbo režimas), trikdys yra šilumos kiekio pasikeitimas, o toks sistemos valdymas sumodeliuotas „Valdymo modulis -1“ bloke (20 pav.).

25 paveiksle pateikiamas lygio, o 26 paveiksle slėgio kitimo grafikas jau suderintos sistemos, kai šilumos kiekis lygus 50 MW, lygio užduota vertė 55 %, o slėgio 98 bar.

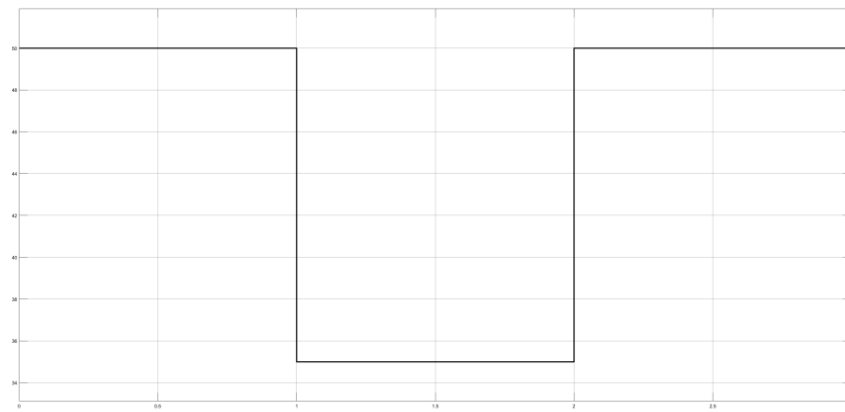


25 pav. Suderintos sistemos lygio kitimo grafikas. x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – lygis %.

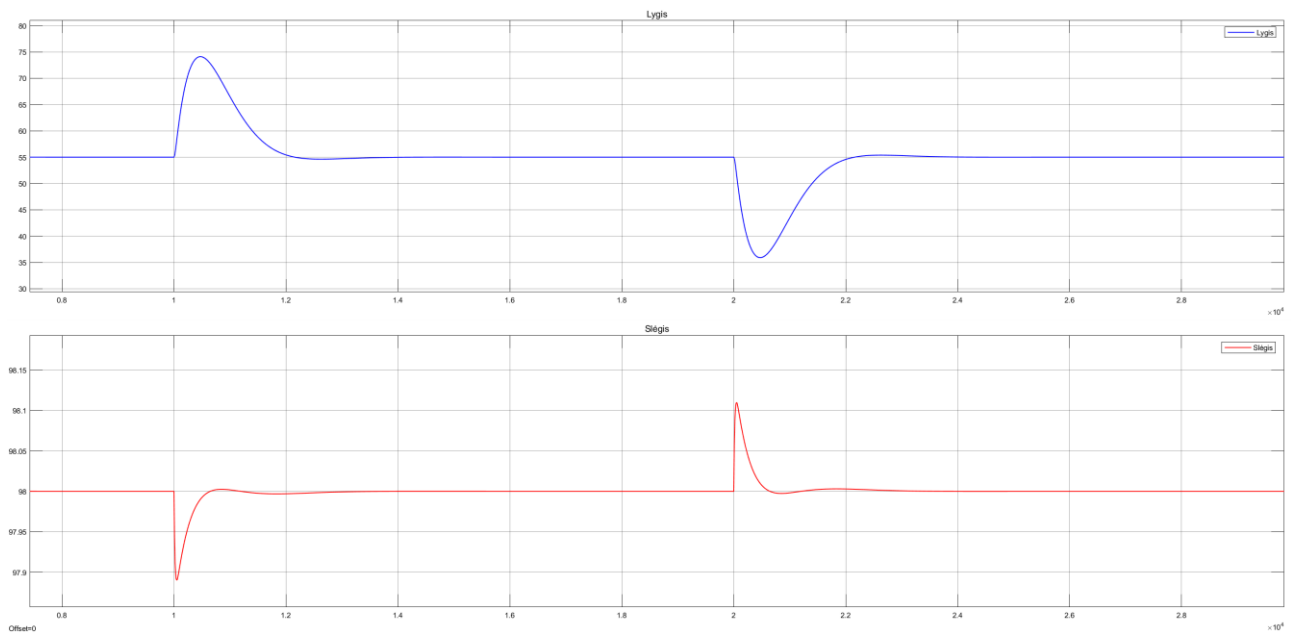


26 pav. Suderintos sistemos slėgio kitimo grafikas. x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – slėgis bar.

Patikrinti sistemos reakcijai, buvo įvestas trikdys (šilumos kiekio pokytis) (27 pav.). Sistemos reakcija į trikdį pateikiama 28 paveiksle.



27 pav. Sistemos trikdys (šilumos kiekio pokytis). x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – šilumos kiekis MW.

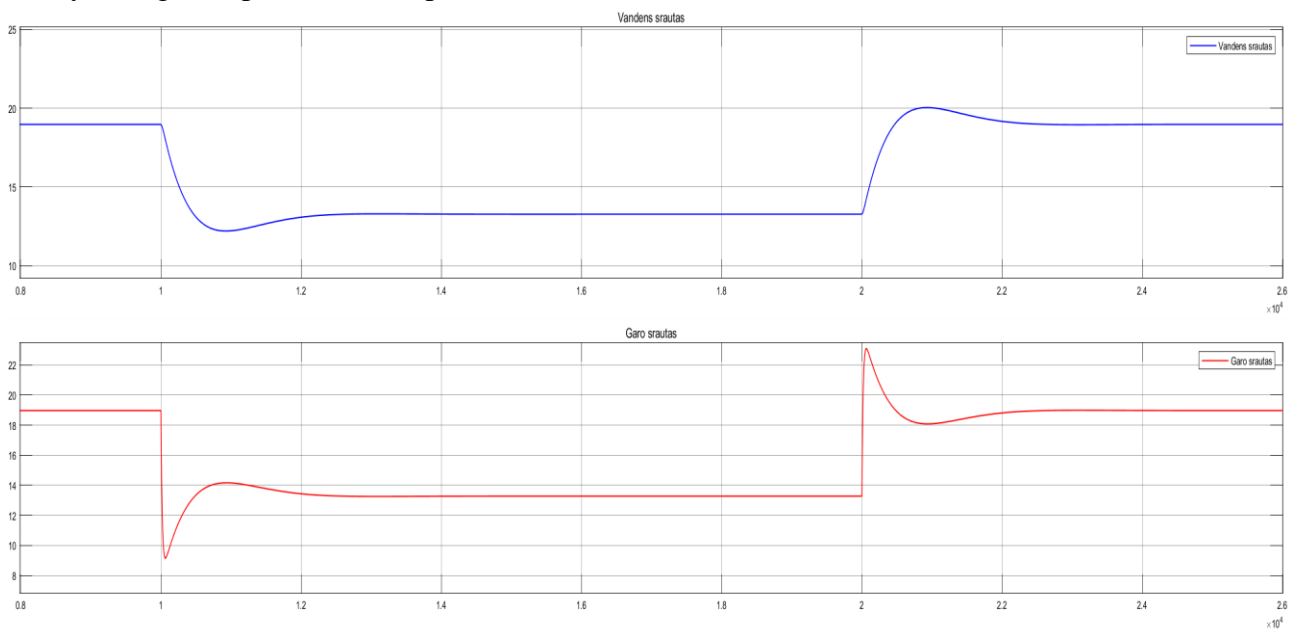


28 pav. Lygio (viršuje) ir slėgio (apačioje) kitimo grafikai, kai įvedamas trikdys. x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – atitinkamai slėgis bar, lygis %.

Lygio perreguliavimas suveikus pirmam trikdžiui laiko momentu $t=10000$ s siekia 34,72 %, nusistovėjusios statinės paklaidos nėra, o nusistovėjimo laikas 3000 s. Suveikus antram trikdžiui laiko momentu $t=20000$ s perreguliavimas siekia 34,54 %, statinės paklaidos nėra, o nusistovėjimo laikas lygus 3500 s. Regulatoriaus parametrai: $K_p=0,20$, $T_i=0,0003$.

Slėgio perreguliavimas suveikus pirmam trikdžiui laiko momentu $t=10000$ s siekia 0,102%, nusistovėjusios statinės paklaidos nėra, o nusistovėjimo laikas 3000s. Suveikus antram trikdžiui laiko momentu $t=20000$ s perreguliavimas siekia 0,112%, statinės paklaidos nėra, o nusistovėjimo laikas lygus 3000s. Regulatoriaus parametrai: $K_p=80$, $T_i=0,2$.

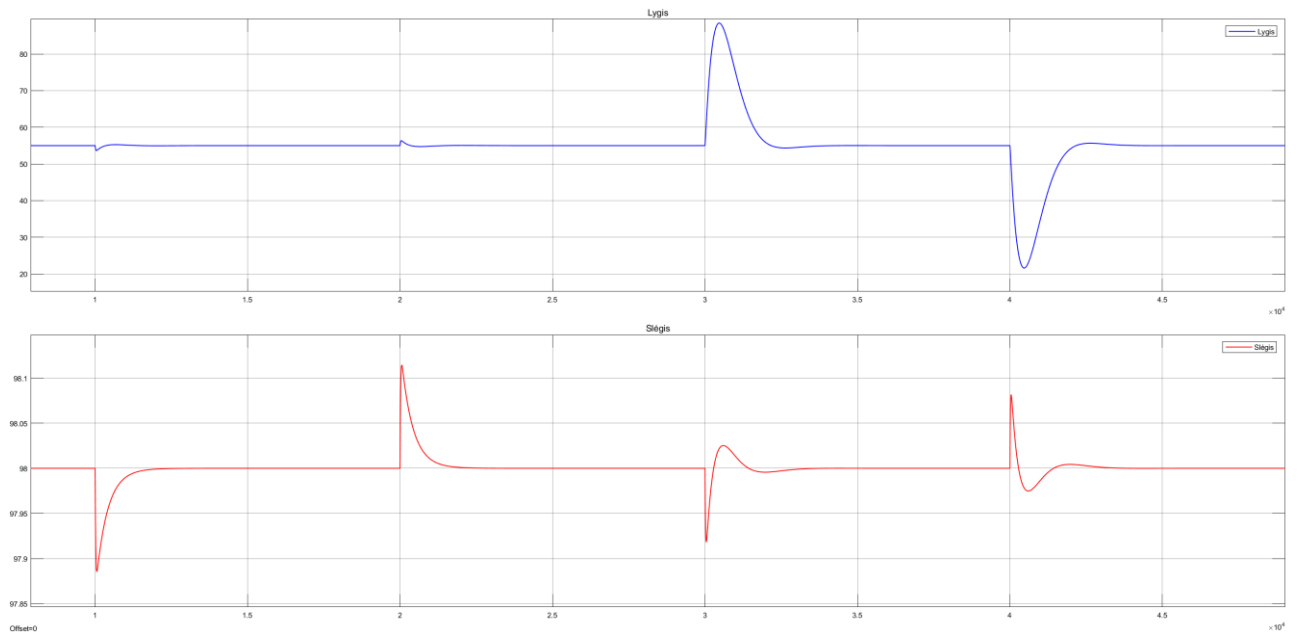
Valdymo signalai pateikiami 29 paveiksle.



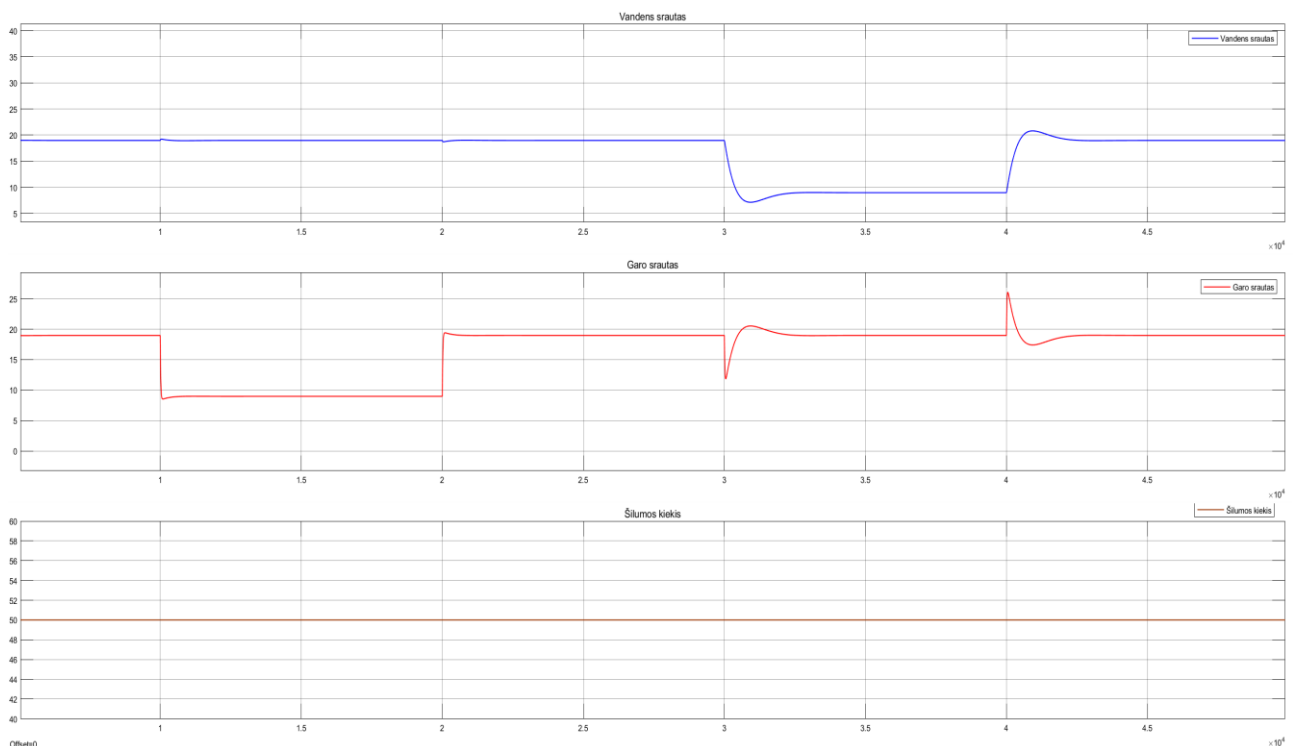
29 pav. Valdymo signalai (viršuje vandens srautas, apačioje garo srautas). x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – kg/s

29 paveiksle matyti, kad keičiantis šilumos kiekius atitinkamai keičiasi ir srautai: mažėjant šilumos kiekiui mažėja ir garo bei vandens srautai, o didėjant atitinkamai didėja abu srautai. Tokia sistemos elgsena pavirtina tai, kad šilumos kiekis yra tiesiogiai proporcingas srautams.

Siekiant patikrinti sistemos reakciją į išorinius trikdžius buvo įvesti du papildomi trikdžiai: įtekančio vandens bei garo srautų padidėjimai/sumažėjimai. Sistemos reakcija į tokius trikdžius pateikiama 30 paveiksle, 31 paveiksle pateikiamas valdymo signalų bei šilumos kiekio kitimo grafikas.



30 pav. Sistemos reakcija į išorinius srautų pokyčius (viršuje lygis, apačioje slėgis). x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – atitinkamai slėgis bar, lygis %.



31 pav. Valdymo signalų bei šilumos kiekio kitimo grafikas (viršuje vandens srautas, viduryje garo srautas, apačioje šilumos kiekis). x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – atitinkamai srautai kg/s, šilumos kiekis MW.

30 ir 31 paveiksluose matyti, kad 10000 sekundę staiga padidėjus garo srautui (10 kg/s) lygio pokytis yra nežymus (perreguliavimas - 2,72 %, nusistovėjimo laikas – 2000 s) taip pat ir slėgio (perreguliavimas – 0,10 %, nusistovėjimo laikas – 2000 s). Slėgio valdymo signalo vertė sumažėja 10 kg/s. Garo srautui sumažėjus (suveikus išoriniam trikdžiui $t=20000$ s) valdymo signalo vertė padidėja 10 kg/s, lygio ir srauto pokyčiai nedideli (nusistovėjimo laikai bei perreguliavimai tokie patys kaip ir srautui staiga padidėjus).

Vandens srautui padidėjus ($t=30000$ s) 10 kg/s, lygio pokytis yra žymiai didesnis negu padidėjus garo srautui (perreguliavimas – 60,91 %, nusistovėjimo laikas – 2500 s), slėgio pokytis yra beveik toks pat (perreguliavimas – 0,102 %, nusistovėjimo laikas – 1500 s). Vandens srauto valdymo signalo vertė sumažėja 10 kg/s. Vandens srautui sumažėjus ($t=40000$ s), valdymo signalas padidėja 10 kg/s, slėgio ir vandens pokyčiai tokie patys kaip ir vandens srautui padidėjus (nusistovėjimo laikai bei perreguliavimai tokie patys kaip ir srautui staiga padidėjus).

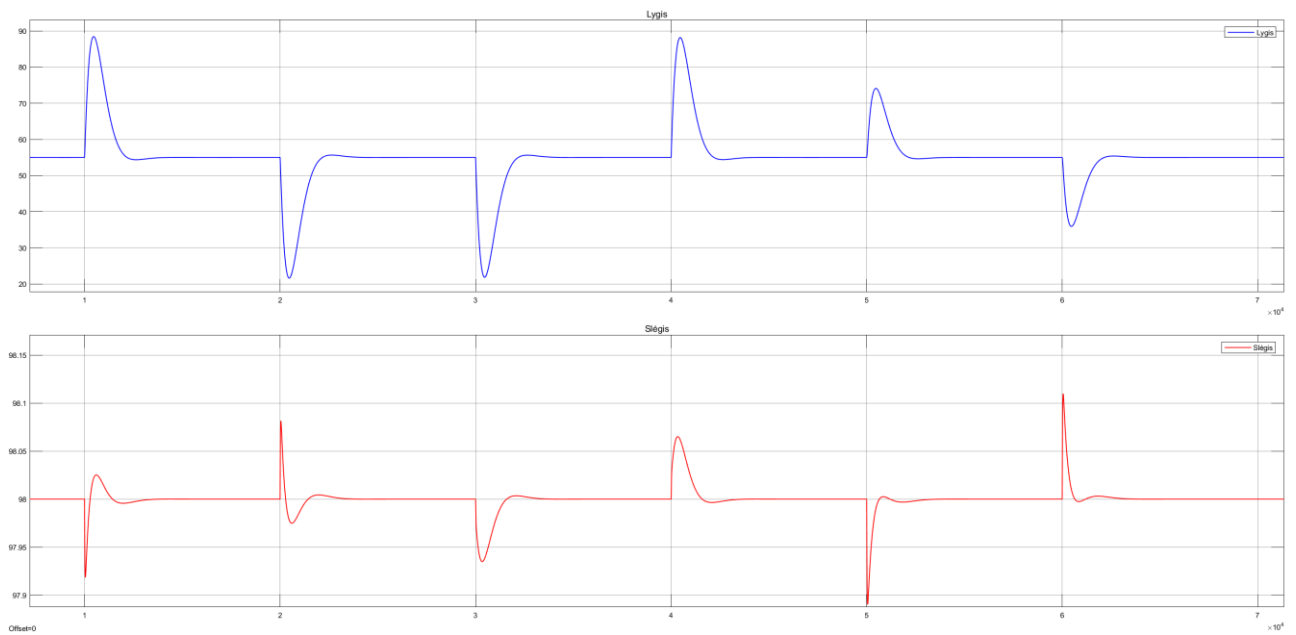
Taip pat 30 ir 31 paveiksluose matyti, kad, jei garo srautas padidėja, tai slėgio bei lygio vertės staiga sumažėja, padidėjus – staiga padidėja. Vandens srautui kintant, slėgio bei lygio vertės kinta kitaip: padidėjus vandens srautui lygis staiga išauga, o slėgis sumažėja, tačiau srautui sumažėjus lygis sumažėja, o slėgis padidėja.

Iki šiol visi bandymai buvo atliekami, kai lygio valdymui buvo naudojamas tik vienas elementas (lygio matavimas). Buvo išbandytas valdymas, kai lygio valdymui naudojamas ir garo srauto signalas (dviejų elementų valdymas). Norint aktyvuoti dviejų elementų valdymą sistemoje, posistemėje „2el“ (18pav.) reikia įvesti stiprinimo koeficiento vertę į *Gain* elementą. Kai *Gain* elemento vertė lygi 0, tuomet valdymas vykdomas vienu elementu.

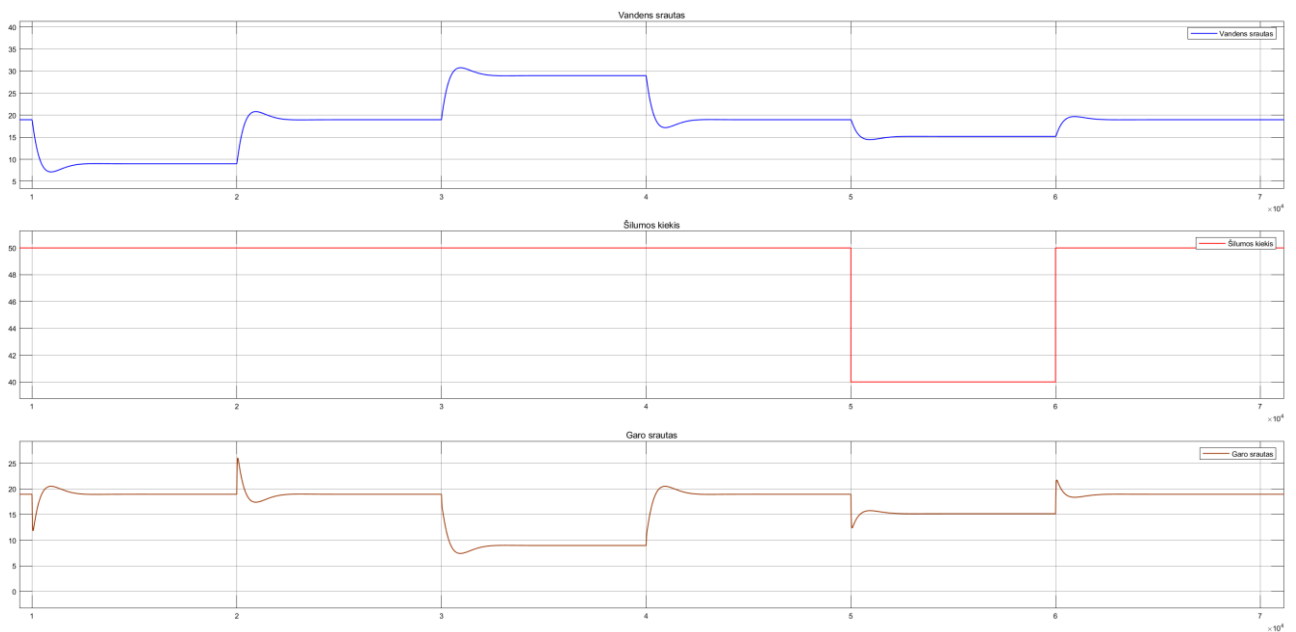
Dviejų elementų valdymą patikrinti buvo įvesti trikdžiai:

- Pirmas trikdys (vandens srauto kitimas): atsiranda laiko momentu $t=10000$ s (vandens srautas padidėja) ir dingsta, kai $t=20000$ s (srautas sumažėja);
- Antras trikdys (garo srauto kitimas): atsiranda kai $t=30000$ s (garo srautas padidėja) ir dingsta, kai $t=40000$ s (srautas sumažėja);
- Trečias trikdys (šilumos kiekio kitimas): atsiranda kai $t=50000$ s (šilumos kiekis sumažėja) ir dingsta, kai $t=60000$ s (šilumos kiekis padidėja).

Lygio ir slėgio kitimo grafikas pateiktas 32 paveiksle, o valdymo signalų kitimo grafikas 33 paveiksle. Bandymai buvo atlikti nekeičiant reguliatorių parametrų, *Gain* elemento vertė lygi 1.



32 pav. Sistemos reakcija į trikdžius (viršuje lygis, apačioje slėgis). x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – atitinkamai slėgis bar, lygis %.



33 pav. Valdymo signalai (viršuje vandens srautas, viduryje šilumos kiekis, apačioje garo kiekis). x ašis – laikas sekundėmis, y ašis- atitinkamai srautams kg/s, šilumos kiekiui MW

Iš 32 ir 33 paveikslų matyti, kad:

- Veikiant pirmam trikdžiui (įtekančio vandens srauto kitimui) lygio perreguliavimas yra 60,91 %, o nusistovėjimo trukmė 3000 s. Slėgio perreguliavimas lygus 0,102 %, nusistovėjimo trukmė 3000 s. Abu matavimai neturi statinės paklaidos. Labiausiai kinta lygio valdymo signalas (valdymo signalas sumažėja), šilumos kiekis pastovus, garo srautas trikdžio pradžioje ir pabaigoje atitinkamai trumpam sumažėja/padidėja;
- Veikiant antram trikdžiui (ištekančio srauto kitimui) lygio perreguliavimas yra toks pat kaip ir veikiant pirmajam trikdžiui = 60,91 %, nusistovėjimo laikas = 3000 s. Slėgio perreguliavimas bei nusistovėjimo laikas taip pat yra tokie patys kaip ir veikiant pirmajam

tridžiui. Įtekančio vandens srautas padidėja trikdžio pradžioje ir sumažėja, kai trikdys baigiasi. Garo srauto vertė kinta tik pačioje trikdžio pradžioje ir pabaigoje (visą trikdžio veikimo laikotarpį išlieka pastovus), šilumos kiekis nekinta;

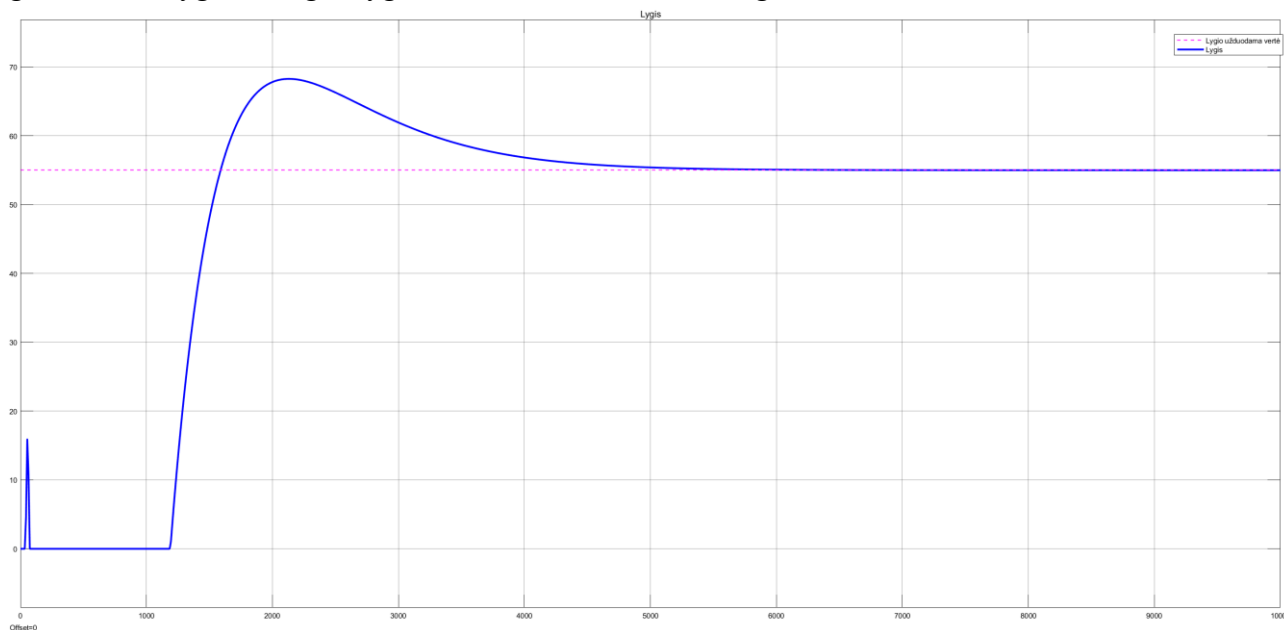
- Suveikus trečiajam trikdžiui (šilumos kiekio pokytis) lygio perreguliavimas yra lygus 35,54 %, nusistovėjimo laikas 3000 s. Slėgio perreguliavimas lygus 0,1122 %, o nusistovėjimo laikas 1000 s. Valdymo signalai veikiant trikdžiui sumažėja, o jam dingus padidėja.

6.2.4.2. Sistemos valdymas, kai slėgis valdomas keičiant šilumos kiekį

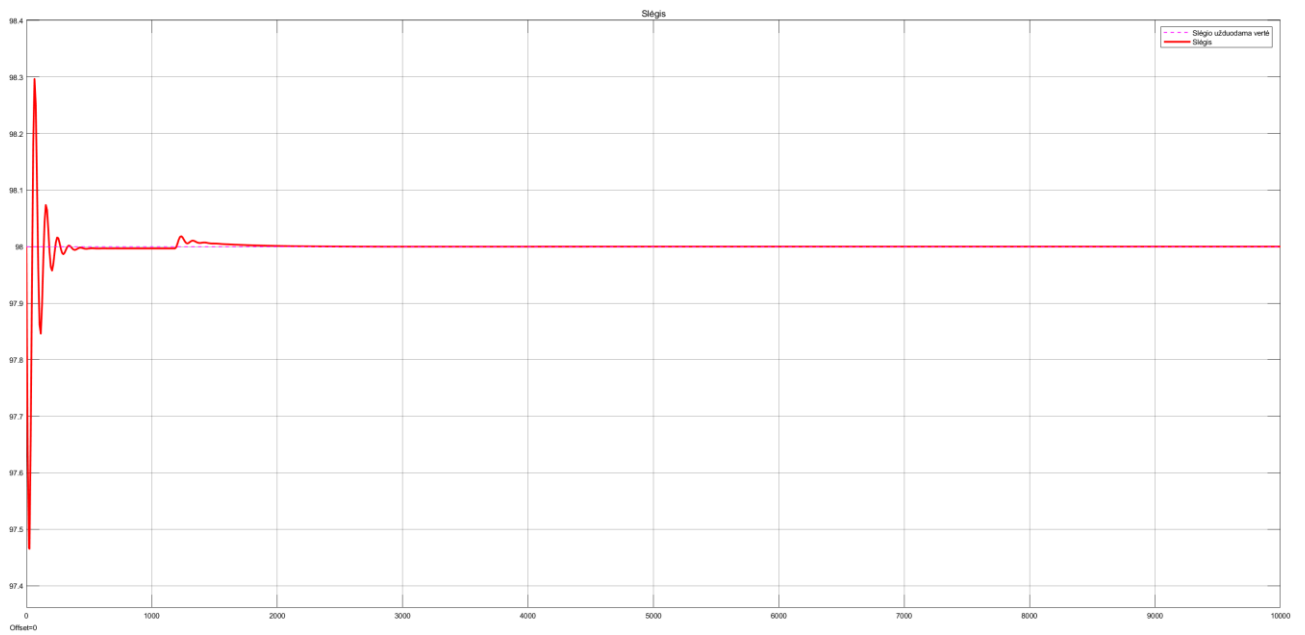
Esant tokiam sistemos valdymui (tinklo darbo režimas), trikdys yra garo srauto pasikeitimas, o toks sistemos valdymas sumodeliuotas „Valdymo modulis -2“ bloke (21 pav.).

Šiame imitatoriuje yra galimybė nesudėtingai keisti valdymo būdus, tad į *Constant* elementą esantį šalia *Switch* elemento (17pav.) įrašius 0 sistemos slėgis valdomas keičiant šilumos kiekį.

34 paveiksle pateikiamas lygio, o 35 paveiksle slėgio kitimo grafikas jau suderintos sistemos, kai garo srautas lygus 19 kg/s, lygio užduota vertė 55 %, o slėgio 98 bar.

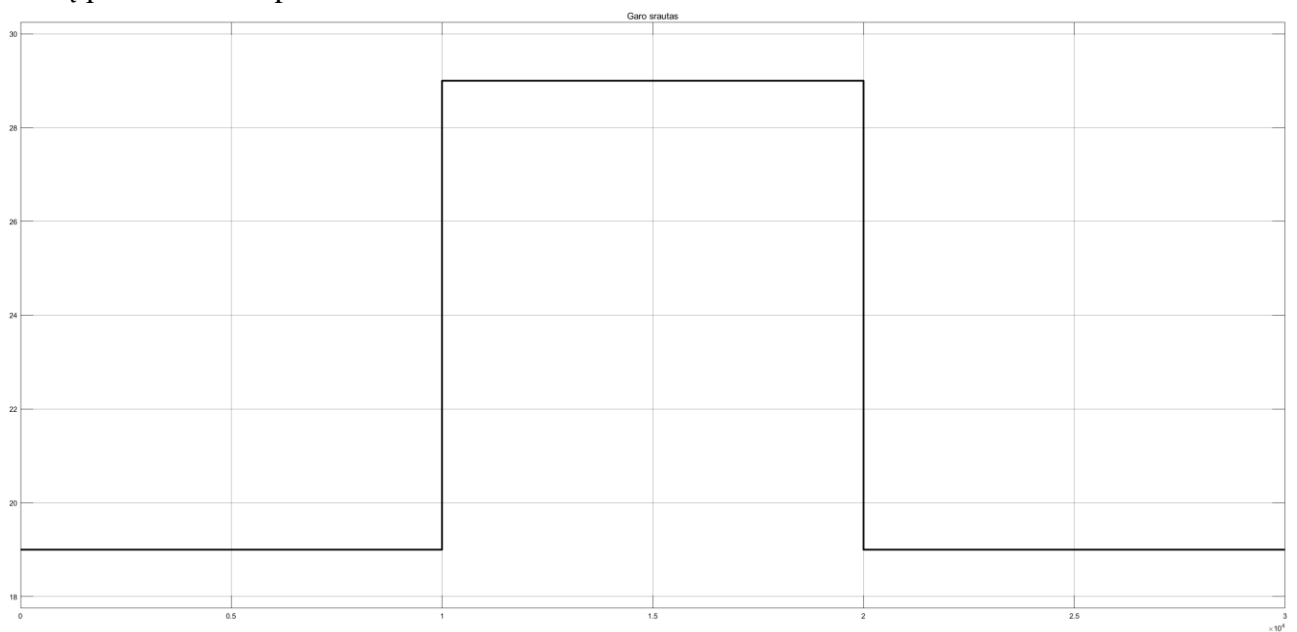


34 pav. Suderintos sistemos lygio kitimo grafikas. x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – lygis %

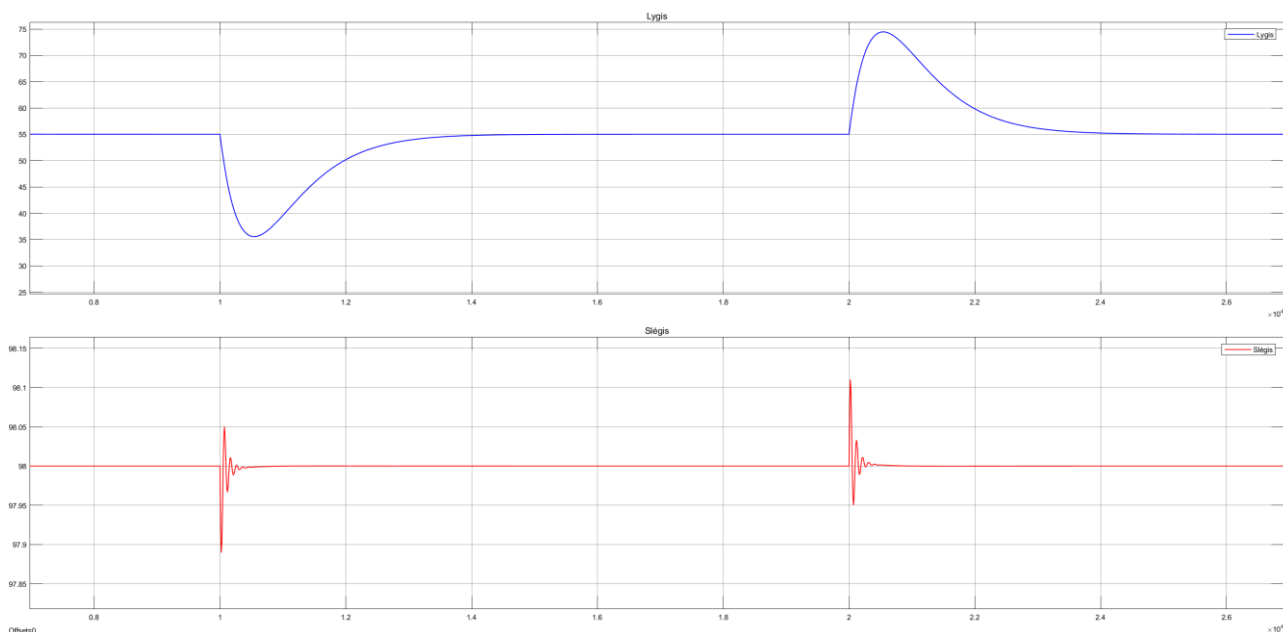


35 pav. Suderintos sistemos slėgio kitimo grafikas. x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – slėgis bar.

Patikrinti sistemos reakcijai, buvo įvestas trikdys (garo kiekio pokytis) (36 pav.). Sistemos reakcija į trikdį pateikiama 37 paveiksle.



36 pav. Sistemos trikdys (garo srauto pokytis). x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – šilumos kiekis kg/s

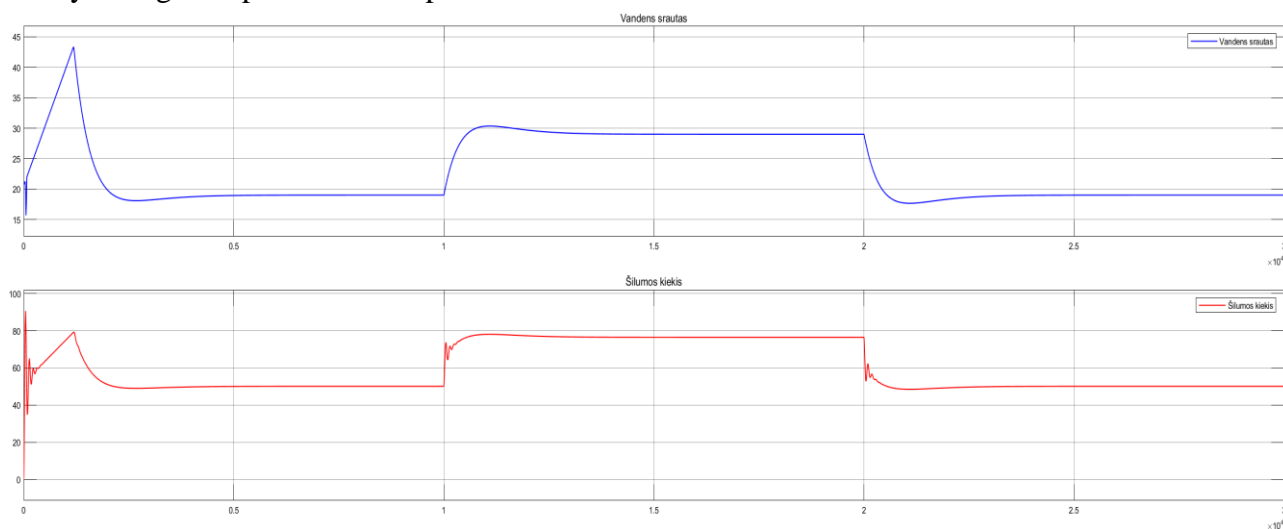


37 pav. Lygio ir slėgio kitimo grafikai, kai įvedamas trikdys (viršuje lygis, apačioje slėgis). x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – atitinkamai slėgis bar, lygis %.

Lygio perreguliavimas suveikus pirmam trikdžiui (garo srautui padidėjus) laiko momentu $t=10000$ s siekia 35,45 %, nusistovėjusios statinės paklaidos nėra, o nusistovėjimo laikas 4000 s. Suveikus antram trikdžiui (garo srautui sumažėjus) laiko momentu $t=20000$ s perreguliavimas siekia 35,54 %, statinės paklaidos nėra, o nusistovėjimo laikas lygus 4000 s. Regulatoriaus parametrai: $K_p=0,375$, $T_i=0,00035$.

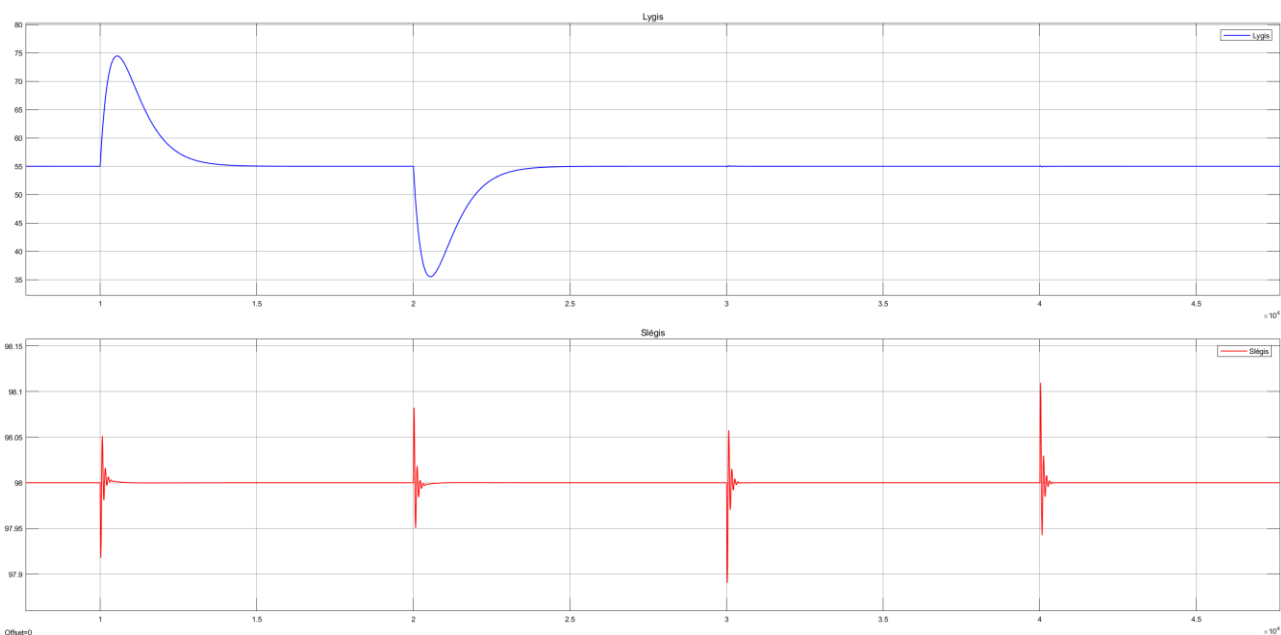
Slėgio perreguliavimas laiko momentu $t=10000$ s siekia 0,102 %, nusistovėjusios statinės paklaidos nėra, o nusistovėjimo laikas 400 s. Suveikus antram trikdžiui laiko momentu $t=20000$ s perreguliavimas ir nusistovėjimo laikas yra tokie patys kaip suveikus trikdžiui $t=10000$ s. Statinės paklaidos taip pat nėra. Regulatoriaus parametrai: $K_p=1,35$, $T_i=7$, $T_d=1$.

Valdymo signalai pateikiami 38 paveiksle.

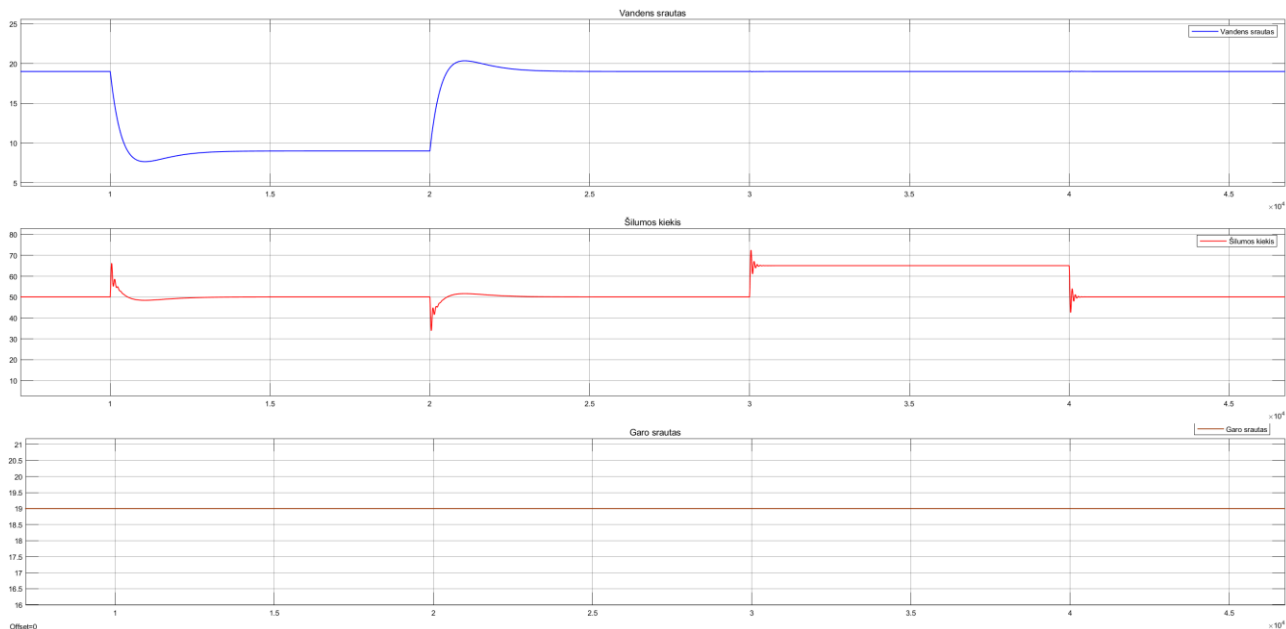


38 pav. Valdymo signalai (viršuje vandens srautas, apačioje šilumos kiekis). x ašis – laikas sekundėmis, y ašis- atitinkamai srautui kg/s, šilumos kiekiui MW

Siekiant patikrinti tokios sistemos reakciją (kai slėgis valdomas keičiant šilumos kiekį) į išorinius trikdžius, buvo įvesti du papildomi trikdžiai: įtekančio vandens srauto bei šilumos kiekio padidėjimas/sumažėjimas. Sistemos reakcija į tokius trikdžius pateikiama 39 paveiksle, 40 paveiksle pateikiamas valdymo signalų bei garo srauto kitimo grafikas.



39 pav. Sistemos reakcija į išorinius srautų pokyčius (viršuje lygis, apačioje slėgis). x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – atitinkamai slėgis bar, lygis %.

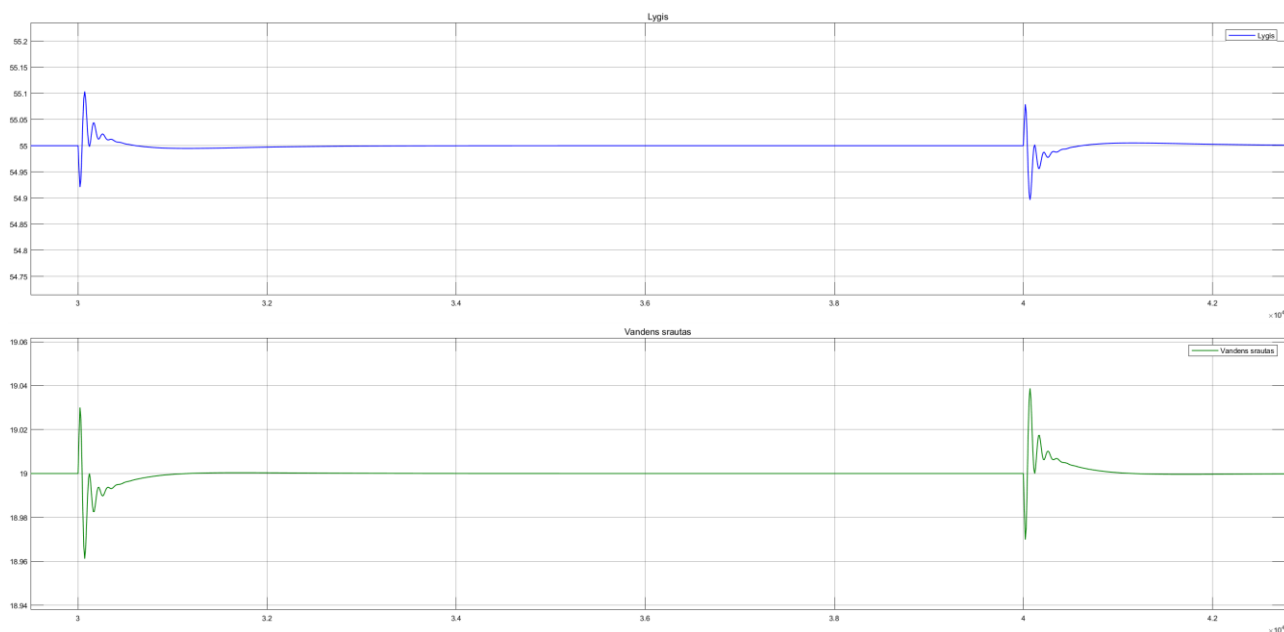


40 pav. Valdymo signalų bei garo srauto kitimo grafikas (viršuje vandens srautas, viduryje šilumos kiekis, apačioje garo srautas). x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – atitinkamai srautai kg/s, šilumos kiekis MW.

39 ir 40 paveiksluose matyti, kad laiko momentu $t=10000$ s (kai staiga padidėjo vandens srautas) vandens lygis taip pat padidėjo (perreguliavimas – 36,363 %, nusistovėjimo laikas – 4000 s), o slėgis sumažėjo (perreguliavimas – 0,1428 %, nusistovėjimo laikas – 400 s). Laiko momentu $t=20000$ s staiga sumažėjus vandens srautui lygio vertė krito (perreguliavimas ir nusistovėjimo laikas tokie patys

kaip ir srautui padidėjus), o slėgis trumpam šiek tiek išaugo (perreguliavo bei nusistovėjimo vertės tokios pat kaip ir srautui padidėjus).

Šilumos kiekio pokytis labiau veikia slėgį nei lygį. 39 paveiksle, kai $t=30000$ s ir $t=40000$ s nesimato lygio pokyčio taip pat kaip nesimato ir lygio valdymo signalo pokyčio 40 paveiksle. Tik priartinus (41 pav.) galima matyti jog valdymo signalas bei lygis šiek tiek keičiasi. Lygio perreguliavimas lygus 0,3636 %, o nusistovėjimo laikas 500 s. Šilumos kiekiui sumažėjus lygio vertė sumažėja, slėgis taip pat sumažėja (perreguliavimas = 0,153 %, nusistovėjimo laikas = 400 s). Šilumos kiekiui padidėjus, padidėja tiek lygio, tiek slėgio vertės. Abiejų dydžių perreguliavimai ir nusistovėjimo laikas tokie patys kaip šilumos kiekiui sumažėjus.



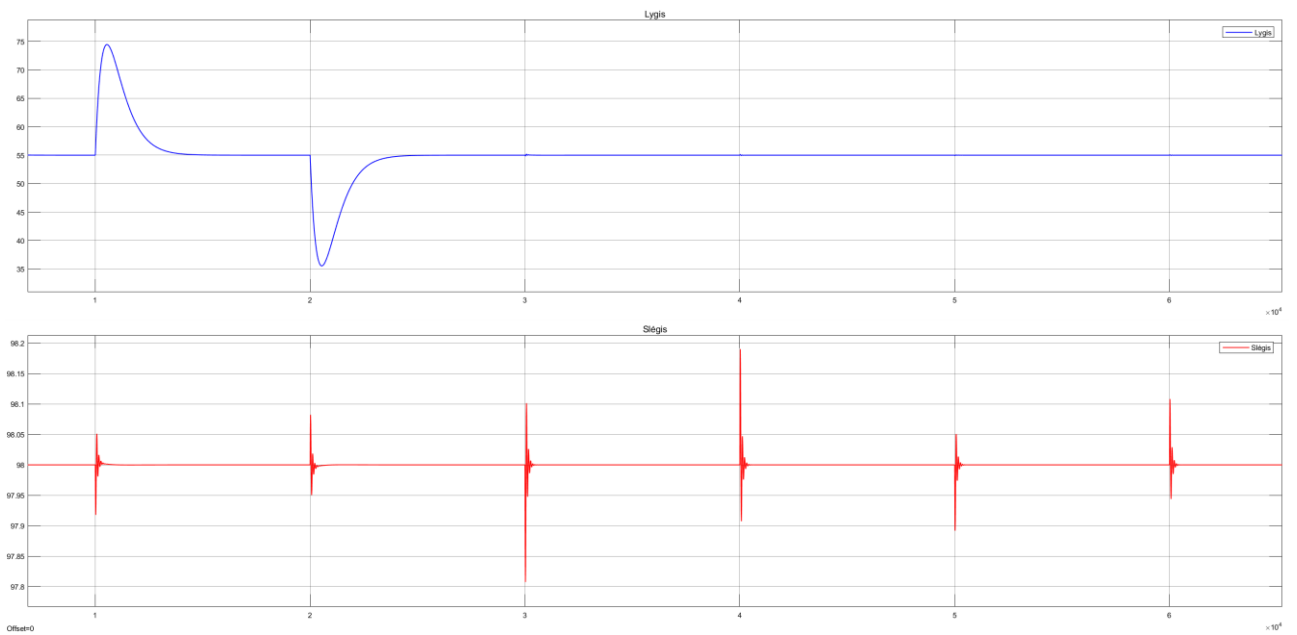
41- pav. Lygio bei valdančiojo signalo (įtekančio vandens) kitimo grafikas (viršuje lygis, apačioje vandens srautas). x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – atitinkamai srautai kg/s, lygis %

Tokiai valdymo opcijai buvo išbandytas dviejų elementų valdymas.

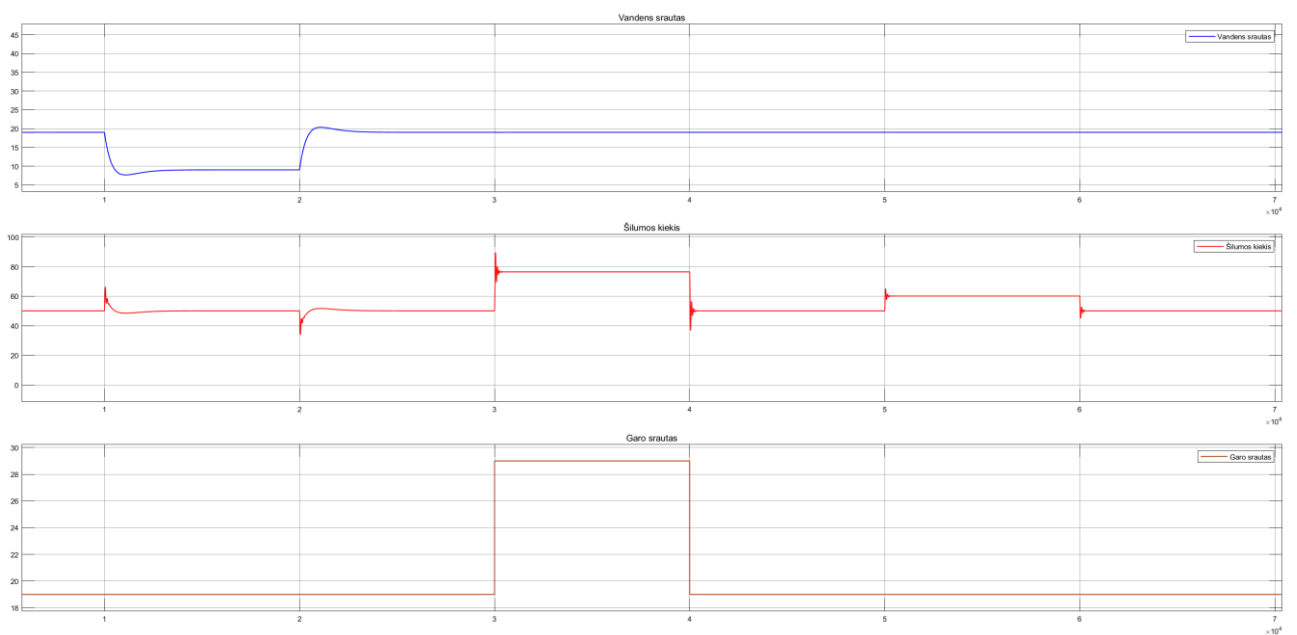
Dviejų elementų valdymui patikrinti buvo įvesti tokie patys trikdžiai kaip ir sistemai, kurioje slėgis valdomas keičiant ištekančio garo srautą:

- Pirmas trikdys (vandens srauto kitimas): atsiranda laiko momentu $t=10000$ s (vandens srautas padidėja) ir dingsta, kai $t=20000$ s (srautas sumažėja);
- Antras trikdys (garo srauto kitimas): atsiranda kai $t=30000$ s (garo srautas padidėja) ir dingsta, kai $t=40000$ s (srautas sumažėja);
- Trečias trikdys (šilumos kiekio kitimas): atsiranda kai $t=50000$ s (šilumos kiekis sumažėja) ir dingsta, kai $t=60000$ s (šilumos kiekis padidėja).

Lygio ir slėgio kitimo grafikas pateiktas 42 paveiksle, o valdymo signalų kitimo grafikas 43 paveiksle. Bandymai buvo atlikti nekeičiant reguliatorių parametrų, *Gain* elemento vertė lygi -1.

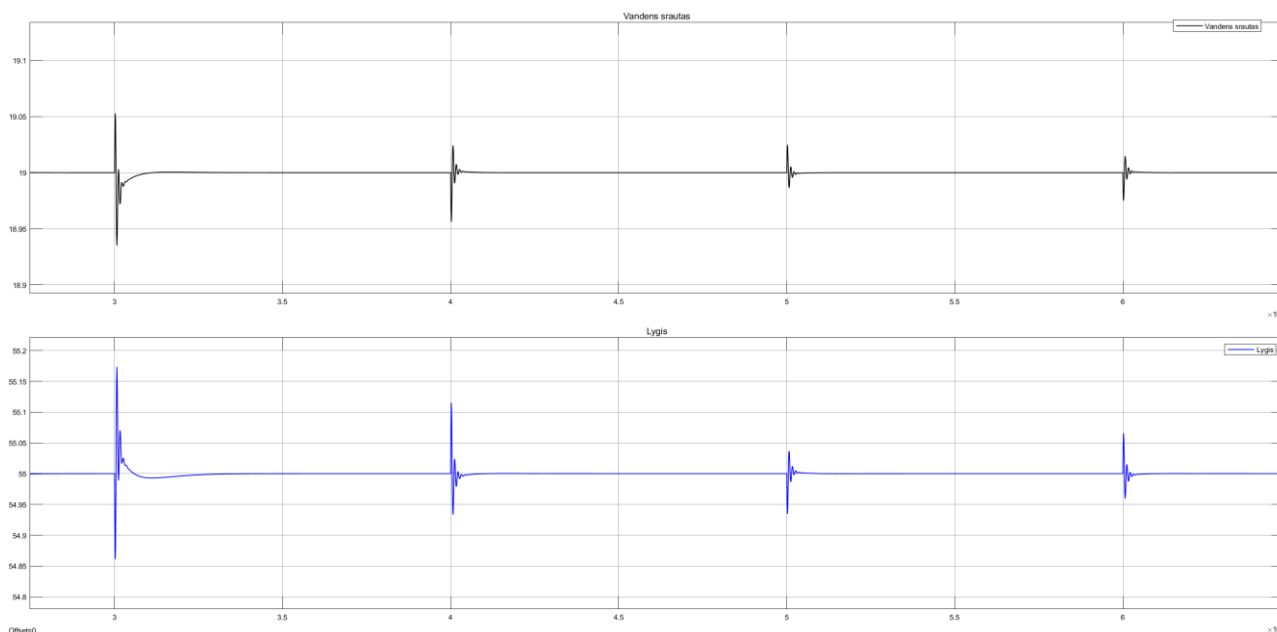


42 pav. Sistemos reakcija į trikdžius (viršuje lygis, apačioje slėgis). x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – atitinkamai slėgis bar, lygis %.



43 pav. Valdymo signalai (viršuje vandens srautas, viduryje šilumos kiekis, apačioje garo kiekis). x ašis – laikas sekundėmis, y ašis- atitinkamai srautams kg/s, šilumos kiekiui MW

Kadangi iš 42 bei 43 paveikslų negalime aiškiai matyti lygio bei jo valdančiojo signalo pokyčių, 44 paveiksle pateikiamas aiškesnis lygio bei įtekančio vandens srauto kitimo grafikas.



44 pav. Lygio bei valdančiojo signalo (įtekančio vandens) kitimo grafikas (viršuje vandens srautas, apačioje lygis). x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – atitinkamai srautai kg/s, lygis %

Iš 42, 43 ir 44 paveikslų matyti, kad:

- Veikiant pirmam trikdžiui (įtekančio vandens srauto kitimas) lygio perreguliavimas yra 35,454 %, o nusistovėjimo trukmė 4000 s. Slėgio perreguliavimas lygus 0,51 %, nusistovėjimo trukmė 300 s. Abu matavimai neturi statinės paklaidos. Labiausiai kinta lygio valdymo signalas (valdymo signalas sumažėja), šilumos kiekis trikdžio pradžioje ir pabaigoje atitinkamai trumpam padidėja/sumažėja, garo srautas išlieka pastovus;
- Veikiant antram trikdžiui (ištekančio srauto kitimas) lygio perreguliavimas yra 0,5454 %, o nusistovėjimo trukmė 200 s. Slėgio perreguliavimas lygus 0,306 %, nusistovėjimo trukmė 300 s. Abu matavimai neturi statinės paklaidos. Įtekančio vandens srautas minimaliai padidėja trikdžio pradžioje ir minimaliai sumažėja, kai trikdys baigiasi. Garo srauto vertė padidėja priklausomai nuo trikdžio vertės. Šilumos kiekis trikdžio pradžioje padidėja ir sumažėja, kai trikdys dingsta;
- Suveikus trečiajam trikdžiui (šilumos kiekio pokytis) lygio perreguliavimas yra lygus 0,1818 %, nusistovėjimo laikas 300 s. Slėgio perreguliavimas lygus 0,204 %, o nusistovėjimo laikas 300 s. Įtekėjimo srautas trikdžio pradžioje ir pabaigoje atitinkamai padidėja ir sumažėja, šilumos kiekis tik trikdžio pradžioje trumpam sumažėja, o pabaigoje trumpam padidėja, garo srautas išlieka pastovus.

6.2.4.3. Valdymo opcijų apibendrinimas

Šis garo katilo vandens lygio imitacinis matematinis modelis turi dvi valdymo opcijas: valdymas, kai slėgis valdomas keičiant garo srautą (toliau „Valdymo elementas – 1“) ir valdymas, kai slėgis valdomas keičiant šilumos kiekį (toliau Valdymo elementas - 2). Žemiau esančiose lentelėse apibendrinami abiem atvejais gauti rezultatai.

5 lentelė. Lygio valdymo rezultatai naudojant abi valdymo opcijas

Trikdys (valdymas)	Perreguliavimas (%)	Nusistovėjimo laikas (s)	Statinė paklaida
Šilumos kiekio pokytis (1 el. valdymas)	Valdymo elementas – 1 = 34,72 Valdymo elementas – 2 = 0,3636	Valdymo elementas – 1 = 3000 Valdymo elementas – 2 = 500	Valdymo elementas – 1 = 0 Valdymo elementas – 2 = 0
Garso srauto pokytis (1 el. valdymas)	Valdymo elementas – 1 = 2,72 Valdymo elementas – 2 = 35,45	Valdymo elementas – 1 = 2000 Valdymo elementas – 2 = 4000	Valdymo elementas – 1 = 0 Valdymo elementas – 2 = 0
Vandens srauto pokytis (1 el. valdymas)	Valdymo elementas – 1 = 60,91 Valdymo elementas – 2 = 36,36	Valdymo elementas – 1 = 2500 Valdymo elementas – 2 = 4000	Valdymo elementas – 1 = 0 Valdymo elementas – 2 = 0
Šilumos kiekio pokytis (2 el. valdymas)	Valdymo elementas – 1 = 35,54 Valdymo elementas – 2 = 0,1818	Valdymo elementas – 1 = 3000 Valdymo elementas – 2 = 300	Valdymo elementas – 1 = 0 Valdymo elementas – 2 = 0
Garso srauto pokytis (2 el. valdymas)	Valdymo elementas – 1 = 60,91 Valdymo elementas – 2 = 0,5454	Valdymo elementas – 1 = 3000 Valdymo elementas – 2 = 200	Valdymo elementas – 1 = 0 Valdymo elementas – 2 = 0
Vandens srauto pokytis (2 el. valdymas)	Valdymo elementas – 1 = 60,91 Valdymo elementas – 2 = 35,45	Valdymo elementas – 1 = 3000 Valdymo elementas – 2 = 4000	Valdymo elementas – 1 = 0 Valdymo elementas – 2 = 0

6 lentelė. Slėgio valdymo rezultatai naudojant abi valdymo opcijas

Trikdys (valdymas)	Perreguliavimas (%)	Nusistovėjimo laikas (s)	Statinė paklaida
Šilumos kiekio pokytis (1 el. valdymas)	Valdymo elementas – 1 = 0,112 Valdymo elementas – 2 = 0,153	Valdymo elementas – 1 = 3000 Valdymo elementas – 2 = 400	Valdymo elementas – 1 = 0 Valdymo elementas – 2 = 0
Garso srauto pokytis (1 el. valdymas)	Valdymo elementas – 1 = 0,10 Valdymo elementas – 2 = 0,102	Valdymo elementas – 1 = 2000 Valdymo elementas – 2 = 400	Valdymo elementas – 1 = 0 Valdymo elementas – 2 = 0
Vandens srauto pokytis (1 el. valdymas)	Valdymo elementas – 1 = 0,102 Valdymo elementas – 2 = 0,1428	Valdymo elementas – 1 = 1500 Valdymo elementas – 2 = 400	Valdymo elementas – 1 = 0 Valdymo elementas – 2 = 0
Šilumos kiekio pokytis (2 el. valdymas)	Valdymo elementas – 1 = 0,1122 Valdymo elementas – 2 = 0,204	Valdymo elementas – 1 = 1000 Valdymo elementas – 2 = 300	Valdymo elementas – 1 = 0 Valdymo elementas – 2 = 0
Garso srauto pokytis (2 el. valdymas)	Valdymo elementas – 1 = 0,102 Valdymo elementas – 2 = 0,306	Valdymo elementas – 1 = 3000 Valdymo elementas – 2 = 300	Valdymo elementas – 1 = 0 Valdymo elementas – 2 = 0
Vandens srauto pokytis (2 el. valdymas)	Valdymo elementas – 1 = 0,102 Valdymo elementas – 2 = 0,51	Valdymo elementas – 1 = 3000 Valdymo elementas – 2 = 300	Valdymo elementas – 1 = 0 Valdymo elementas – 2 = 0

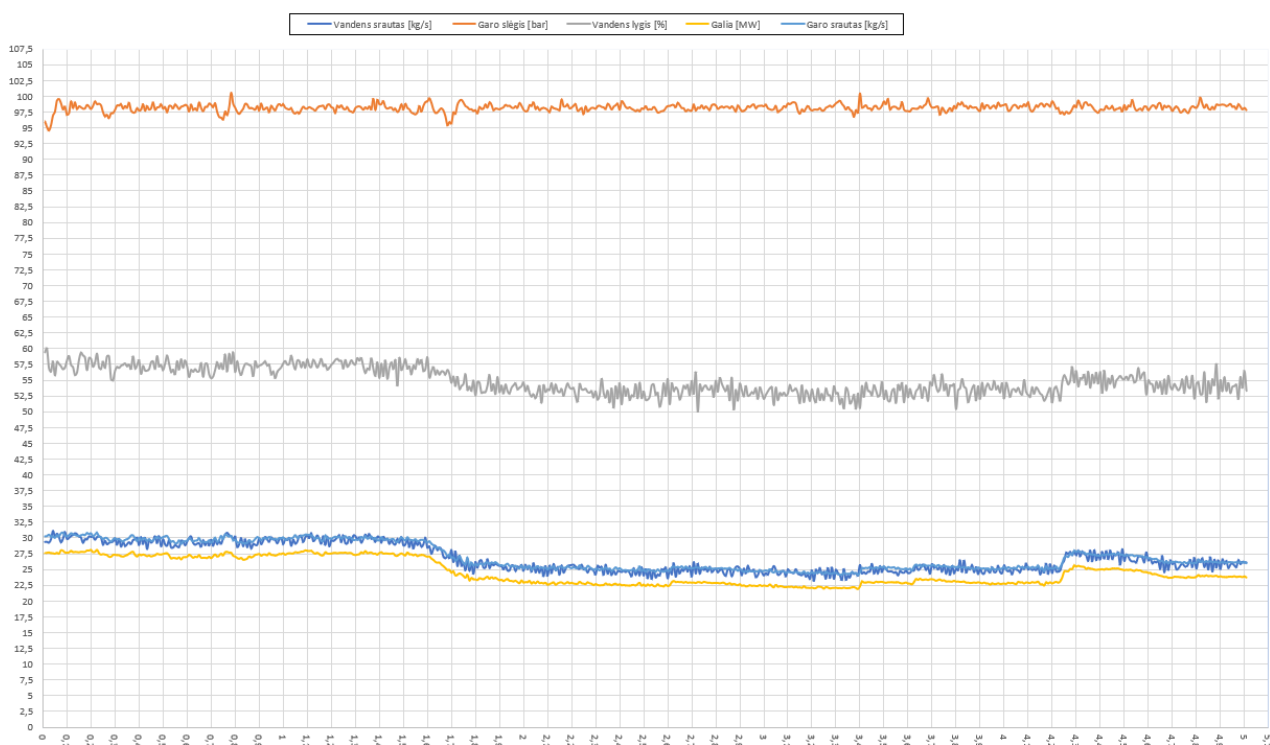
Iš 5 ir 6 lentelių matyti, kad:

1. Nusistovėjimo laikai sistemoje naudojant „Valdymo elementas - 2“ yra mažesni negu naudojant „Valdymo elementą - 1“, o tai reiškia, kad procesas nusistovi greičiau.
2. Sistemos su „Valdymo elementas - 2“ maksimalus perreguliavimas lygus 36,36 %, o „Valdymo elemento - 1“ lygus 60,91 % (1,675 karto didesnis). Maksimalus nusistovėjimo laikas yra vienodas, tačiau dažniausiai „Valdymo elemento – 2“ laikas yra geresnis.
3. Dviejų elementų valdymas geriausiai veikia sistemoje su „Valdymo elementu - 2“, nes rezultatai rodo, kad perreguliavimas bei nusistovėjimo laikas yra mažesni, nei sistemą valdant vienu elementu.
4. Negalima lengvabūdiškai įvesti papildomą dedamąją (dviejų elementų valdymą). Įvedus naują dedamąją reikia atitinkamai perderinti reguliatorius. Kadangi eksperimentų metu reguliatoriai nebuvo perderinti, todėl rezultatai buvo geresni „Valdymo elemento - 2“. Jeigu reguliatoriai sistemoje su „Valdymo elementu - 1“ būtų perderinti, tai greičiausiai rezultatai būtų geresni nei naudojant vieno elemento valdymą. Tačiau šiuo atveju, dviejų elementų valdymo įvedimas pablogino sistemos valdymą.

7. Modelio verifikavimas

7.1. Elektrinės duomenys

Modeliuojant svarbu ir modelio tikslumas todėl tiriamajame darbe šis imitacinis matematinis modelis buvo verifikuotas realiaus objekto duomenimis. 45 paveiksliuke (didesnės raiškos grafikas pateikiamas 2 priede) pateikti duomenys yra iš naujai statomos bio-kuro elektrinės Italijoje, Sardinijos saloje. Ši elektrinė generuoja iki 30 MW elektros energijos.



45 pav. Elektrinės duomenys. x ašis – laikas valandomis, y ašis – atitinkamai kiekvienam matavimui (galia [MW], srautai [kg/s], slėgis [bar], vandens lygis [%])

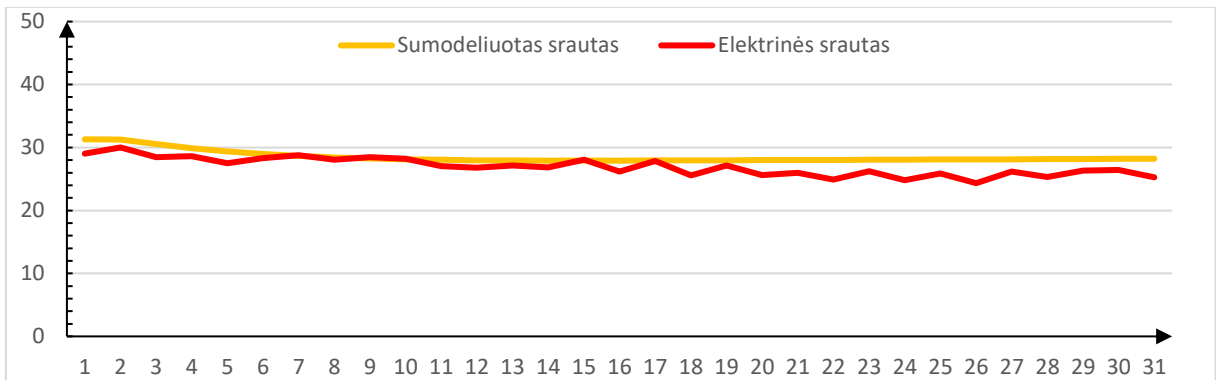
Remiantis elektrinės duomenimis (45 pav.) matome, kad vandens lygis tinkamai valdomas, keičiantis apkrovai perreguliuojamas neatrodo didelis, slėgis keičiantis šilumos kiekiui išlieka pastovus (taip pat perreguliuojamas nedidelis), garo bei vandens srautai galiai mažėjant taip pat mažėja, galiai didėjant jie taip pat didėja.

7.2. Modelio verifikavimas remiantis elektrinės duomenimis

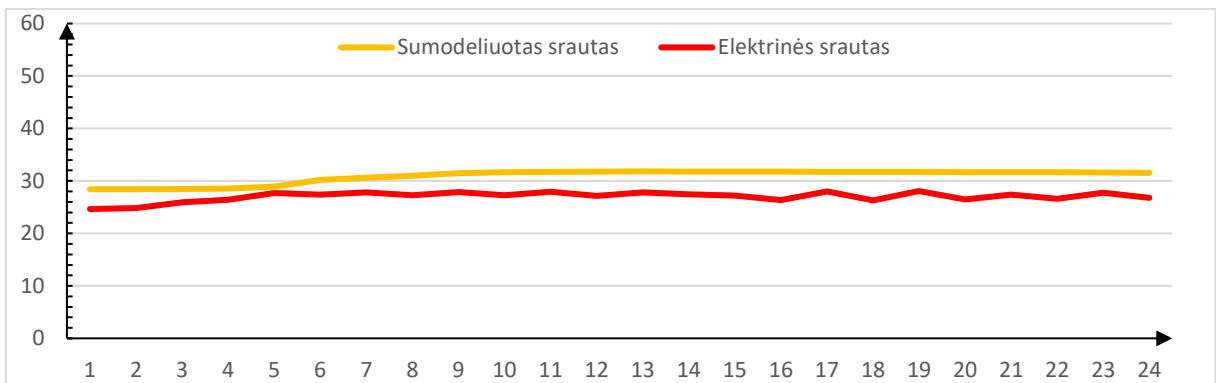
6.2.4 skyriuje sistema buvo modeliuojama remiantis būtent šios elektrinės parametrais todėl užduodamos vertės buvo parinktos remiantis realiais duomenimis. 45 paveiksle galia, kuri pateikta MW yra elektros galia. Mūsų skaičiavimuose yra reikalingas šilumos kiekis, kuris suteikiamas garo katilui, o jis visada yra 2-3 kartus didesnis už elektros galią todėl elektros galia verifikavimui bus padidinta 3 kartus.

Iš 45 paveikslo matyti, kad galios vidutinė vertė yra ~27,5 MW todėl mes skaičiavimuose naudosime 82,5 MW, garo bei vandens srautų vertės yra ~30 kg/s, slėgis ~98 bar, o lygis ~55%. Verifikavimui

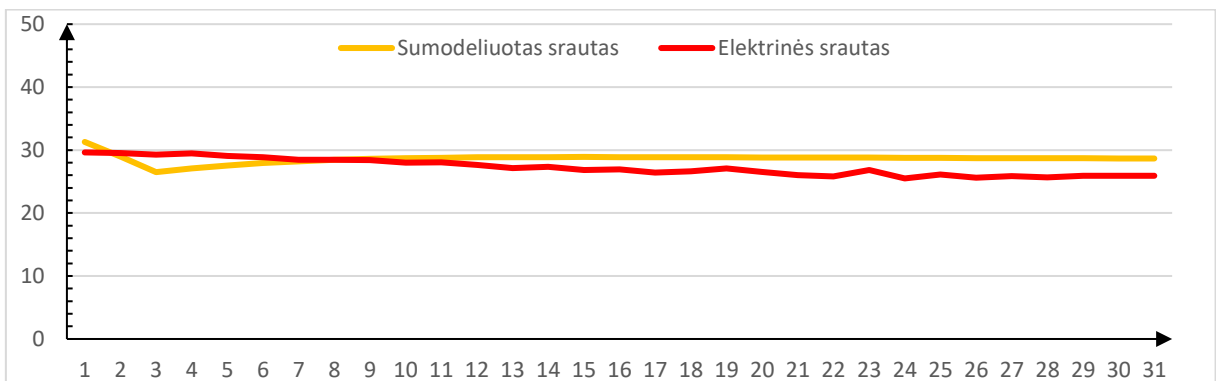
buvo naudojamas „Valdymo elementas - 1“, nes šiuo atveju mūsų sistemos trikdys yra galios (šilumos) pokytis. 46 - 53 paveiksluose pateikiami imitatoriaus ir elektrinės srautai, lygio bei slėgio grafikai, kai šilumos kiekis sumažėja ir padidėja.



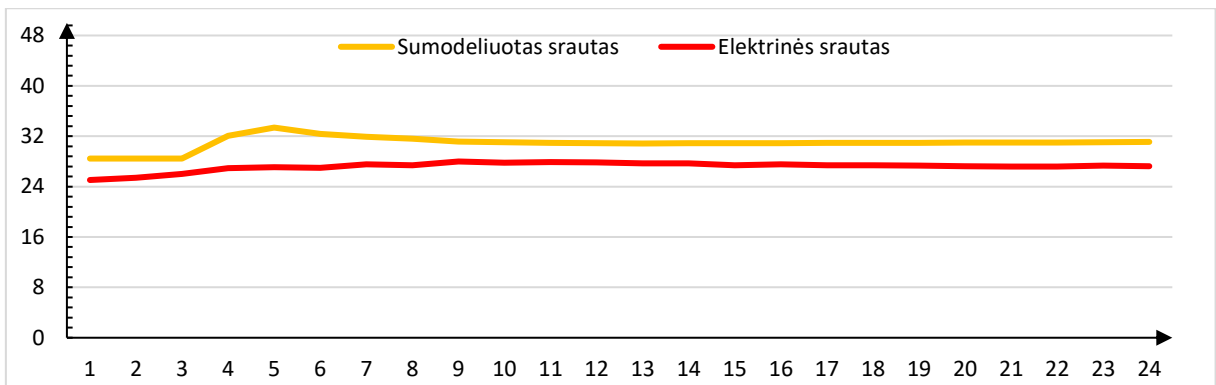
46 pav. Įtekančio vandens srautai, kai šilumos kiekis sumažėja. x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – srautai kg/s.



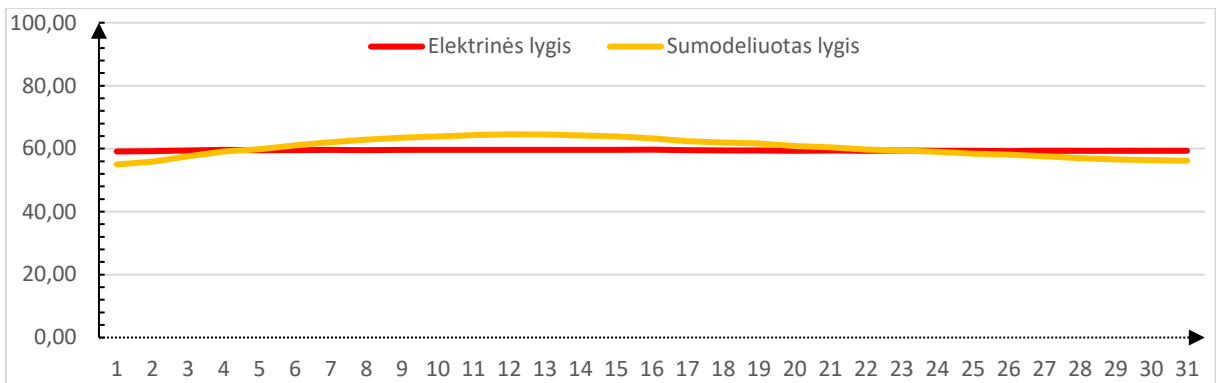
47 pav. Įtekančio vandens srautai, kai šilumos kiekis padidėja. x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – srautai kg/s



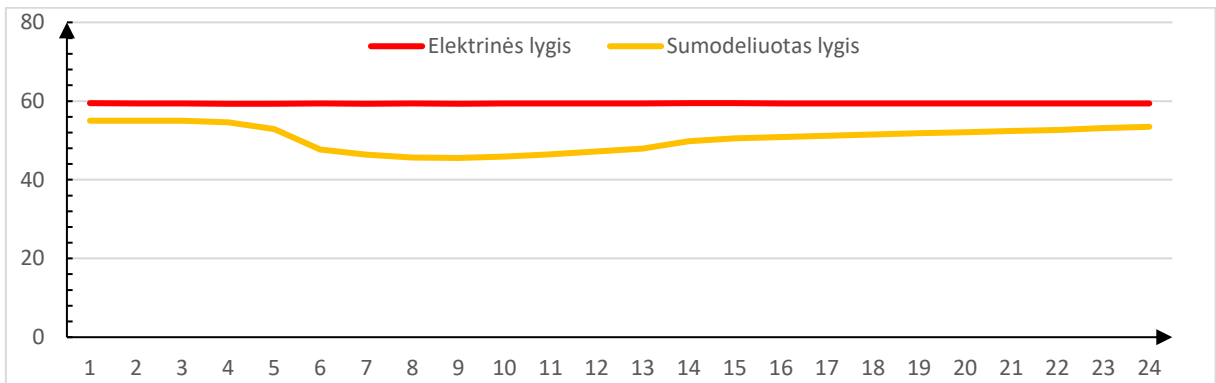
48 pav. Garo srautai, kai šilumos kiekis sumažėja. x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – srautai kg/s



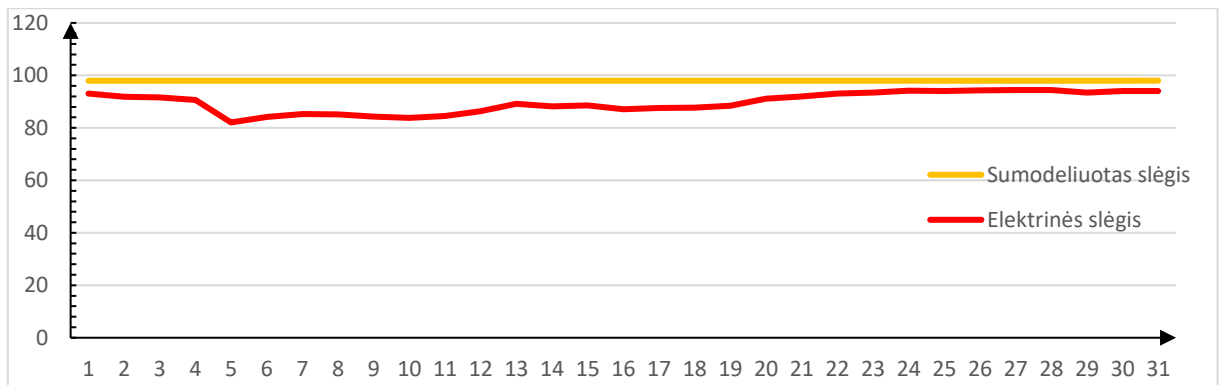
49 pav. Garo srautai, kai šilumos kiekis padidėja. x ašis – laikas sekundėmis, y ašis – srautai kg/s



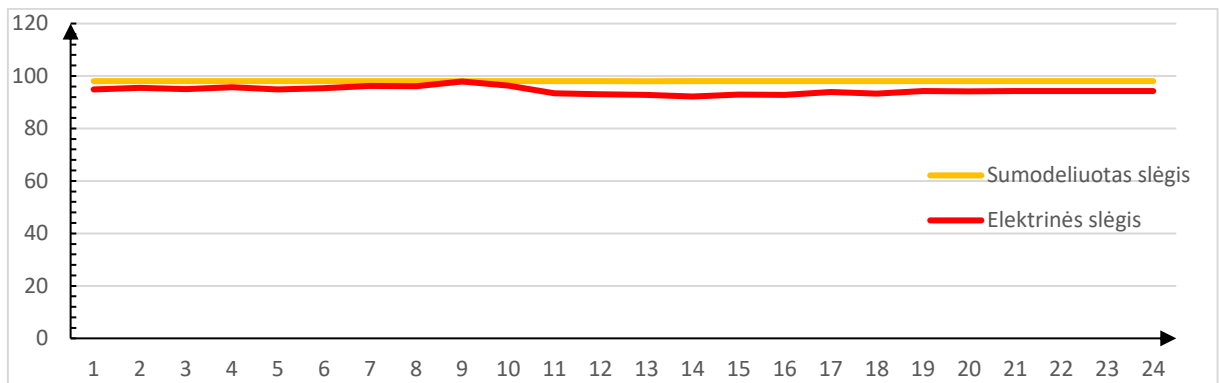
50 pav. Vandens lygiai, kai šilumos kiekis sumažėja. x ašis – laikas sekundėmis, y ašis (kairėje sumodeliuotam, o dešinėje elektrinės) – lygis %



51 pav. Vandens lygiai, kai šilumos kiekis padidėja. x ašis – laikas sekundėmis, y ašis (kairėje sumodeliuotam, o dešinėje elektrinės) – lygis %



52 pav. Garo slėgiai, kai šilumos kiekis sumažėja. x ašis – laikas sekundėmis, y ašis (kairėje sumodeliuotam, o dešinėje elektrinės) – slėgis bar



53 pav. Garo slėgiai, kai šilumos kiekis padidėja. x ašis – laikas sekundėmis, y ašis (kairėje sumodeliuotam, o dešinėje elektrinės) – slėgis bar

Iš 46 - 53 paveikslų matyti, kad:

- Tiek imitatoriuje, tiek elektrinėje vandens srautas mažėja, kai šilumos kiekis mažėja (46 pav.) ir atvirkščiai, srautai didėja, kai šilumos kiekis didėja (47 pav.). Vidutinė srautų paklaida, kai srautai mažėja yra 5,97 %, kai didėja 14,42 %;
- Garo srautų grafikai atrodo panašiai kaip vandens: mažėja, kai šilumos kiekis sumažėja (48 pav.) ir padidėja, kai šilumos kiekis padidėja (49 pav.). Vidutinė srautų paklaida, kai srautai mažėja yra 7,23 %, o kai didėja 13,73 %;
- Vandens lygio reakcija tiek imitatoriuje, tiek elektrinėje yra panaši kintant šilumos kiekiui. Šilumos kiekiui sumažėjus (50 pav.) vidutinė lygių paklaida yra 4,1 %, o šilumos kiekiui padidėjus (51 pav.) – 17,8 %;
- Slėgio kitimas tiek imitatoriuje, tiek elektrinėje taip pat panašūs. Šilumos kiekiui sumažėjus (52 pav.) vidutinė lygių paklaida yra 9,38 %, o šilumos kiekiui padidėjus (53 pav.) – 3,74 %.

Resultatai ir išvados

1. Išanalizuota garo katilo dinamika bei apžvelgti pagrindiniai procesai vykstantys garo katile.
2. Apžvelgti garo katilo vandens lygio valdymo būdai bei galimi šiluminės elektrinės darbo režimai. Du iš trijų valdymo būdų buvo sumodeliuoti imitaciniame matematiname modelyje.
3. Sumodeliuotas ir išbandytas garo katilo vandens lygio būgne režimų imitacinis matematinis modelis. Buvo sukurti du modeliai – vienas supaprastintas, o kitas išplėstinis. Pastarajame įvertinamas garo ir vandens pasiskirstymas katile, vandens bangavimas bei pakylančių ir nusileidžiančių vamzdžių cirkuliacija. Pateikti du valdymo būdai: sistemos valdymas, kai slėgis valdomas keičiant garo srautą ir, kai slėgis valdomas keičiant šilumos kiekį. Abi sistemos buvo iširtos, gauti rezultatai, kai sistemą veikia trys skirtingi trikdžiai. Geriausi rezultatai buvo gauti su sistema, kurioje slėgis valdomas keičiant šilumos kiekį.
4. Sumodeliuotas vieno ir dviejų elementų valdymas garo katilo vandens lygio būgne režimų imitaciniame matematiname modelyje. Dviejų elementų valdymas geriausiai veikė sistemoje, kai slėgis valdomas keičiant šilumos kiekį, nes rezultatai rodo, kad perreguliuojimas bei nusistovėjimo laikas yra mažesni, nei sistemą valdant vienu elementu. Negalima lengvabūdiškai įvesti papildomą dedamąją (dviejų elementų valdymą). Įvedus naują dedamąją reikia atitinkamai perderinti ir reguliatorius. Kadangi eksperimentų metu reguliatoriai nebuvo perderinti, todėl rezultatai buvo geresni, kai slėgis valdomas keičiant šilumos kiekį. Jeigu reguliatoriai sistemoje, kai slėgis valdomas keičiant garo srautą būtų perderinti, tai greičiausiai rezultatai būtų geresni nei naudojant vieno elemento valdymą. Šiuo atveju, dviejų elementų valdymo įvedimas pablogino sistemos valdymą.
5. Sukurtas garo katilo vandens lygio būgne režimų imitacinis matematinis modelis buvo verifikuotas remiantis realiais elektrinės duomenimis. Atlikti bandymai parodė, kad vandens srauto didžiausia paklaida yra 14,42 %, garo srauto 13,73 %, būgno slėgio 9,38 %, o vandens lygio 17,8 %. Remiantis rezultatais galima teigti, kad garo katilo vandens lygio būgne režimų imitacinis matematinis modelis yra adekvatus ir jį rekomenduojama taikyti procesų operatoriams tiriant įvairius valdymo režimus, efektyvumą ir derinant valdymo sistemą.

Literatūros sąrašas

1. Liptak, Bela G., ed. „Instrument Engineers' Handbook - Vol. 2 - Process Control and Optimization“. CRC press. p.1572-1603, 2005.
2. „Boiler Drum Level Control“. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2018-06-11] prieiga per internetą: <https://www.eurotherm.com/boiler-drum-level-control>
3. „Garo katilas“ [Interaktyvus] [Žiūrėta 2018-06-12] prieiga per internetą: https://lt.wikipedia.org/wiki/Garo_katilas
4. „Operation modes of Alternator or generator – Grid mode & Island mode“ [Interaktyvus] [žiūrėta 2018-06-11] prieiga per internetą: <http://eblogbd.com/operation-modes-power-generation-station-power-plant/>
5. Ken Heselton „Boiler Operator's Handbook“. [interaktyvus] [žiūrėta 2018-06-11] prieiga per internetą: <https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id=58a5d48996b7e4aecb770a22&assetKey=AS%3A462428090703873%401487262856851>
6. Sreepadha Chandrasekharan , Rames Chandra Panda and Bhuvanewari Natrajan Swaminathan „Dynamic analysis of the boiler drum of a coal-fired thermal power plant“ [interaktyvus] [žiūrėta 2018-06-05] prieiga per internetą: <http://journals.sagepub.com.ezproxy.ktu.edu/doi/abs/10.1177/0037549717703465>
7. Ramezan Ali Naghizadeh, Behrooz Vahidi and Mohammad Reza Bank Tavakoli „Estimating the Parameters of Dynamic Model of Drum Type Boilers Using Heat Balance Data as an Educational Procedure“. [interaktyvus] [žiūrėta 2018-06-06] prieiga per internetą: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S0360544217303237?via%3Dihub>
8. P.U. Sunil, Jayesh Barve, P.S.V. Nataraj „Mathematical modeling, simulation and validation of a boiler drum: Some investigations“. [interaktyvus] [žiūrėta 2018-06-07] prieiga per internetą: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S0360544217303237?via%3Dihub>
9. K.J. Astrom, R.D. Bell „Drum-boiler dynamics“. Automatica 36. 2000.
10. B. Rouben „Modes of Plant Operation“ [interaktyvus] [žiūrėta 2018-06-11] prieiga per internetą: http://www.nuceng.ca/ep6p3/modes_of_plant_operation.doc
11. „Feferalcorp“. Garo katilo būgno lygio palaikymo sistema [interaktyvus] [žiūrėta 2018-06-11]. prieiga per internetą <http://www.federalcorp.com/tech/drum%20level.pdf>
12. C.X. Lu, _ N.W. Rees, _ S.C. Donaldson „The use of the Astrom – Bell model for the design of the drum level controllers in power plant boilers“. Energy Australia, Sydney, NSW 2000, Australia. [žiūrėta 2019-04-11]

13. Bouskela, Daniel. "Multi-Mode Physical Modelling of a Drum Boiler." *Procedia Computer Science* 95 (2016): 516-23. Web. [interaktyvus] [žiūrėta 2018-04-01] prieiga per internetą: [https://vb.ktu.edu/primo-explore/fulldisplay?docid=TN_sciversesciencedirect_elsevierS1877-0509\(16\)32504-2&context=PC&vid=KTU&search_scope=KTU&tab=default_tab&lang=lt_LT](https://vb.ktu.edu/primo-explore/fulldisplay?docid=TN_sciversesciencedirect_elsevierS1877-0509(16)32504-2&context=PC&vid=KTU&search_scope=KTU&tab=default_tab&lang=lt_LT)
14. Cheres, E. "Small and Medium Size Drum Boiler Models Suitable for Long Term Dynamic Response." *IEEE Transactions on Energy Conversion* 5.4 (1990): 686-92. Web. [interaktyvus] [žiūrėta 2018-04-01] prieiga per internetą: https://vb.ktu.edu/primo-explore/fulldisplay?docid=TN_ieee_s63140&context=PC&vid=KTU&search_scope=KTU&tab=default_tab&lang=lt_LT
15. Flynn, M.E, and M.J O'Malley. "A Drum Boiler Model for Long Term Power System Dynamic Simulation." *IEEE Transactions on Power Systems* 14.1 (1999): 209-17. Web. [interaktyvus] [žiūrėta 2018-04-01] prieiga per internetą: https://vb.ktu.edu/primo-explore/fulldisplay?docid=TN_ieee_s744528&context=PC&vid=KTU&search_scope=KTU&tab=default_tab&lang=lt_LT
16. Koutb, M.A, N.M El-Rabaie, R.A Awad, and S.M Hewaidy. "Multivariable Fuzzy Control for a Non-linear Drum Boiler Process." *International Conference on Electrical, Electronic and Computer Engineering, 2004. ICEEC '04* (2004): 3-9. Web. [interaktyvus] [žiūrėta 2018-04-01] prieiga per internetą: https://vb.ktu.edu/primo-explore/fulldisplay?docid=TN_ieee_s1374365&context=PC&vid=KTU&search_scope=KTU&tab=default_tab&lang=lt_LT
17. Zhuo Xu-Sheng, Yang Fan, Qin Shi-Hong, and Zheng Sheng. "Series Cascade Control of Coal-fired Drum Boiler." *2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering* (2011): 2566-568. Web. [interaktyvus] [žiūrėta 2018-04-01] prieiga per internetą: https://vb.ktu.edu/primo-explore/fulldisplay?docid=TN_ieee_s5777463&context=PC&vid=KTU&search_scope=KTU&tab=default_tab&lang=lt_LT
18. Iacob, M., and G. Andreescu. "Drum-boiler Control System Employing Shrink and Swell Effect Remission in Thermal Power Plants." *2011 3rd International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)* (2011): 1-8. Web. [interaktyvus] [žiūrėta 2018-04-01] prieiga per internetą: https://vb.ktu.edu/primo-explore/fulldisplay?docid=TN_ieee_s6078871&context=PC&vid=KTU&search_scope=KTU&tab=default_tab&lang=lt_LT
19. Wang Zhuo, Wang Shichao, and Jiang Yanyan. "Simulation of Control of Water Level in Boiler Drum." *World Automation Congress 2012* (2012): 1-4. Web. [interaktyvus] [žiūrėta

- 2018-04-01] prieiga per internetą: https://vb.ktu.edu/primo-explore/fulldisplay?docid=TN_ieee_s6321824&context=PC&vid=KTU&search_scope=KTU&tab=default_tab&lang=lt_LT
20. Sunil, P. U, Jayesh J Barve, and P. S. V Nataraj. "Boiler Drum-level Control Using QFT." 2013 Nirma University International Conference on Engineering (NUiCONE) (2013): 1-6. Web. [interaktyvus] [žiūrėta 2018-04-01] prieiga per internetą: https://vb.ktu.edu/primo-explore/fulldisplay?docid=TN_ieee_s6780175&context=PC&vid=KTU&search_scope=KTU&tab=default_tab&lang=lt_LT
21. Halauca, Cristina, and Corneliu Lazar. "Dynamic Simulation Model for a Steam Drum Boiler System." 2009 European Control Conference (ECC) (2009): 3480-485. Web. [interaktyvus] [žiūrėta 2018-04-01] prieiga per internetą: https://vb.ktu.edu/primo-explore/fulldisplay?docid=TN_ieee_s7074938&context=PC&vid=KTU&search_scope=KTU&tab=default_tab&lang=lt_LT
22. Zhen Tian, Jingqi Yuan, and Liang Xu. "Modeling of Drum Boiler-turbine Unit and the Model-based Coordinated Control Strategy." 2016 35th Chinese Control Conference (CCC) 2016 (2016): 3327-332. Web. [interaktyvus] [žiūrėta 2018-04-01] prieiga per internetą: https://vb.ktu.edu/primo-explore/fulldisplay?docid=TN_ieee_s7553869&context=PC&vid=KTU&search_scope=KTU&tab=default_tab&lang=lt_LT
23. Le Wei, and Binbin Ma. "Application of Improved Gravitational Search Algorithm in PID Control for Boiler Drum Water Level." 2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC) (2017): 1852-857. Web. [interaktyvus] [žiūrėta 2018-04-01] prieiga per internetą: https://vb.ktu.edu/primo-explore/fulldisplay?docid=TN_ieee_s7978818&context=PC&vid=KTU&search_scope=KTU&tab=default_tab&lang=lt_LT
24. Wei, Le, and Peichen Xu. "Boiler Drum Water Level Control Based on Nonlinear Valve Characteristic Compensation." 2018 Chinese Control And Decision Conference (CCDC) (2018): 176-81. Web. [interaktyvus] [žiūrėta 2018-04-01] prieiga per internetą: https://vb.ktu.edu/primo-explore/fulldisplay?docid=TN_ieee_s8407126&context=PC&vid=KTU&search_scope=KTU&tab=default_tab&lang=lt_LT
25. Sunil, Barve, and Nataraj. "Boiler Model and Simulation for Control Design and Validation." IFAC Proceedings Volumes 47.1 (2014): 936-40. Web. [interaktyvus] [žiūrėta 2018-04-01] prieiga per internetą: <https://vb.ktu.edu/primo->

[explore/fulldisplay?docid=TN_sciversesciencedirect_elsevierS1474-6670\(16\)32766-5&context=PC&vid=KTU&search_scope=KTU&tab=default_tab&lang=lt_LT](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016327665)

26. Graciano Dieck-Assad, José Luis Vega-Fonseca, Isaías Hernández-Ramírez and Antonio Favela-Contreras “Modeling, Simulation, and Control of Steam Generation Processes“. [interaktyvus] [žiūrėta 2018-04-01] prieiga per internetą: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.79410>
27. S. R. Tawfeic, „Boiler Drum-Level Modeling“, pp. 1812 – 1829. [žiūrėta 2018-04-01]

Priedai

1 priedas. Garo katilo modelio *S-function* kodas

```
function msfcn_limintm(block)

%Inputs

%Port1 - Vandens temperatūra C

%Port2 - Vandens slėgis bar

%Port3 - Vandens srautas kg/s

%Port4 - Šilumos kiekis MW

%Port5 - Garo srautas kg/s

%Outputs

%Port1- Būgno lygis, mm

%Port2- Būgno slėgis, bar

%Parameters

%1- Pradinis slėgis bar

%2- Pradinis lygis mm

%3- Būgne esančio vandens paviršiaus plotas m2

%4- Būgno matavimo aukštis m

%5- Būgno metalo masė, kg

%6- Pradinis vandens kiekis būgne, m3

%7- Pakylančių vamzdžių (risers) tūris, m3

%8- Nusileidžiančių vamzdžių (downcomers) tūris, m3

%9- Pakylančių vamzdžių masė, kg

%10- Trinites koeficientas k

%11- Garo gyvavimo laikas būgne, Td

%12- Parametras Beta

%13- Pradinė garo kokybė

%14- Pradinis garo turis vandenyje, m3

setup(block);
```



```

%endfunction

function setup(block)

    %% Register number of dialog parameters
    block.NumDialogPrms = 16;

    %% Register number of input and output ports
    block.NumInputPorts = 5;
    block.NumOutputPorts = 2;

    %% Setup functional port properties to dynamically
    %% inherited.

    block.SetPreCompInpPortInfoToDynamic;
    block.SetPreCompOutPortInfoToDynamic;

    block.InputPort(1).Dimensions = 1;
    block.InputPort(1).DirectFeedthrough = false;
    block.InputPort(2).Dimensions = 1;
    block.InputPort(2).DirectFeedthrough = false;
    block.InputPort(3).Dimensions = 1;
    block.InputPort(3).DirectFeedthrough = false;
    block.InputPort(4).Dimensions = 1;
    block.InputPort(4).DirectFeedthrough = false;
    block.InputPort(5).Dimensions = 1;
    block.InputPort(5).DirectFeedthrough = false;

    block.OutputPort(1).Dimensions = 1;
    block.OutputPort(1).SamplingMode = 'Sample';
    block.OutputPort(2).Dimensions = 1;
    block.OutputPort(2).SamplingMode = 'Sample';

    %% Set block sample time to continuous
    block.SampleTimes = [0 0];

    %% Setup Dwork

```

```

block.NumContStates = 4;

%% Set the block simStateCompliance to default (i.e., same as a built-in block)
block.SimStateCompliance = 'DefaultSimState';

%% Register methods
block.RegBlockMethod('SetInputPortSamplingMode', @SetInpPortFrameData);
block.RegBlockMethod('InitializeConditions', @InitConditions);
block.RegBlockMethod('Outputs', @Output);
block.RegBlockMethod('Derivatives', @Derivative);

%endfunction

function SetInpPortFrameData(block, idx, fd)
block.InputPort(idx).SamplingMode = fd;
block.OutputPort(1).SamplingMode = fd;
block.OutputPort(2).SamplingMode = fd;
%endfunction

function InitConditions(block)

%% Initialize Dwork
Pd=block.DialogPrm(1).Data; %Pradinis garo slėgis bar
PdPa=Pd*10^5; %Pradinis garo slėgis Pa
Ld=block.DialogPrm(2).Data; %Pradinis lygis %
Ad=block.DialogPrm(3).Data; %Būgne esančio vandens paviršiaus plotas m2
Lda=block.DialogPrm(4).Data; %Būgno skersmuo m
cp=490; %Specifinė metalo šiluminė energija J/kg
mt=block.DialogPrm(5).Data; %Būgno metalo masė kg
Vd=block.DialogPrm(6).Data; %Būgno tūris, m3
Vwd=(Ld/100)*Vd;% Pradinis vandens tūris m3
ar=block.DialogPrm(13).Data;
Vsd=block.DialogPrm(14).Data;

block.ContStates.Data(1) = Vwd;

```

```

block.ContStates.Data(2) = PdPa;

block.ContStates.Data(3)= ar;

block.ContStates.Data(4)= Vsd;

%endfunction

function Output(block)

PdPa=block.ContStates.Data(2); %Būgno slėgis Pa

Pd=PdPa/10^5;

block.OutputPort(2).Data = Pd;

Vwt=block.ContStates.Data(1); %Vandens tūris katile m3

ar=block.ContStates.Data(3); %Garo kokybė pakylančiuose vamzdžiuose

if ar<=0

    ar=1e-6;

else if ar>1

    ar=1;

end

end

%-----

Vsd=block.ContStates.Data(4); %Garo tūris vandenyje, m3

Ad=block.DialogPrm(3).Data; %Būgne esančio vandens paviršiaus plotas m2

Lda=block.DialogPrm(4).Data; %Būgno skersmuo m

Vd=block.DialogPrm(6).Data; %Būgno tūris, m3

Vr=block.DialogPrm(7).Data; %Pakylančių vamzdžių (risers) tūris, m3

Vdc=block.DialogPrm(8).Data; %Nusileidžiančių vamzdžių (risers) tūris, m3

rhos=XSteam('rhoV_p', Pd); %Garo tankis kg/m3

rhow=XSteam('rhoL_p', Pd); %Vandens tankis kg/m3

av=rhow/(rhow-rhos)*(1-rhos/((rhow-rhos)*ar)*log(1+(rhow-rhos)/rhos*ar));% Vidutinė tūrio
dalis

%-----

if av<=0

```

```

    av=1e-6;
else if av>1
    av=1;
end
end
%-----
Vwd=Vwt-Vdc-(1-av)*Vr; %Vandens kiekis būgne, m3
if Vwd<0
    Vwd=0;
end
if Vsd<0
    Vsd=0;
end
Ld=(((Ad*Lda)/Vd*((Vwd+Vsd)/Ad))/Lda)*100; %Būgno lygis %
block.OutputPort(1).Data = Ld;
%endfunction
function Derivative(block)
    %Parametrai reikalingi išvestinėms
    dp=0.1; %slėgio skirtumas reikalingas skaičiavimuose
    %Parametrų aprašymas
    tf=block.InputPort(1).Data; %Įtekančio vandens temperatūra C
    Pf=block.InputPort(2).Data; %Įtekančio vandens slėgis bar
    Ff=block.InputPort(3).Data; %Įtekančio vandens srautas kg/s
    Q=block.InputPort(4).Data*10^6; %Šilumos kiekis W
    Fs=block.InputPort(5).Data; %Garo srautas kg/s
    Vd=block.DialogPrm(6).Data; %Būgno tūris, m3
    cp=490; %Specifinė metalo šiluminė energija J/kg
    mt=block.DialogPrm(5).Data; %Būgno metalo masė kg

```

Vr=block.DialogPrm(7).Data; %Pakylančių vamzdžių (risers) tūris, m3

Vdc=block.DialogPrm(8).Data; %Nusileidžiančių vamzdžių (downcomers) tūris, m3

mr=block.DialogPrm(9).Data; %Pakylančių vamzdžių (risers) masė, kg

k=block.DialogPrm(10).Data; %Nusileidžiančių vamzdžių trinties koef.

Td=block.DialogPrm(11).Data; %Garo gyvavimo laikas būgne

beta=block.DialogPrm(12).Data; %Parametras Beta

mdc=block.DialogPrm(15).Data; %Nusileidžiančių vamzdžių (downcomers) masė, kg

Adc=block.DialogPrm(16).Data; %Nusileidžiančių vamzdžių srauto plotas, m2

%aprašomos būsenos

Vwt=block.ContStates.Data(1); %Vandens kiekis būgne, m3

Pd=block.ContStates.Data(2)/10^5; %Būgno slėgis bar

ar=block.ContStates.Data(3); %Garo kokybė pakylančiuose vamzdžiuose

Vsd=block.ContStates.Data(4); %Garo kiekis vandenyje, m3

Vt=Vd+Vr+Vdc; %Bendras tūris (nusileidžiančių, pakylančių vamzdžių ir būgno) m3

Vst=Vt-Vwt; %Garo tūris būgne, m3

%Garo parametrai iš garo lentelių (steam tables)

hs=XSteam('hV_p', Pd)*1000; %Būgne esančio garo entalpija J/kg

hw=XSteam('hL_p', Pd)*1000; %Būgne esančio vandens entalpija J/kg

dhs=(XSteam('hV_p', Pd+0.5*dp)*1000-XSteam('hV_p', Pd-0.5*dp)*1000)/(dp*10^5); %Dalinė garo entalpijos išvestinė pagal slėgį J/(kg Pa)

dhw=(XSteam('hL_p', Pd+0.5*dp)*1000-XSteam('hL_p', Pd-0.5*dp)*1000)/(dp*10^5); %Dalinė vandens entalpijos išvestinė pagal slėgį J/(kg Pa)

rhos=XSteam('rhoV_p', Pd); %Garo tankis kg/m3

rhow=XSteam('rhoL_p', Pd); %Vandens tankis kg/m3

drhos=(XSteam('rhoV_p', Pd+0.5*dp)-XSteam('rhoV_p', Pd-0.5*dp))/(dp*10^5); %Dalinė garo tankio išvestinė pagal slėgį kg/(m3 Pa)

```

drhow=(XSteam('rhoL_p', Pd+0.5*dp)-XSteam('rhoL_p', Pd-0.5*dp))/(dp*10^5); %Dalinė
vandens tankio išvestinė pagal slėgį kg/(m3 Pa)

dts=(XSteam('Tsat_p', Pd+0.5*dp)-XSteam('Tsat_p', Pd-0.5*dp))/(dp*10^5); %Dalinė
temperatūros pagal slėgį išvestinė C / Pa

hf=XSteam('h_pT', Pf, tf)*1000; %Įtekančio vandens entalpija J/kg

hc=hs-hw; %Latentinė šiluma J/kg

%Garo kokybės parametrai

if ar<=0

    ar=1e-6;

else if ar>1

    ar=1;

end

end

ni=ar*(rhow-rhos)/rhos; %Vidinis parametras

dav=1/(rhow-rhos)^2*(rhow*drhos-rhos*drhow)*(1+rhow/rhos*1/(1+ni)-
(rhos+rhow)/(ni*rhos)*log(1+ni));

davdar=rhow/(rhos*ni)*(1/ni*log(1+ni)-1/(1+ni));

av=rhow/(rhow-rhos)*(1-rhos/((rhow-rhos)*ar)*log(1+(rhow-rhos)/rhos*ar));

if av<=0

    av=1e-6;

else if av>1

    av=1;

end

end

%Kitos būsenos

Fdc=real(sqrt(2*rhow*Adc*(rhow-rhos)*9.81*av*Vr/k)); %Nusileidžiančių vamzdžių srautas,
kg/s

%Vsd0=Td*Fs/rhos; %Teorinis Garo tūris būgne, m3

Vsd0=1;

Vwd=Vwt-Vdc-(1-av)*Vr; %Vandens kiekis būgne, m3

```

```

%Vidnių parametų skaičiavimas;

%e11
e11=rhow-rhos;

%e12
e12=Vst*drhos + Vwt*drhow;

%e21
e21=rhow*hw-rhos*hs;

%e22
e22=rhow*(hs*drhos+rhos*dhs)+Vwt*(hw*drhow+rhow*dhw)+mt*cp*dts;

%e32
e32=(rhow*dhw+rhos*dhs)*(1-av)*Vr+((1-ar)*hc*drhos+rhos*dhs)*av*Vr+(rhos+(rhow-
rhos)*ar)*hc*Vr*dav-Vr+mr*cp*dts;

%e33
e33=((1-ar)*rhos+ar*rhow)*hc*Vr*davdar;

%e42
e42=Vsd*drhos+1/hc*(rhos*Vsd*dhs+rhow*Vwd+mdc*cp*dts)+ar*(1+beta)*Vr;

%e43
e43=ar*(1+beta)*(rhos-rhow)*Vr*davdar;

%e44
e44=rhos;

block.Derivatives.Data(1) = -(Fs - Ff + (Q + hf*Ff - hs*Fs - (e21*(Ff - Fs))/e11)/(e22 -
(e12*e21)/e11)*e12)/e11; %Bendras vandens tūris (apskaičiuotas) m3

block.Derivatives.Data(2) = (Q + hf*Ff - hs*Fs - (e21*(Ff - Fs))/e11)/(e22 - (e12*e21)/e11);
%Būgno slėgis (apskaičiuotas) Pa

block.Derivatives.Data(3) = ((e32*(Q + hf*Ff - hs*Fs - (e21*(Ff - Fs))/e11))/(e22 -
(e12*e21)/e11) - Q + ar*hc*Fdc)/e33; %Garo kokybė pakylančiuose vamzdžiuose (apskaičiuotas)

block.Derivatives.Data(4) = -((e42*(Q + hf*Ff - hs*Fs - (e21*(Ff - Fs))/e11))/(e22 -
(e12*e21)/e11) - (Ff*(hf - hw))/hc - (e43*((e32*(Q + hf*Ff - hs*Fs - (e21*(Ff - Fs))/e11))/(e22 -
(e12*e21)/e11) - Q + ar*hc*Fdc))/e33 + (rhos*(Vsd - Vsd0))/Td)/e44; %Garo tūris po vandeniu
(apskaičiuotas), m3

%endfunction

```

2 priedas. Elektrinės duomenys

