



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Kauno kogeneracinės jėgainės garo katilo  
valdymo sistemos kūrimas ir tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Viltautas Vėlaitis**

Projekto autorius

**Prof. hab. dr. Donatas Levišauskas**

Vadovas

---

**Kaunas, 2021**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

# **Kauno kogeneracinės jėgainės garo katilo valdymo sistemos kūrimas ir tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Valdymo technologijos (6211EX014)

---

**Viltautas Vėlaitis**

Projekto autorius

**Prof. hab. dr. Donatas Levišauskas**

Vadovas

**Lekt. dr. Darius Ezerskis**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2021**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

Viltautas Vėlaitis

## **Kauno kogeneracinės jėgainės garo katilo valdymo sistemos kūrimas ir tyrimas**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (–usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Viltautas Vėlaitis

*Patvirtinta elektroniniu būdu*

Vėlaitis, Viltautas. Kauno kogeneracinės jėgainės garo katilo valdymo sistemos kūrimas ir tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. hab. dr. Donatas Levišauskas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: elektrinė, garo katilas, modeliavimas, slėgio valymas, PID reguliatorius, dujų – atliekų kuras.

Kaunas, 2021. 54 p.

### **Santrauka**

Šiame tiriamajame darbe atlikta Kauno kogeneracinės jėgainės technologinio proceso kaip valdymo objekto analizė, sukurta ir modeliavimo būdu ištirta garo katilo būgno slėgio automatinio valdymo sistema, kurioje naudojamas turbinos slėgio trikdančio poveikio kompensavimas ir įvertinamos skirtingos deginamo kuro rūšys: atliekos ir gamtinės dujos. Remiantis katilo technine dokumentacija ir veikiančio katilo technologinių parametrų stebėjimo duomenimis sudaryti ir *Matlab Simulink* programinės įrangos aplinkoje realizuoti valdomo proceso ir valdymo sistemų modeliai. Atliktas grįžtamojo ryšio PID reguliatoriaus derinimas, sudaryti skirtingo sudėtingumo kompensatorių algoritmai ir nustatyti jų derinimo parametrai. Palygintas valdymo sistemų be kompensatoriaus ir su kompensatoriumi veikimas palaikant slėgio nuostatą, kai sistemą veikia deginamų atliekų kaloringumo pokyčiai ir turbinos slėgio trikdantys poveikiai. Ištirta valdymo algoritmų diskretizavimo žingsnio įtaka valdymo kokybės rodikliams. Pateikti tyrimų rezultatai ir darbo išvados.

Vėlaitis, Viltautas. Development and investigation of Kaunas cogeneration power plant steam boiler control system. Master's Final Degree project / supervisor prof. hab. dr. Donatas Levišauskas; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: power plant, steam boiler, modelling, drum pressure control, PID controller, gas – waste fuel.

Kaunas, 2021. 54 pages.

### **Summary**

In this research work the analysis of Kaunas cogeneration power plant technological process as a control object is performed, steam boiler drum pressure automatic control system is developed and investigated by modeling, which uses turbine pressure disturbance compensation and evaluates different types of burned fuel: waste and natural gas. Based on the technical documentation and monitoring data of the operating boiler technological parameters, models of controlled process and control systems were created and implemented in the *Matlab Simulink* software environment. The tuning of the feedback PID controller was performed, algorithms of compensators of different complexity were developed and their tuning parameters were determined. Compared operation of control systems with and without compensator while maintaining the pressure setpoint when the system is affected by changes in the calorific value of incinerated waste and turbine pressure disturbances. Investigated influence of the discretization step of control algorithms on control quality indicators. Research results and conclusions are presented.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>7</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>8</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>10</b>
<b>1. Analitinė dalis .....</b>	<b>12</b>
1.1. Kogeneracinės jėgainės technologinis procesas .....	12
1.2. Garo katilo modeliavimo metodai .....	13
1.2.1. Teorinis modeliavimas .....	13
1.2.2. Eksperimentinis modeliavimas.....	15
1.2.3. Diskretinis PID reguliatorius .....	16
<b>2. Tiriamoji dalis.....</b>	<b>18</b>
2.1. Kauno kogeneracinės jėgainės garo katilo duomenys.....	18
2.2. Kuro padavimas .....	19
2.3. Degimo sistema .....	20
2.4. Vandens valymas ir padavimas .....	21
2.4.1. Žalias vanduo.....	21
2.4.2. Pagerintas vanduo.....	21
2.5. Oro pašildymas ir padavimas .....	22
2.6. Vėdinimo sistema .....	22
2.7. Suspaustas oras .....	23
2.8. Centralizuotas šildymas.....	24
2.9. Katilo sistemos aprašymas .....	24
2.10. Selektyvus nekatalizinis redukavimas .....	26
2.11. Dūmų šalinimas .....	26
2.12. Vandens lygio reguliavimas būgne .....	28
2.13. Garo slėgio ir srauto palaikymo sistema .....	28
<b>3. Kauno jėgainės garo katilo modeliavimas.....</b>	<b>29</b>
3.1. Perdavimo funkcijų radimas.....	29
3.1.1. Dujų srauto – būgno slėgio perdavimo funkcija.....	29
3.1.2. Turbinos slėgio – būgno slėgio perdavimo funkcija .....	31
3.2. Sistemos modeliavimas .....	32
3.2.1. Vienkontūrės schemos tyrimas.....	32
3.2.2. Grįžtamojo reguliatoriaus derinimas .....	35
3.2.3. Sistemos derinimas pagal kintantį šiukšlių srautą ir kaloringumą .....	37
3.2.4. Diskretinio PID reguliatoriaus modeliavimas .....	40
3.2.5. Tiesioginio ryšio reguliatoriaus derinimas .....	41
3.2.6. Diskretizavimo žingsnio tyrimas .....	50
<b>Išvados ir rezultatai .....</b>	<b>52</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>53</b>
<b>Priedai.....</b>	<b>55</b>

## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> Kintamųjų paaiškinimas .....	13
<b>2 lentelė.</b> Garo katilo techniniai duomenys .....	18
<b>3 lentelė.</b> Būgno informacija .....	19
<b>4 lentelė.</b> Žalio vandens suvartojimas .....	21
<b>5 lentelė.</b> Katilo išvalyto vandens sunaudojimas .....	22
<b>6 lentelė.</b> Suspausto oro vartotojai .....	23
<b>7 lentelė.</b> Pagrindiniai garo katilo duomenys [20] .....	25
<b>8 lentelė.</b> Būgno slėgio dinaminės nuokrypos ir reguliavimo laiko parametrai.....	48
<b>9 lentelė.</b> Dujų srauto dinaminės nuokrypos ir reguliavimo laiko parametrai .....	50

## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b> Atliekų deginimo schema [7] .....	12
<b>2 pav.</b> Supaprastinta garo katilo schema .....	13
<b>3 pav.</b> Suspaustas katilo modelis [1] .....	14
<b>4 pav.</b> Tiesioginio ryšio reguliavimo sistema [31].....	16
<b>5 pav.</b> Proceso ir diskretinio regulatoriaus išėjimai diskretizavimo intervalo metu [31] .....	16
<b>6 pav.</b> Pokyčių PID reguliavimo algoritmo struktūra .....	17
<b>7 pav.</b> Katilo našumo grafikas [12] .....	20
<b>8 pav.</b> Katilo degimo sistema .....	21
<b>9 pav.</b> Kauno jėgainės centralizuoto šildymo schema [11].....	24
<b>10 pav.</b> Garo katilo sistema.....	25
<b>11 pav.</b> Kauno elektrinės SNCR diagrama .....	26
<b>12 pav.</b> Degimo kameros slėgio valdymas.....	27
<b>13 pav.</b> Pradiniai dujų srauto laike duomenys .....	29
<b>14 pav.</b> Pradiniai būgno slėgio duomenys laike.....	30
<b>15 pav.</b> Dujų srauto – būgno slėgio perdavimo funkcija .....	30
<b>16 pav.</b> Perdavimo funkcijos adekvatumas .....	31
<b>17 pav.</b> Pradiniai turbinos ir būgno slėgių grafikai .....	31
<b>18 pav.</b> Gauta turbinos slėgio – būgno slėgio perdavimo funkcija.....	32
<b>19 pav.</b> Perdavimo funkcijos adekvatumas .....	32
<b>20 pav.</b> Vienkontūrės sistemos tyrimo schema .....	33
<b>21 pav.</b> Vėlinimo ir laiko pastoviųjų skaičiavimas .....	33
<b>22 pav.</b> Dujų srauto – būgno slėgio vienkontūrė ir aproksimuota perdavimo funkcijos .....	34
<b>23 pav.</b> Turbinos slėgio – būgno slėgio vienkontūrė ir aproksimuota perdavimo funkcijos .....	34
<b>24 pav.</b> Dujų srauto – būgno slėgio aproksimuotos funkcijos adekvatumas .....	34
<b>25 pav.</b> Turbinos slėgio – būgno slėgio aproksimuotos funkcijos adekvatumas .....	35
<b>26 pav.</b> PID parametrų skaičiavimai .....	35
<b>27 pav.</b> Modelis su PID regulatoriumi .....	36
<b>28 pav.</b> Būgno slėgio valdymas .....	36
<b>29 pav.</b> Dujų srautas, reikalingas palaikyti 79 bar būgno slėgį.....	37
<b>30 pav.</b> Kuro reguliavimo schema .....	38
<b>31 pav.</b> Užduotas perskaičiuotas šiukšlių srauto trikdys .....	38
<b>32 pav.</b> Paduodamas dujų srautas į katilą esant trikdžiui.....	39
<b>33 pav.</b> Būgno slėgio reguliavimas be ir su PID regulatoriumi.....	39
<b>34 pav.</b> Sudarytas tolydinio PID regulatoriaus diskretizavimo modelis.....	40
<b>35 pav.</b> Valdymo sistemos modelis su suderintu diskretiniu regulatoriumi .....	40
<b>36 pav.</b> Diskretinio regulatoriaus adekvatumas .....	41
<b>37 pav.</b> Randami kompensatoriaus parametrai .....	41
<b>38 pav.</b> Gauta kompensatoriaus perdavimo funkcija su Pade aproksimacija .....	42
<b>39 pav.</b> Sistemos modelis su prijungtu kompensatoriumi.....	42
<b>40 pav.</b> Turbinos slėgio šuolinis pokytis.....	43
<b>41 pav.</b> Slėgio reguliavimas su ir be kompensatoriaus palyginimas.....	43
<b>42 pav.</b> Bendro kuro srauto palyginimas su ir be kompensatoriaus.....	44
<b>43 pav.</b> Galutinis būgno sistemos modelis.....	45
<b>44 pav.</b> Turbinos slėgio trikdys sistemai perleistas per aperiodinę grandį .....	45



<b>45 pav.</b> Suminis kuro srautas tiekiamas į katilą su ir be kompensatoriaus .....	46
<b>46 pav.</b> Slėgio palaikymas diskrečiuoju PID reguliatoriumi su ir be kompensatoriaus.....	46
<b>47 pav.</b> Būgno slėgio reguliavimas ir kompensatorių palyginimas .....	47
<b>48 pav.</b> Būgno slėgio maksimalios dinaminės nuokrypos ir reguliavimo laiko tyrimas .....	48
<b>49 pav.</b> Dujų srautų palyginimas esant skirtingiems kompensatoriams .....	49
<b>50 pav.</b> Dujų srauto reguliavimo laiko tyrimas.....	49
<b>51 pav.</b> Kuro srauto palyginimas esant skirtingiems diskretizavimo žingsniams.....	50
<b>52 pav.</b> Slėgio reguliavimas esant skirtingiems diskretizavimo žingsniams .....	51

## Ivadas

Garų katilas – tai vienas iš pagrindinių šiluminės jėgainės dalių, kuris gamina aukštos temperatūros ir slėgio garą ir keliauja į garų turbiną. Katilai būna įvairių formų ir dydžių, priklausomai nuo jėgainės galingumo, tačiau dažniausiai jis yra cilindro formos būgnas, kuriame nuolatos vyksta garo bei vandens cirkuliacija. Be to, skiriasi katilų modeliai – vieni įvertina vandens ar garo kokybę, kiti vandens trintį vamzdžiuose bei cirkuliacijos srovę. Norint iširti tam tikro garo katilo modelio savybes padeda modelio verifikavimas. Žymiai naudingesnis tyrimas ir derinimas atliekamas tokiu atveju, jei duomenys bus imami iš realios sistemos.

Straipsnyje „Boiler Model and Simulation for Control Design and Validation” [1], parašyto Sunil'o Barve'o ir Nataraj'o, rašoma apie katilo modelius. Pagal jų modelį realios elektrinės pavidalo metu gaunami geresni rezultatai nei pačiame straipsnyje aptartoms sistemoms. Be to, šis modelis yra tinkamas dirbti plačiame dinamiame diapazone. Čia taip pat naudojamas *Astrom* – *Bell* katilo modelis.

Flynn'o M.E, ir M.J O'Malley'o darbe „A Drum Boiler Model for Long Term Power System Dynamic Simulation” [2] yra aptariami šiluminės jėgainės komponentai, kurie lemia garo katilo valdymą. Be to, nagrinėjamas katilo lygio reguliavimas bei palyginami rezultatai tarp modelio ir realios sistemos rezultatų.

Bouskel'os Daniel'os šaltinyje „Multi-Mode Physical Modelling of a Drum Boiler” [3] išsamiai aprašoma apie būsenos perėjimus, tačiau apie patį bandymą nėra rašoma.

Cheres'o E. straipsnyje „Small and Medium Size Drum Boiler Models Suitable for Long Term Dynamic Response” [4] rašoma apie duomenų surinkimo būdus, garo katilo skaičiavimams naudojamus koeficientus, matematinės išraiškas ir metodus, tačiau naudoja labai nepatogią vartotojo sąsają.

Zhen Tian, Jingqi Yuan ir Liang Xu darbe „Modeling of Drum Boiler-turbine Unit and the Modelbased Coordinated Control Strategy” [5] rašoma apie garo – šilumos bei garo – galios kitimo procesus, aprašo juos matematinėmis išraiškomis. Sukuriamas sistemos modelis ir pratestuojama su realiais elektrinės istoriniais duomenimis. Gauti rezultatai atitinka elektrinės parodymus.

Labai svarbus aspektas garo katilo modelyje – tiekama kuro rūšis. Nuo jo priklauso elektrinės naudingumas, katilo parametrų reguliavimas, vamzdžių ir kitų elementų parinkimas, išmetamųjų dalelių sudėtis bei jų nukenksminimas. Vis dažniau atsisakoma klasikinės anglies kuro šiluminės elektrinės ir pereinama prie atliekų deginimo.

A. Del Rosso, D. L. Brooks'o ir Y. R. Jusino darbe „Impacts of bulk wind generation and waste-to-energy on the economic operation of the Puerto Rico Electric Power Authority system” [6] iš pradžių palyginamas 2009 metų elektrinių galingumas ir aprašomas vis svarbesnis šiukšlių deginimo kogeneracinis metodas dėl jų efektyvumo. Toliau šaltinyje daugiau kalbama apie vėjo sugeneruotą elektros energiją ir jos išlaidas.

S. Bardi'o ir A. Astolfi'o straipsnyje „Modeling and Control of a Waste-to-Energy Plant [Applications of Control]” [7] plačiau aprašo kogeneracinės elektrinės veikimo technologiją ir šiukšlių deginimo procesą. Vėliau aptaria valdymo problemas degimo bei išmetimo dujų nukenksminimo procesuose.

B. Anggoro, A. Aprilian'o ir B. Halimi'o bendrame darbe „Potency of waste to energy — Bandung city case study” [8] analizuojama bendra elektrinės schema, deginamų šiukšlių bei sudegusių produktų sudėtis. Atliekamos išvados apie efektyviausiai deginamas šiukšles ir jų priemonės esant tam tikrai degimo temperatūrai.

Dažnai sistemos paleidimo metu, ar esant matuojamų parametrų nuokrypiai, gali būti naudojamos dujos. Jų tiekimą į katilą, palyginus, nesunku valdyti.

Kazarinov'a ir Kolesnikov'a straipsnyje „Heat Load Control in Steam Boilers” [27] matematiškai modeliuoja katilo būgną ir įvertina dujų įtaką valdant degimo procesą. Jie teigia, kad greitaiegiai vožtuvai efektyviai paduoda dujas į degimo kamerą ir taip pagerina proceso stabilumą.

Z. Wang'o ir Z. Zhang'o darbe „Analysis of a Combined Cycle Recovering Pressure Energy of Natural Gas” [28] rašo apie kombinuoto ciklo jėgainę, kuriose elektros išgavimo efektyvumą pagerina paduodamas aukštas dujų slėgis bei papildomas įrenginys – dujų turbina.

**Darbo tikslas** – sukurti Kauno kogeneracinės jėgainės garo katilo būgno slėgio valdymo sistemą ir ištirti sistemos veikimą imitacinio modeliavimo būdu.

**Darbo uždaviniai:**

- apžvelgti garo katilo technologinio proceso kaip valdymo objekto ypatumus;
- išanalizuoti Kauno kogeneracinės jėgainės technologinį procesą ir valdymo sistemas;
- sudaryti garo katilo matematinį modelį ir jį realizuoti *Matlab Simulink* programinės įrangos aplinkoje;
- sudaryti garo katilo būgno slėgio grįžtamojo ir tiesioginio / grįžtamojo ryšio valdymo sistemas ir realizuoti valdymo sistemų modelius *Matlab Simulink* aplinkoje;
- atlikti grįžtamojo ryšio PID reguliatoriaus derinimą, parinkti tiesioginio ryšio reguliatoriaus (kompensatoriaus) algoritmą ir derinimo parametrus;
- imitacinio modeliavimo būdu atlikti valdymo sistemų veikimo tyrimą kompensuojant kuro kaloringumo ir turbinos apkrovos trikdančius poveikius;
- ištirti reguliatorių diskretizavimo žingsnio įtaką slėgio valdymo kokybės rodikliams;
- atlikti darbo rezultatų analizę ir pateikti išvadas.

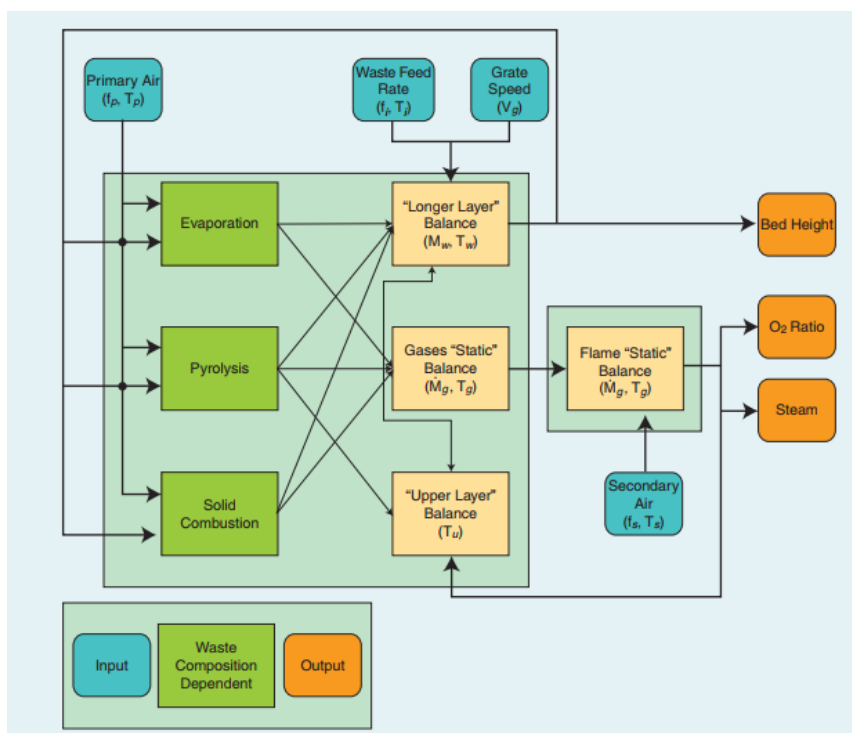
## 1. Analitinė dalis

Šio darbo analitinėje dalyje nagrinėjamas tipinis kogeneracinės jėgainės veikimo procesas bei garo katilo modeliavimo metodai.

### 1.1. Kogeneracinės jėgainės technologinis procesas

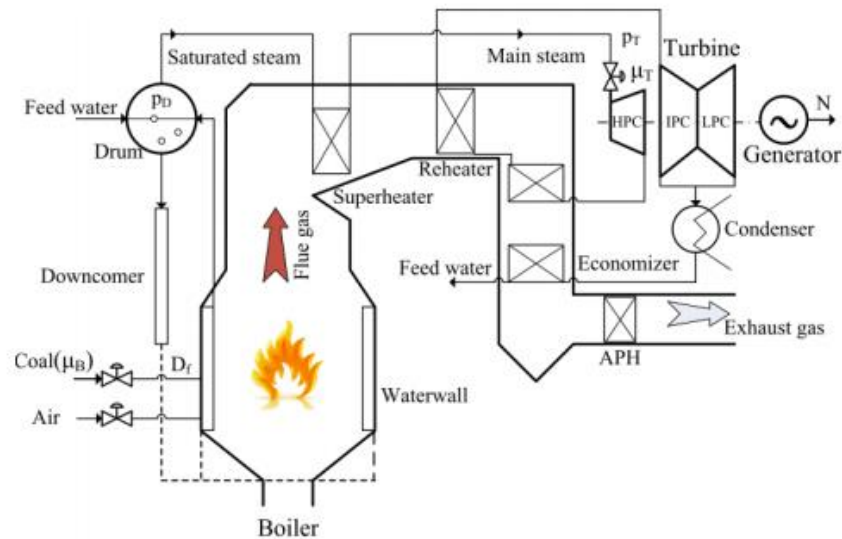
Kogeneracija vadinama šilumos ir elektros energijos gamyba vienu metu, viename technologiniame procese, kuomet pagaminta šilumos energija yra tikslingai panaudojama, taip pasiekiant didesnę kuro panaudojimo efektyvumą. Kogeneracinėse jėgainėse pagaminta šiluma dažniausiai suvartojama centralizuotam šildymui ar pramoniniuose procesuose, o įprastose elektrinėse šiluma lieka nepanaudojama [26].

Šio tipo jėgainės užtikrina didelį efektyvumą, patiria mažiau perdavimo nuostolių ir padidina šalies energetinės sistemos lankstumą. Efektyvumas gaunamas dar didesnis, kai yra deginamos atliekos ar biomasė. Be to, neiškyla problemų prijungti kogeneracinę jėgainę lygiagrečiai su kitais elektros gamintojais bei šiluminiais tinklais. Tokiu būdu jėgainė gali suteikti rezervinę galią.



1 pav. Atliekų deginimo schema [7]

1 paveiksle pavaizduotas supaprastintas šiukšlių deginimo procesas. Tai yra svarbiausia tokio tipo elektrinės savybė. Diagrama rodo įėjimus, išėjimus bei sąryšį tarp procesų. Žalios spalvos blokeliai vaizduoja termocheminius procesus, kurie priklauso nuo tiekiamos šiukšlių cheminės sudėties. Tai yra garinimas, pirolizė bei galutinis sudeginimas. Šiuose procesuose bene labiausiai pasireiškia termodinaminiai reiškiniai. Šiems procesams reguliuoti yra atliekami sudėtingi skaičiavimai – konvejerių bet šiukšlių padavimo greitis, oro tiekimo srautas, deguonies kiekio analizė ir kt. Visas šis procesas sudaro efektyvų atliekų energijos panaudojimą ir elektros gaminimą.



**2 pav.** Supaprastinta garo katilo schema

Supaprastinta garo katilo veikimo schema pavaizduota 2 paveiksle. Deginant kurą yra šildomas katile esantis vanduo. Šiam užvirus aukšto slėgio ir temperatūros garai keliauja pro superšildytuvą (angl. *superheater*), kuriame gasas sušyla iki maždaug 1000 °C. Garas suka turbiną, o ši – generatorių, kuris gamina elektros energiją. Degimo procese susidarę dūmai yra filtruojami bei nukenksminami įvairiomis cheminėmis medžiagomis ir tokiu būdu į aplinką patenka tik nedidelė dalis teršalų. Iš turbinos išėję garai yra kondensuojami ir atvėsęs vanduo grįžta atgal į katilo būgną.

## 1.2. Garo katilo modeliavimo metodai

Garų katilas gali būti modeliuojamas dviem būdais – teoriniu arba eksperimentiniu būdais. Šioje dalyje trumpai aptariami šie abu galimi modeliavimo būdai.

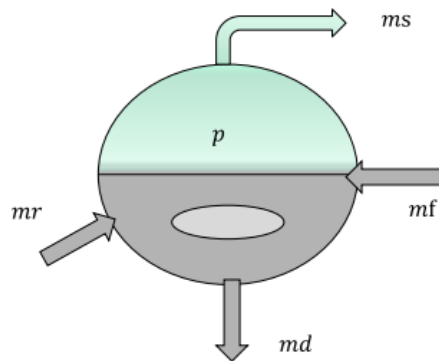
### 1.2.1. Teorinis modeliavimas

Šiluminės elektrinės garo katilas yra sudėtingas pramoninis netiesinis įrenginys. Supaprastintai netiesinei garo katilo sistemai gali būti naudojamas *Astrom – Bell* modelis. Šis modelis yra charakterizuojamas lengvai prieinamais katilo konstrukciniais – geometriniais duomenimis. Jame naudojamos trys būsenos – slėgis, vandens lygis būgne ir vidutinė garo kokybė. Tolimesnės formulės naudotos iš [1] šaltinio. Matematinio modeliavimo kintamieji aprašyti 1 lentelėje.

**1 lentelė.** Kintamųjų paaiškinimas

Kintamasis	Reikšmė
$V_d$	Būgno tūris, [m <sup>3</sup> ]
$V_s$	Garų tūris, [m <sup>3</sup> ]
$V_b$	Burbuliukų tūris, [m <sup>3</sup> ]
$V_l$	Skysčio tūris, [m <sup>3</sup> ]
$m_s$	Garų srautas, [m <sup>3</sup> ]
$m_f$	Paduodamo vandens srautas, [kg/s]
$m_d$	Ištekantis srautas, [kg/s]

Kintamasis	Reikšmė
$m_r$	Įtekantis srautas, [kg/s]
$p$	Būgno slėgis, [bar]
$u$	Greitis, [m/s]
$\rho_l$	Skysčio tankis, [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_s$	Garų tankis, [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_b$	Burbuliukų tankis, [kg/m <sup>3</sup> ]
$h_l$	Skysčio entalpija, [J]
$h_s$	Garų entalpija, [J]
$h_r$	Įtekėjimo entalpija, [J]
$g$	Pagreitėjimas dėl gravitacijos, [m/s <sup>2</sup> ]
$M_d$	Būgno metalo masė, [kg]
$C_p$	Specifinė šiluminė talpa, [J/(K·kg)]
$M_r$	Įtekėjimo metalo masė, [kg]



**3 pav.** Suspaustas katilo modelis [1]

Naudojant masių balansą pasirenkamas ir išreiškiamas kintamasis  $V_s$ .

$$V_s = V_s - V_l - V_b; \quad (1.2.1.1)$$

$$\frac{d}{dt}(V_l \cdot \rho_l + V_s \cdot \rho_s + V_b \cdot \rho_b) = m_f + m_r - m_s - m_d. \quad (1.2.1.2)$$

Pakeičiant  $V_s$  išraišką ir perrašant kintamuosius į laiko bei slėgio išvestines gauname supaprastintą lygtį. Be to, teigiama, kad garo slėgis lygus oro burbuliukų slėgiui:

$$\frac{dp}{dt}(V_l \cdot \frac{d\rho_l}{dp} + V_s \cdot \frac{d\rho_s}{dp} + V_b \cdot \frac{d\rho_b}{dp}) + \frac{dV_l}{dt}(\rho_l - \rho_s) + \frac{dV_b}{dt}\rho_b = m_f + m_r - m_s - m_d. \quad (1.2.1.3)$$

Pritaikant masių balansą skysčiams, lygtis perrašoma:

$$\frac{d}{dt}(V_l \cdot \rho_l + V_b \cdot \rho_b) = m_f + m_r - m_b - m_d. \quad (1.2.1.4)$$

Išskleidus lygtį:

$$\frac{dp}{dt} (V_l \cdot \frac{d\rho_l}{dp} + V_b \cdot \frac{d\rho_s}{dp}) + \frac{dV_l}{dt} \rho_s + \frac{dV_b}{dt} \rho_b = m_f + m_r - m_b - m_d. \quad (1.2.1.5)$$

Pritaikius energijos balansą būgnui, atliekami skaičiavimai:

$$\frac{d}{dt} (V_l \cdot \rho_l \cdot h_l + V_b \cdot \rho_b \cdot h_b + V_s \cdot \rho_s \cdot h_s) = m_f h_s + m_r h_r - m_s h_s - m_d h_d - M_d \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt}. \quad (1.2.1.6)$$

Išskleidus lygtį:

$$\frac{dp}{dt} (V_l \cdot h_l \frac{d\rho_l}{dp} + V_l \cdot \rho_l \frac{d\rho_s}{dp} + V_d \cdot h_s \frac{d\rho_s}{dp} - V_d \cdot h_s \frac{d\rho_s}{dp} - V_l \cdot \rho_s \frac{d\rho_s}{dp}) + \frac{dV_l}{dt} (\rho_l h_l - \rho_s h_s) = m_f h_s + m_r h_r - m_s h_s - m_d h_d - M_d \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt}. \quad (1.2.1.7)$$

Katilo būgno teoriniam modeliui sudaryti trys būsenos kintamieji –  $p$ ,  $V_b$ ,  $V_l$  ir trys lygtys. Iš jų galima išsireikšti slėgio bei vandens lygio lygtis.

## 1.2.2. Eksperimentinis modeliavimas

Garo katilo modelį galima sukurti keliais būdais – atsižvelgiant į garo slėgio, būgno vandens lygio bei turbinos dinamikos reguliavimą [10]. Populiariausi metodai palaikyti užduotą slėgį katilo būgne:

- valdant turbinos vožtuvą;
- keičiant kuro padavimo srautą.

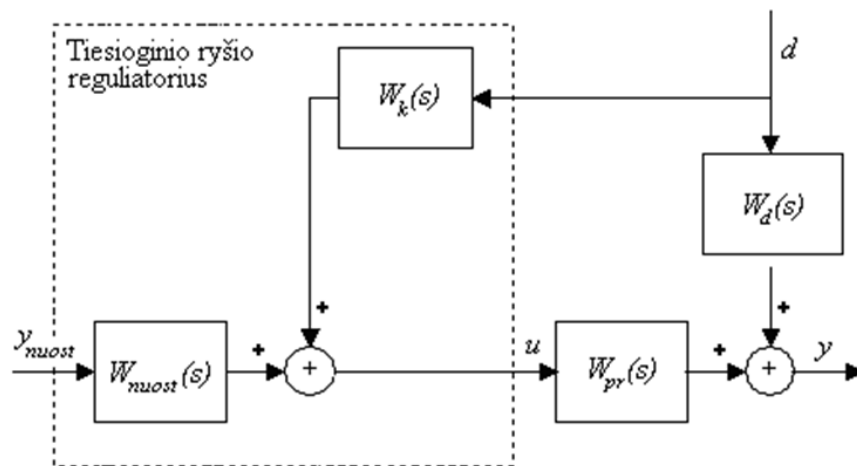
Daugelyje katilo degimo reguliavimo sistemų yra naudojama turbinos vožtuvo korekcija. Šis metodas yra laikomas vienu pagrindinių valdymo būdų, nes tokiu būdu yra palaikomas energijos balansas tarp katilo ir turbinos [29].

Esant vienodam turbinos vožtuvo slėgiui katilas tiekia optimalų kiekį energijos į turbiną. Sakoma, kad katilas ir turbina yra subalansuoti. Tačiau bet kokie slėgio matavimo nukrypimai nuo nuostato sumažina efektyvumą. Pavyzdžiui, esant žemesniam vožtuvo slėgiui, norint pagaminti tą patį elektros energijos kiekį reikėtų padidinti garo srautą bei katilo degimo greitį [29].

Tačiau dėl proceso vėlavimų, netiesiškumų ir kitų sistemų poveikių, valdymo sistemos su turbinos vožtuvo valdymu sukelia nestabilumą ir svyravimų. Sistemos stabilizavimas gali būti pasiektas sumažinant apkrovos pokyčius naudojant teigiamojo grįžtamojo ryšio reguliavimą.

Tiesioginio ryšio regulatoriaus sistema puikiai tinka sistemos slėgio palaikymui keičiant kuro padavimo kiekį. Reguluojant tiesioginiu ryšiu matuojamų trikdančių poveikių įtaka kompensuojama prieš jiems paveikiant proceso išėjimą. [31].

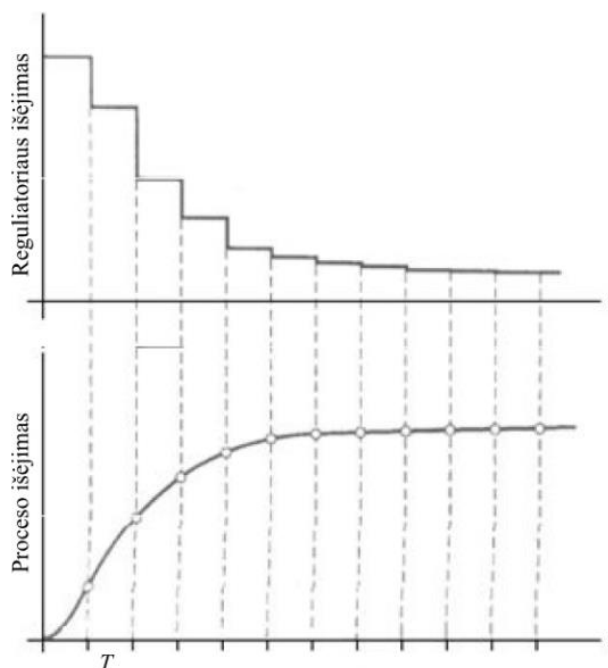
4 paveiksle vaizduojama tyrime naudojama sistema, kurioje trikdį atitinka turbinos slėgis, o valdantį poveikį – kuro srautas. Taigi, tiesioginio ryšio reguliavimas gali būti realizuotas, kai trikdantis poveikis yra matuojamas ir kai yra sudarytas modelis, aprašantis trikdančio poveikio įtaką proceso išėjimui [31].



4 pav. Tiesioginio ryšio reguliavimo sistema [31]

### 1.2.3. Diskretinis PID reguliatorius

Šiuolaikinėse valdymo sistemose dauguma valdymo algoritmų realizuojami valdikliuose, kuriuose skaičiavimai atliekami diskretizuoto laiko intervaluose (angl. *sample time*). Kiekvienu diskrečiuoju laiko momentu  $T$  surenkama jutiklių informacija, apskaičiuojamas valdantysis poveikis ir nustatomas išėjimo signalas, kuris išlaikomas pastovus viso diskretizavimo intervalo metu (5 pav.) [31].



5 pav. Proceso ir diskretinio reguliatoriaus išėjimai diskretizavimo intervalo metu [31]

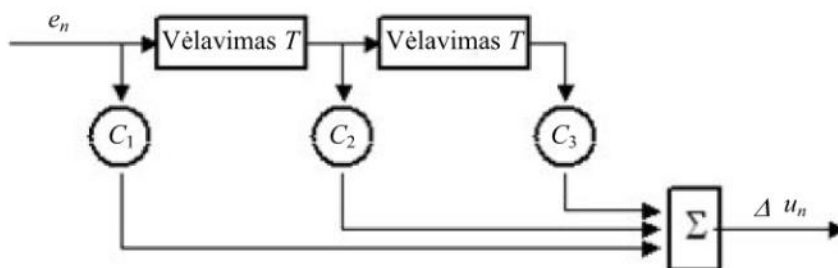
Diskretieji tiesinių reguliatorių algoritmai gaunami iš tolydžiųjų algoritmų. Proporcingoji dedamoji nesikeičia. Reguliavimo dėsnų laiko srities lygtyse integralinė ir diferencialinė dedamosios gali būti aproksimuojamos taikant įvairaus tikslumo diskrečiuosius algoritmus. Paprasčiausias būdas yra pakeisti nuokrypio integravimą diskretinių matavimų sumavimu [31].



Gaunamas PID reguliavimo pokyčių algoritmas:

$$\Delta u_n = K_r \left[ \left( 1 + \frac{T_d}{T} + \frac{T}{T_i} \right) e_n - \left( 1 + \frac{2T_d}{T} \right) e_{n-1} + \frac{T_d}{T} e_{n-2} \right]. \quad (1.2.3.1)$$

Pažymėjus, kad  $C_1 = 1 + \frac{T_d}{T} + \frac{T}{T_i}$ ,  $C_2 = 1 + \frac{2T_d}{T}$ ,  $C_3 = \frac{T_d}{T}$ , pokyčių PID algoritmo struktūrą galima atvaizduoti taip, kaip parodyta 6 paveiksle.



**6 pav.** Pokyčių PID reguliavimo algoritmo struktūra

## 2. Tiriamoji dalis

Šioje dalyje nagrinėjama Kauno kogeneracinės jėgainės struktūra ir duomenys iš techninės dokumentacijos. Supaprastinta Kauno kogeneracinės blokinė schema pavaizduota 8 priede. Ja remtasi toliau atliekant bandymus.

### 2.1. Kauno kogeneracinės jėgainės garo katilo duomenys

Kaune pastatyta didelio efektyvumo, atliekomis kūrenama kogeneracinė jėgainė, kurios elektrinė galia siekia apie 24 MW, o šilumos gamybos galia apie 70 MW. Tokie pajėgumai kasmet leidžia racionaliai panaudoti apie 200 tūkst. tonų regione susidarančių komunalinių atliekų, likusių po rūšiavimo, ir pagaminti apie 500 GWh šilumos bei apie 170 GWh elektros energijos. Jėgainėje galima pagaminti apie 40 proc. Kauno miesto šilumos poreikio [9].

2 ir 3 lentelėse surašyti duomenys iš katilo ir būgno dokumentacijų. Šie duomenys yra naudingi kuriant modelį tiek matematinio, tiek eksperimentinio būdais. Be to, derinant reguliatorių reikės vadovautis nustatytomis techninių matavimų ribomis.

2 lentelė. Garo katilo techniniai duomenys

Informacija	Vertė	Matavimo vienetai
Garų išgavimas esant 100 % apkrovai	107	t/h
Maksimalus leidžiamas garo išgavimas	114,5	t/h
Maksimalus leidžiamas viršslėgis	92	bar
Normalus slėgis išėjime	75	bar
Nominali vandens temperatūra	130	°C
Normali temperatūra išėjime	450	°C
Nominali apkrova	85	MW
Išmetimo dujos: Normali apkrova Maksimali leidžiama	170 187	Nm <sup>3</sup> /h Nm <sup>3</sup> /h
Išmetimo dujų temperatūra	160	°C
Išmetimo dujų slėgis (nuostoliai): Nominali apkrova Maksimali	11,2 20,1	mbar mbar
Kaitinamų membraninių sienų plotas	2385	m <sup>2</sup>
Garintuvo plotas	476	m <sup>2</sup>
Superšildytuvo plotas	4657	m <sup>2</sup>
Ekonomaizerio plotas	7231	m <sup>2</sup>
Degimo sistema	„Standardkessel Baumgarte GmbH” – 3 etapų šiukšlių deginimas	

### 3 lentelė. Būgno informacija

Informacija	Vertė	Matavimo vienetai
Būgno skersmuo	1800	mm
Būgno ilgis	~16500	mm
Prisotinto garo išėjimai	2	–
Būgno pirminio šildytuvo galia	~3,8	MW

#### 2.2. Kuro padavimas

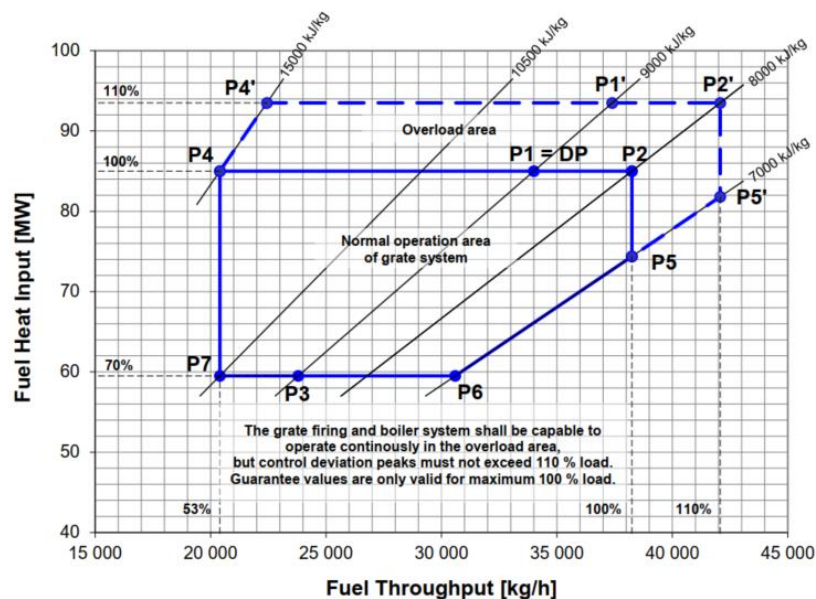
Šiluminėse elektrinėse dažniausiai būna vieno ar dviejų kuro tipų. Jei jėgainėje vienu metu yra deginama daugiau nei vienos rūšies kuras, tuomet ji vadinama kombinuoto ciklo jėgaine. Kauno kogeneracinė elektrinė nėra priskiriama prie šio tipo, nes nors ir yra naudojamos dviejų kuro tipo rūšys, tačiau jos deginamos ne vienu metu. Paleidimo metu dėl valdymo ir stabilumo privalumų naudojamos dujos. Jų srautą nėra sunku valdyti vožtuvais, kurie reguliuojami paprasto PID reguliatoriaus dėka. Sistemos dokumentacijoje teigiama, kad dujų slėgis numatytas 2,7–3,3 bar ribose, o maksimalus srautas – 1,27 kg/s [18].

Paleidus sistemą ir pasiekus reikalingas technologines vertes pereinama prie pagrindinės kuro rūšies – atliekų. Garo katilė deginamos po rūšiavimo mechaninio ir biologinio apdorojimo įrenginiuose likusios komunalinės atliekos, nepavojingos pramoninės atliekos, nuotekų dumblas ir biomasė. Šiukšlių sunkvežimiai atvyksta prie šiukšlių sandėliavimo patalpos ir iškrauna turinį per atidarytus vartus, per kuriuos atliekos sukrenta į specialų bunkerį. Šiukšlių laikymo bunkeris turi penkis priėmimo punktus su raudonais / žaliais šviesoforais, kurie leidžia vienu metu atlikti iškrovimą dviem sunkvežimiams. Kartais priėmimo punktai gali būti rezervuoti kranui, kuris atlieka valymo darbus atitinkamame punkte. Šiukšlės priimamos darbo dienomis nuo 8 iki 16 valandos. Numatomas šiukšlių pristatymo kiekis sunkvežimiais yra 10 t/h. Nuo atvykimo į elektrinės teritoriją iki iškrovimo normaliomis sąlygomis turėtų užtrukti 5 min.

Šiukšlių laikymo bunkeris yra apskaičiuotas 5 dienų atsargai, jei yra tenkinamos šios sąlygos:

- kuro vidutinė šiluminė energija – 9 MJ/kg;
- katilo našumas – 34 t/h;
- katilo našumas per dieną – 800 t;
- šiukšlių tankumas – 0,3 t/m<sup>3</sup>;
- šiukšlių sandarinimo faktorius – 1,6;
- 8 h per dieną ir 5 dienos per savaitę šiukšlių transportavimo;
- daugiau nei 10 sunkvežimių per valandą [21].

Norint kuo tiksliau palaikyti reguliuojamus sistemos parametrus, tokius kaip garo slėgis, temperatūra bei srautas, būtina reguliuoti pagrindinį degimo proceso elementą – šiukšles. 7 paveikslėlyje matoma kuro savitosios šilumos priklausomybė nuo sudeginamo kuro per valandą. Pagal šias charakteristikas galima parinkti jėgainės kuro naudojimo efektyvumą.



7 pav. Katilo našumo grafikas [12]

### 2.3. Degimo sistema

Iškrautos šiukšlės bunkeryje yra transportuojamos juostiniu konvejeriu. Normaliame darbo režime dalis oro, reikalingo degimui, yra įtraukiama iš bunkerio kartu su šiukšlėmis, naudojant pirminio oro orapūtę. Pirminis oras paprastai pasiekia virš 72 °C, todėl šiukšlių bunkeryje gali įvykti gaisras. Tokiu atveju uždaromos sklendės tarp bunkerio ir katilo todėl oras būtų tiesiogiai siurbiamas iš boilerio aplinkos ar antrinio oro padavimo sistemos.

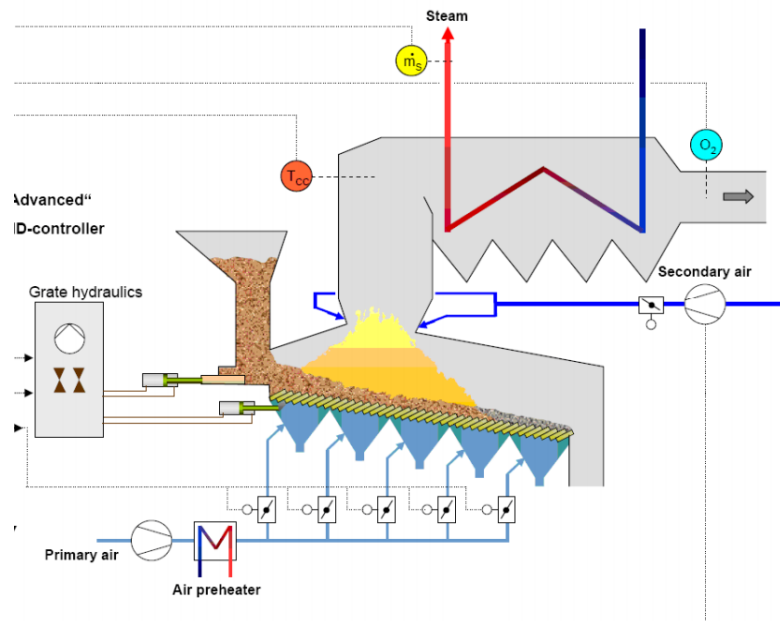
Antrinio oro tikslas yra užtikrinti kontroliuojamą degimą ir vienodą dujų maišymosi santykį katilo zonoje. Oras yra tiekiamas per 12 oro įpurškimo taškų, kurie paskirstomi katilo kameroje.

Sistemos efektyvumui užtikrinti yra sumontuojama oro drėkinimo sistema, kuri naudoja dūmų šalinimo sistemoje susikondensavusį kondensatą, tuo pačiu ir pašildydama pirminį bei antrinį orą. Degimui naudojamas oro srautas maišosi su drėkintuvais ir šiek tiek išgarina kondensatą, tokiu būdu sudrėkindamas orą. Toks oro drėkinimo būdas gali padidinti sistemos efektyvumą 10–15 %, kadangi šis metodas atvėsina išmetimo dujas papildomai 15–20 °C. [10]

Viena iš problemų – tai pirminis degimo oras, ateinantis iš šiukšlių bunkerio, gali būti užterštas bakterijomis. Kad bakterijos nesidaugintų kondensate, natrio hipochloritas (NaOCl) yra įpurškiamas į kondensatą dar prieš kondensatui patenkant į drėkintuvus.

8 paveikslėlyje matomos kuro bei oro padavimo sistemos. Norint padidinti degimo efektyvumą naudojami hidrauliniai stūmokliai (angl. *gate hydraulics*), sustumiantys šiukšles arčiau degimo kameros ir pelenus į pelenų surinkimo įrenginį [23].

Elektrinės operatoriaus ekrano degimo ir katilo sistema pavaizduota 5 priede.



8 pav. Katilo degimo sistema

## 2.4. Vandens valymas ir padavimas

Šioje dalyje trumpai aprašomas pirminio žalio vandens apdorojimas ir gerinimas. Vėliau – pagerinto vandens paskirstymas sistemoje.

### 2.4.1. Žalias vanduo

Žalias vanduo (angl. *raw water*) yra paimamas iš miesto vandentiekio ir siunčiamas į žalio vandens saugyklą. Žalio vandens vartotojai surašyti 4 lentelėje.

4 lentelė. Žalio vandens suvartojimas

Vartotojas	Maksimalus kg/s	Normalus kg/s
Vandens gerinimo stotis	7,8	3,9
Dūmų valymo stotis	10	0
Katilas	13,1	1,4
Drenažas	10	0,5
Jėgainės nuotekų talpa	10	0
Viso	50,8 (daugiausia vienu metu 30)	6,2

Normaliomis sąlygomis vandens suvartojimui naudojamas vienas 30 kW, 15 l/s siurblys. Esant didesniai žalio vandens suvartojimui įsijungia antras siurblys. Normalaus darbo metu slėgis už siurblių siekia apie 5 bar. Nuotekų talpos iškrovimo temperatūra yra atvėsinama žalio vandens iki 45 °C [19].

### 2.4.2. Pagerintas vanduo

Pagerintas vanduo (angl. *make-up water*) – tai demineralizuotas vanduo, pagamintas vandens gerinimo stotyje iš žalio miesto vandens. Ši sistema skirta kaupti ir paskirstyti vandenį Kauno

elektrinės poreikiams paleidimo bei normalaus darbo režimų metu. Vanduo yra pumpuojamas iš pagerinto vandens talpos dviem siurbliais šiems vartotojams:

- paduodamo vandens talpai;
- SNCR įpurškimui;
- kuro bunkerui;
- glikolio talpai;
- centralizuoto šildymo sistemai;
- pastato šildymo sistemai;
- vakuuminei sistemai;
- ėminių sistemai.

Pagrindinis vartotojas – tai maitinamo vandens talpa, kuri yra pastovus vartotojas. Kiti pastovūs vartotojai yra selektyvaus nekatalizinio redukavimo (toliau SNCR) įpurškimas bei ėminių sistema. Likę vartotojai naudoja vandenį tik užpildymo metu. Katilo išleidimo vandens aušintuvas ir garų kondensatorius yra taip pat įtraukti į pagerinto vandens katilo sistemą. Šie vartotojai surašyti 5 lentelėje

**5 lentelė.** Katilo išvalyto vandens sunaudojimas

Katilo vartotojas	Maksimalus srautas, kg/s	Normalus režimas, kg/s
Padavimo vandens talpa SNCR įpurškimas Kuro bunkeris Chemikalų dozavimo stotis	3,5	1,5

Pagerinto vandens slėgis už siurblių valdomas dažnio keitikliais. Numatytas slėgio užduotis yra mažiausiai 4 bar didesnė, nei slėgis padavimo vandens talpoje. Numatoma paduodamo vandens temperatūra yra 50 °C. Dažnio keitikliams turi būti numatytas minimalus sukimosi darbinis greitis [17].

## 2.5. Oro pašildymas ir padavimas

Oro šildytuvų numatoma temperatūra 150–155°C, palaikomas slėgis nuo 2,7 iki 3,7bar, o srautas – apie 1,75 kg/s.

## 2.6. Vėdinimo sistema

Pagrindinė sistemos funkcija yra perimti šilumą iš įvairių sistemos vartotojų į uždara vandens grandinę, kurioje šiltas vanduo yra atvėsinamas šilumos perdavimo būdu į orą.

Sistemos vartotojai:

- ėminių aušintuvai;
- vakuuminės sistemos aušintuvai;
- generatoriaus aušintuvai;
- tepalo aušintuvai;
- grotų aušintuvai.

Vėsinimo vanduo yra pumpuojamas vienu iš dviejų siurblių iš bendro grįžtančio vartotojų vamzdžio per oru vėsinamus šilumokaičius į paskirstymo liniją. Perteklinės šilumos atsikratymui

iš uždaros vėsinimo sistemos yra skirtas atšakojimas, vedantis šilumą į šiukšlių kaupimo bunkerio šildymą. Vėsinimo vanduo yra paskirstomas vartotojams iš pagrindinės linijos. Iš vartotojų sušilęs vanduo yra paduodamas į gražinimo liniją. Šiuos siurblius yra galimybė naudoti per išvalymo liniją net nesant jokiame vartotojų poreikiui.

Pastovaus hidrostatinio slėgio palaikymui yra naudojama išsiplėtimo talpa, prijungta prie siurblių siurbiamosios pusės [14].

## 2.7. Suspaustas oras

Suspausto oro sistemos funkcija yra tiekti aukštos kokybės aukšto slėgio orą (instrumentinį ir darbinį orą) elektrinės vartotojams, atitinkant jų slėgio reikalavimus. Sistema yra aprūpinta suspausto oro imtuvais ir 5 m<sup>3</sup> talpos vamzdynu, kurie stabilizuoja oro suvartojimą.

Suspaustas oras yra tiekiamas trimis oro kompresoriais. Oro sausintuvai sumontuoti už kompresorių. Linijos susikerta prieš oro sausinimo blokus, todėl tai leidžia naudoti bet kokią kombinaciją tarp kompresorių ir oro sausinimo bloką.

Suspausto oro imtuvai yra sumontuoti paskirstymo vamzdyje už oro sausinimo bloką. Instrumentinio oro paskirstymo vamzdis nueina žiediniu vamzdžiu į katilo patalpą, o vėliau suspaustas oras paskirstomas kitiems vartotojams: į dūmų šalinimą, vandens gerinimo stotį, katilą bei turbiną.

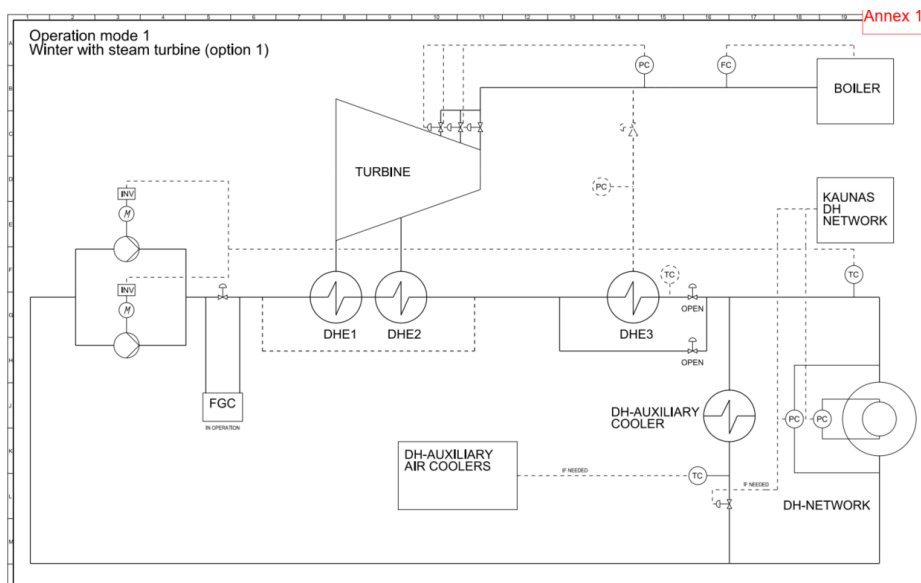
Darbinis suspaustas oras vartotojams tiekiamas iš paskirstymo linijos prieš žiedinį vamzdį. Vandens gerinimo stotis, katilas, turbinos patalpa, pagalbinė patalpa, šiukšlių bunkeris, dirbtuvės ir šiukšlių priėmimo patalpa yra darbinio oro vartotojai.

Darbinio oro paskirstymo vamzdis yra paimamas iš instrumentinio oro vamzdžio ir izoliuojamas pneumatiniu uždarymo vožtuvu (angl. *shut-off valve*), kuris bus uždarytas, jei slėgis nukris instrumentinio oro tinkle [15]. 6 lentelėje surašyti aukšto slėgio oro vartotojai ir jų vartojamas srautas.

**6 lentelė.** Suspausto oro vartotojai

Vartotojas	Maksimalus srautas, [Nm <sup>3</sup> /min]	Nominalus srautas, [Nm <sup>3</sup> /min]
Katilas	17	12
Dūmų šalinimas (FGT)	20	3,45
Turbina	0,03	0,02
Kiti: Vandens gerinimo stotis Šiukšlių bunkeris Kuro priėmimo patalpa Darbinė patalpa Pagalbinė patalpa	0,8	0,03
Viso	37,1	15,5

## 2.8. Centralizuotas šildymas



9 pav. Kauno jėgainės centralizuoto šildymo schema [11]

Centralizuoto šildymo (angl. *DH* – *district heating*) sistemos paskirtis yra paskirstyti vandenį sistemoje ir tiekti karštą vandenį į elektrinės pastato bei Kauno miesto šilumos tinklus žiemos bei vasaros sezonais [4]. Kaip matoma 9 paveikslėlyje, sistemą sudaro 2 siurbliai su filtrais, kurie apsaugo įrangą nuo įrenginius nuo šiukšlių. Pagrindiniai yra laikomi pirmas ir antras šilumokaičiai, tačiau kartais, dirbant turbinai, gali būti įjungtas ir trečias šilumokaitis, pridodantis dar daugiau šilumos. Lygiagrečiai sistemos yra pajungiama vandens vėsinimo įranga, kuri suveikia, jei šilumos pagaminimas viršija Kauno miesto šilumos suvartojimą [16].

## 2.9. Katilo sistemos aprašymas

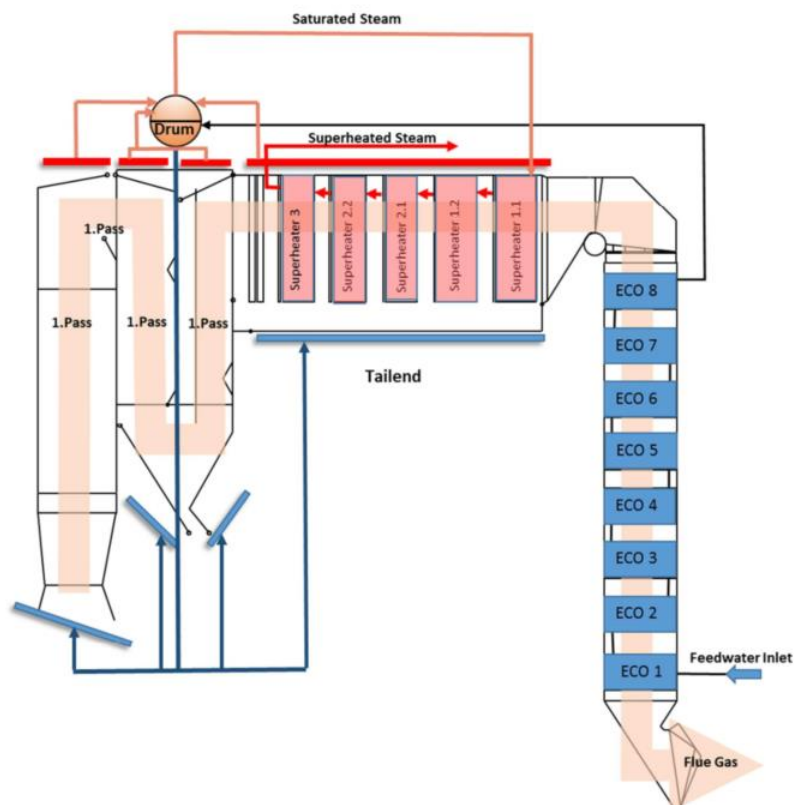
Visas katilo dūmų ciklas katilė atvaizduojamas 10 paveikslėlyje. Degimo metu susidarę dūmai keliauja į krosnį (angl. *furnace area*) ir į spinduliavimo perėjimą (angl. *radiation passes*) (1,2,3). Čia karštis perduodamas iš dūmų į kaitinimo plokštes (membraninę sieną), daugiausia pasitelkiant spinduliuojančios šilumos mainus. Visos membraninės katilo šildymo sienos yra sukurtos kaip garintuvo kaitinimo paviršius, veikiantis natūralia cirkuliacija.

Geras išmetimo dujų ir degimo oro maišymas krosnyje yra pasiekiamas pučiant antrinį orą į viršutinę angą degimo kameroje. Tam tikslui abejos krosnies priekinės ir galinės sienos yra su oro purkštukais, surikiuotais dviem eilėmis vienas virš kito.

Dūmams išėjus iš antro katilo praėjimo (angl. *boiler pass 2*) jie patenka į horizontalų ketvirtą katilo perėjimą (angl. *tailend*). Čia karštis perduodamas daugiausia konvekcijos būdu. Šioje skiltyje yra sumontuoti superšildytuvai (angl. *superheater*) ir garintuvai (angl. *evaporators*).

Dūmams išėjus iš ketvirto katilo perėjimo toliau keliauja iš viršaus į apačią per vertikalų ekonomizerio perėjimą su metaliniais korpuso lakštais, turinčiais keletą šilumokaičio pluoštų. Dūmų ortakiuose yra sumontuoti matavimo prietaisai dūmingumui nustatyti [22].





10 pav. Garo katilo sistema

Prisotintas garas iš katilo būgno toliau keliauja į superšildytuvą. Garo temperatūra tarp individualaus superšildytuvo ir gyvo garo temperatūros yra kontroliuojamas purkštukų matuokliais su maitinamo vandens įpurškimu. Garui praėjus paskutinį superšildytuvą gyvas garas palieka katilą ir yra tiekiamas turbinos blokui. Katilo operatoriaus valdymo ekranas pavaizduotas 6 priede, o 7 lentelėje surašyta elektrinės garo specifikacija iš dokumentacijos.

7 lentelė. Pagrindiniai garo katilo duomenys [20]

Parametras	Vertė
Garų produkcija esant 100% apkrovai	107 t/h
Maksimalus leidžiamas garo katilo generavimas	114,5 t/h
Maksimalus leidžiamas darbinis slėgis	92 bar
Maksimali prisotinta garo temperatūra	306 °C
Maitinamo vandens temperatūra	130 °C
Garų slėgis katilo išėjime	75 bar
Garų temperatūra katilo išėjime	450 °C

## 2.10. Selektyvus nekatalizinis redukavimas

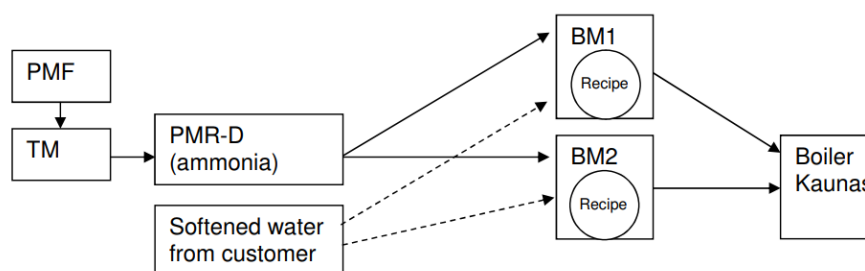
SNCR – tai selektyvus nekatalizinis redukavimas (angl. *Selective Non-Catalyst Reduction of Nitrogen Oxides (NOx)*), paverčiant juos į atominį azotą (N<sub>2</sub>) ir vandenį reagentų (bevandenių amoniaku, vandeniniu amoniaku arba karbamido) pagalba.

SNCR procesas turi atitikti šias sąlygas, jei norima pasiekti gerą rezultatą:

- temperatūra turi būti šiuose režimuose:
  - 850 – 1000 °C, jei reagentai yra bevandenis amoniakas arba amoniako vanduo;
  - 950 – 1050 °C, jei reagentas yra karbamidas (angl. *urea*).
- geras reagentų paskirstymas, kuris padengtų visą katilo erdvę;
- turi būti pakankamai laiko reikiamoje temperatūroje, kad pilnai įvyktų reakcija.

SNCR instaliavimo tikslas yra palaikyti NO<sub>x</sub> emisijas leidžiamuose režimuose ir užtikrinti, kad amoniako nesuvartojimas (angl. *ammonia slip*) būtų kuo mažesnis ar net žemiau ribos. SNCR sistema gali būti sudaryta iš skirtingų posistemų, vadinamų moduliais, pavaizduotų 11 paveiksle:

- užpildymo modulis (angl. *PMF – Pump module fill*) – pripildo talpas reikalingu reagentu;
- talpos modulis (angl. *TM – Tank Module*) – kaupia reagentą 60 m<sup>3</sup> talpoje;
- reagentų siurblių modulis (angl. *PMR – Pump module Reagent*) – tiekia reikiamo slėgio ir srauto reagentą į maišymo modulius (BM);
- vandens siurblių modulis (angl. *PMW – Pump module Water*) – tiekia reikiamo slėgio ir srauto vandenį į maišymo modulius (BM);
- maišymo modulis (angl. *BM – Blending Module*) – vienas arba keli moduliai, kuriuose reikiamomis proporcijomis maišomi reagentas ir vanduo. Gauta mišinys tiekiamas į purškimo modulį (angl. *IM – Injector Modules*) [24].



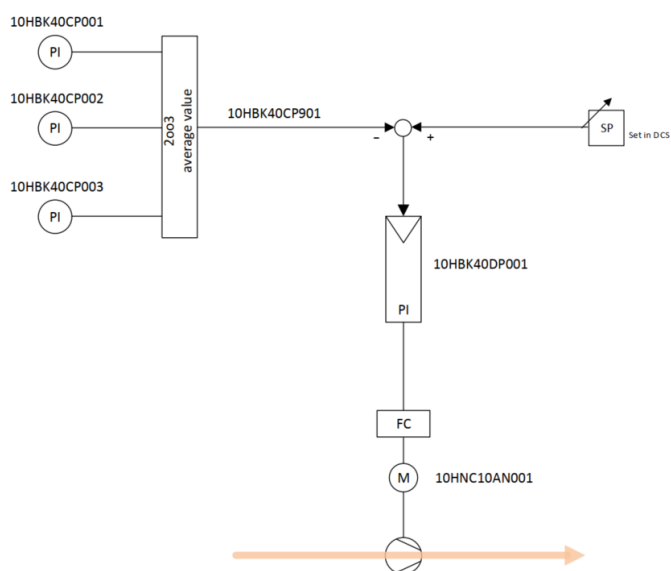
11 pav. Kauno elektrinės SNCR diagrama

## 2.11. Dūmų šalinimas

Dūmų šalinimas (angl. *FGT – Flue Gas Treatment*) tai dar viena svarbi sistemos dalis, reikalinga bendram proceso veikimui bei sistemos efektyvumui gerinti. Išėjus iš katilo dūmai patenka į dūmų šalinimo sistemą per sujungtą išmetamųjų dujų kanalą. Pirmiausia dūmai patenka į reagento įpurškimo kanalą, kur yra palaikoma aukšta turbulencija su reagentais (hidratuotos kalkės (angl. *hydrated lime*) ir aktyvinta anglis (angl. *activated carbon*)) ir iš karto po to yra recirkuliuojamos su liekanomis iš filtro. Tokios sąlygos optimizuoja teršalų pašalinimą ir formuoja panašias į dulkes produktus.

Dulkes nešantys dūmai tuomet patenka į filtrą, kur yra išsikraunama nuo dalelių, kurių liko pelenuose. Didelė dalis filtru pašalintų liekanų yra gražinama į reakcijos kanalą. Galiausiai dūmai patenka į šlapią sistemą, kurioje yra užgesinami drėkinant vandens garais ir atvėsunami.

Vienas svarbiausių katilo degimo procese valdomų parametrų – tai slėgis degimo kameroje. Šį darbą atlieka traukos ventiliatorius (angl. *Induced draught fan*), kuris palaiko neigiamą slėgį dūmų išėjime. Šiam valdymui naudojamas PI kontroleris užduotą vertę gauna iš operatoriaus, o realią vertę ima iš trijų slėgio matuoklių, imant jų vidurkį. Gautas kontrolerio išėjimas valdo dažnio keitiklį ir traukos ventiliatorių. Traukos ventiliatoriaus valdymo schema pavaizduota 12 paveiksle.



**12 pav.** Degimo kameros slėgio valdymas

Vanduo, pagamintas dūmų kondensavimo metu, yra neutralizuojamas natrio hidroksidu (angl. *caustic soda*) prieš išmetimą.

Tuomet dūmai išeina iš dūmų šalinimo sistemos per kaminą. Jungiamasis kanalas yra aprūpintas įvairiais dūmų analizatoriais, kurie kontroliuoja dūmų šalinimą ir matuoja emisijas.

Dūmų sudėtis yra apribojama naudojant hidratuotas kalkes, kurios neutralizuoja rūgštines dujas, aktyvinta anglis atskiria sunkiuosius metalus ir nuodingus organinius junginius. Hidratuotos kalkės yra gaminamos pačioje elektrinėje, naudojant negesintas kalkes, ir tuomet jos perkeliamos į siloso sandėlį. Esant sistemos gedimui gesintos kalkės gali būti perkeliamos sunkvežimiu.

Negesintos kalkės, hidratuotos kalkės ir aktyvinta anglis yra laikomos siloso sandėliuose ir naudojamos išmetimo dūmų sistemoje priklausomai nuo poreikių. Kaustinė soda yra laikoma tam skirtoje talpoje ir paduodamos į drėgnąją dalį ir vandens gerinimą dozavimo siurbliais.

Liekanos, pagamintos dūmų išmetimo sistemoje, yra sumažinamos iki mažiausios įmanomos apimtys. Jos yra surenkamos ir laikomos sandėliuose iki jų išvežimo [25].

## **2.12. Vandens lygio reguliavimas būgne**

Esant normaliam režimui žemutinė katilo dalis yra pripildyta karštu vandeniu (apie 297 °C) pagal prisotinto garo kreivę. Viršutinė būgno dalis yra pripildyta prisotinto garo. Nominalus vandens lygis būgne numatytas apie 70 mm virš būgno centro linijos.

Būgno lygio valdymo tikslas yra palaikyti vandens lygį ribose esant įvairioms apkrovoms. Vandens lygio valdymo grandinė sudaryta iš lygio matuoklių, maitinamo vandens valdomų vožtuvų ir siurblių. Vandens lygis būgne matuojamas naudojant 3 lygių radarinius zondus. Esant lygio nukrypimams nuo lygio nuostato vandens lygis koreguojamas naudojant maitinamo vandens valdomus vožtuvus. Jei vožtuvas atsidarys, tuomet slėgis vožtuve nukris, todėl siurblių pagalba bus padidintas maitinimo vandens srautas, kuris palaikys slėgį valdomame vožtuve.

Jei lygis būgne yra per didelis, padidėja rizika, kad vandens lašukai gali išeiti kartu su garu. Tai gali sugadinti superšildytuvus bei turbiną. Būgno vandens lygiui pasiekus maksimumą atsidaro avarinis drenažas, kuris užsidarys iš karto, kai vandens lygis pasieks normalų.

Esant per mažai vandens būgne rizikuojama, kad katilo kaitinami paviršiai išdžius. Tokiu būdu galima negrįžtamai sugadinti vamzdynus. Katilo vandens lygis privalo būti stebimas ir esant lygiui žemiau minimumo katilas išjungiamas avariniu būdu.

Jėgainės katilo lygio palaikymo sistema pavaizduota 2 priede. Norimam lygio palaikymui naudojama sudėtinga valdymo sistema, kurioje naudojami du PI kontrolieriai. Pirmasis valdo padavimo vandens vožtuvų padėtį, atsižvelgdamas į būgno lygį, o antrasis valdo padavimo vandens siurblių su dažnio keitikliu, stebėdamas slėgio pokytį būgne.

## **2.13. Garo slėgio ir srauto palaikymo sistema**

Garų slėgio palaikymo sistema iš dokumentacijos pateikta 3 priede. Čia garas valdomas vožtuvu 10MAN10AA260, nukreiptu į centralizuoto šildymo tinklą. Čia yra matuojami garo srautas ir slėgis ir lyginama su užduotomis vertėmis. Taip pat sudaryta funkcija pasirinkti tarp slėgio ir srauto valdymo bei atliekami skaičiavimai tarp kelių lygiagrečių PI kontrolierių.

Garų srauto valdymas yra kiek paprastesnis, lyginant su slėgio ir vandens lygio valdymu. Čia yra lyginamas užduoties bei realaus garo srauto matavimas. Užduoties vertė šiek tiek koreguojama pagal garo slėgį. PI kontrolierio išduodamas signalas keliauja į kitą PI kontrolierį, kuris reguliuoja apkrovą. Tokia valdymo sistema vadinama kaskadine ir valdo garo srauto valdomą vožtuvą. Ši sistema iš elektrinės dokumentacijos pavaizduota 4 priede.

### 3. Kauno jėgainės garo katilo modeliavimas

Šis tyrimas yra aktualus tuo, jog būgno slėgio tiesioginio ryšio kompensatorius, nors ir numatytas katilo projekte, tačiau praktiškai nėra naudojamas. Todėl yra aktualu ištirti suderintos sistemos veikimo efektyvumą ir atitikimą valdymo kokybei keliamiems reikalavimams. Katilo būgno technologinė schema pavaizduota 1 priede. Ja naudojantis sudaromas sistemos modelis.

#### 3.1. Perdavimo funkcijų radimas

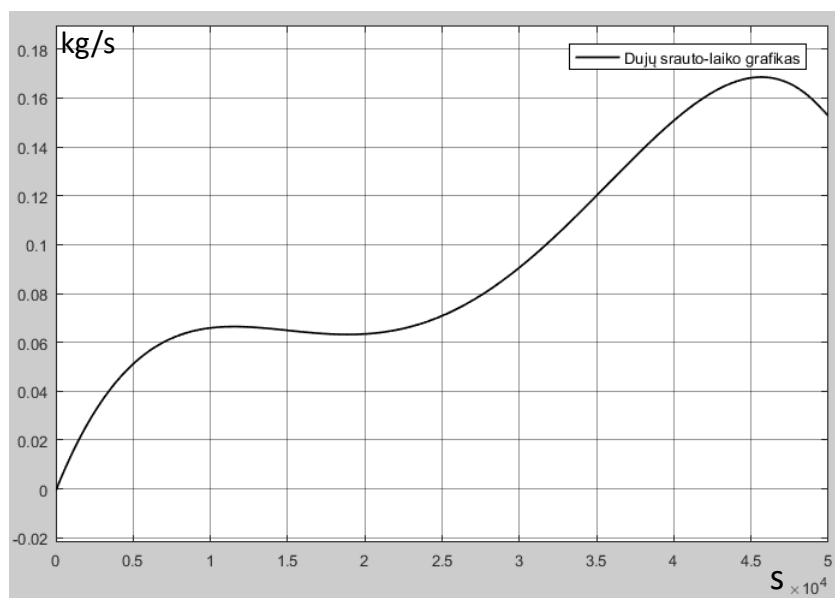
Jėgainės katilo būgno modeliui sudaryti naudojama katilo perdavimo funkcija su tiesioginio ryšio reguliatoriumi. Modelio dalis pavaizduota jau teorinėje dalyje išanalizuotame 4 paveiksle.

Šiame modelyje proceso įėjimą sudaro dvi dedamosios – nuostato signalas, šiuo atveju, dujų srautas bei trikdžio kompensatoriaus signalas. Toliau bus ieškomos dujų srauto – būgno slėgio bei turbinos slėgio – būgno slėgio perdavimo funkcijos.

Kadangi su veikiančiu katilu nėra galimybių atlikti tipinių šuolinės reakcijos eksperimentų, naudojamų perdavimo funkcijų nustatymui, dėl to tyrime naudojamos informatyvios technologinių parametrų kitimo kreivės katilo pasirinktų procesų metu. Originalūs elektrinės duomenys, naudojami šiame tyrime, pavaizduoti 7 priede.

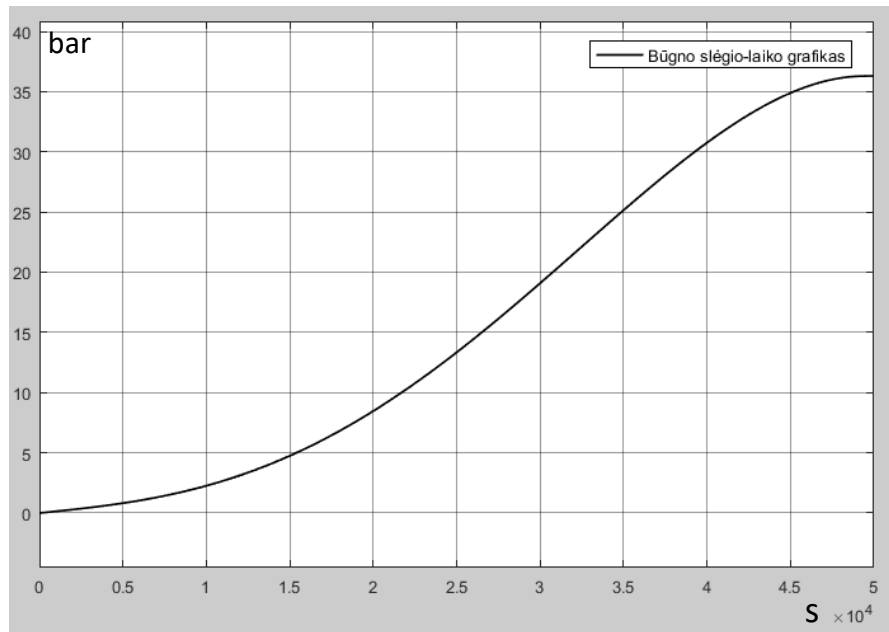
##### 3.1.1. Dujų srauto – būgno slėgio perdavimo funkcija

Šiai perdavimo funkcijai rasti bus naudojami realūs elektrinės duomenys sistemos paleidimo metu. Tuo laikotarpiu yra deginamos tik grynos dujos bei fiksuojamas slėgio pokytis būgne. Pagal šiuos duomenis randama perdavimo funkcija „bandymų–klaidų“ metodu.



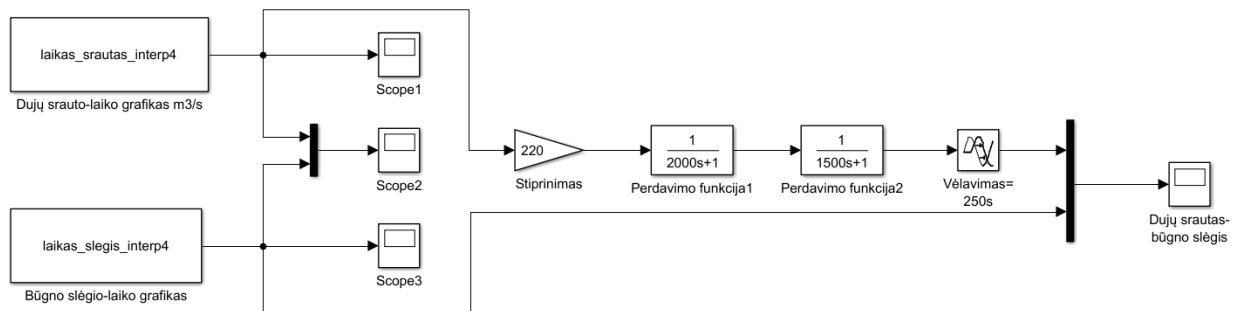
13 pav. Pradiniai dujų srauto laike duomenys

Dujų srauto grafikas 13 paveiksle nėra tiesiškas. Sistemos paleidimo metu vykstant įsisotinimui tenka pareguliuoti dujų srautą. Tiesiškumas prasideda nuo maždaug 25000 sekundės ir tęsiasi iki 45000 sekundės, kai yra pasiekiamas reikalingas būgno slėgis ir pamažu pereinama prie šiukšlių deginimo.



**14 pav.** Pradiniai būgno slėgio duomenys laike

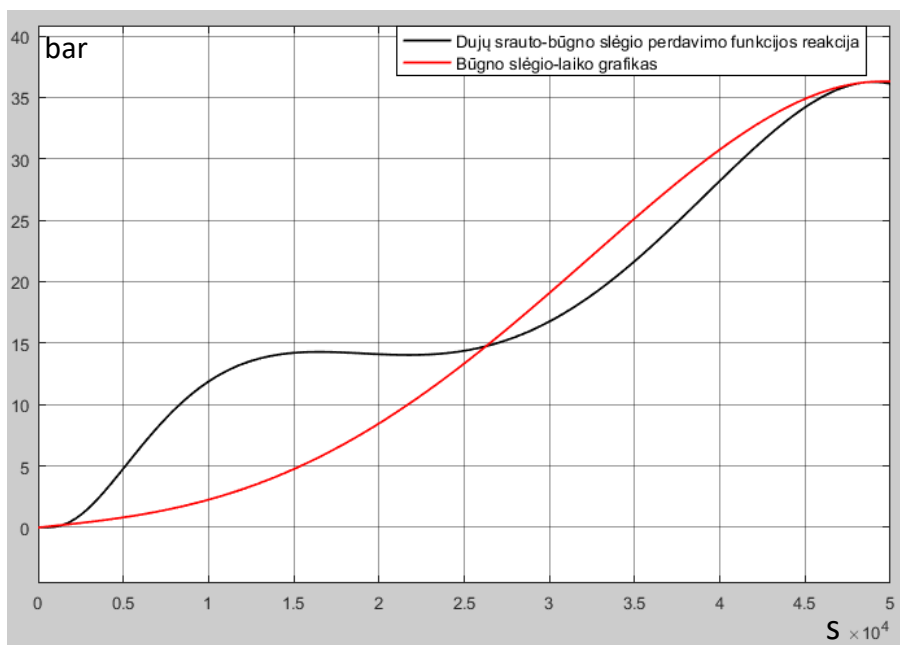
14 paveiksle būgno slėgis tolygiai didėja, iki kol pasiekiamas maždaug 37 barų slėgis. Tuomet pereinama prie šiukšlių deginimo, dėl kurio, persijungiant kuro rūšiai, šiek tiek slėgio kilimas sulėtėja.



**15 pav.** Dujų srauto – būgno slėgio perdavimo funkcija

Duomenys iš elektrinės yra išsaugomi *Microsoft Excel* formatu ir naudojami *Matlab* darbo aplinkoje. Atlikus tam tikrus skaičiavimus ir nustatymus duomenys perduodami į *Simulink* programinę aplinką.

15 paveiksle esančioje schemoje sumodeliuotas dujų srauto grafikas įeinantis į perdavimo funkciją. Tuomet lyginamas perdavimo funkcijos išėjimas su būgno slėgio grafiku. Perdavimo funkcija pasirinkta antros eilės su vėlavimu, o parametrai randami „bandymų – klaidų” metodu.

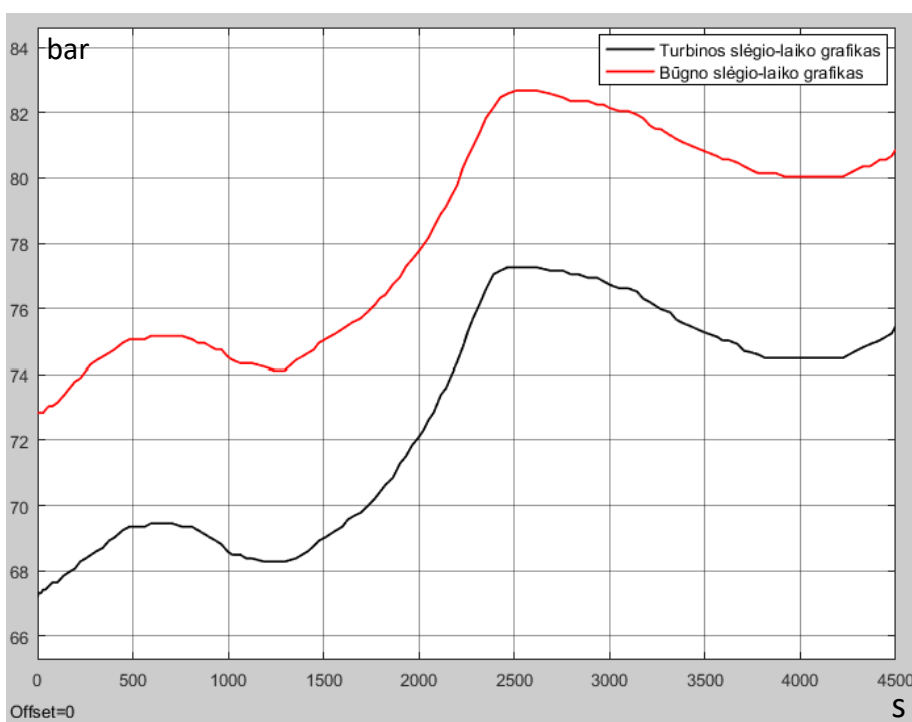


16 pav. Perdavimo funkcijos adekvatumas

Lyginami grafikai ir gautas maksimalus įmanomas sutapimas 16 paveiksle. Dėl proceso įsisotinimo trukmės pirmoji perdavimo funkcijos banga nėra nuslopinama ir į ją nėra atsižvelgiama. Siekiama, kuo labiau sutapatinti grafikų pabaigą.

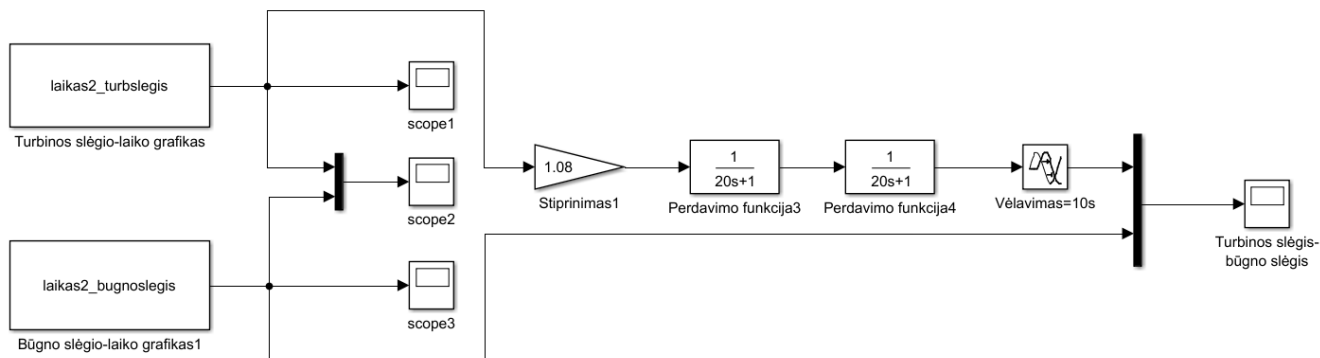
### 3.1.2. Turbinos slėgio – būgno slėgio perdavimo funkcija

Šiai perdavimo funkcijai rasti naudojamas laikotarpis, kuomet vyksta didžiausias turbinos trikdys katilo būgnui. Šis metodas efektyviausiai padeda nustatyti pereinamąjį procesą.



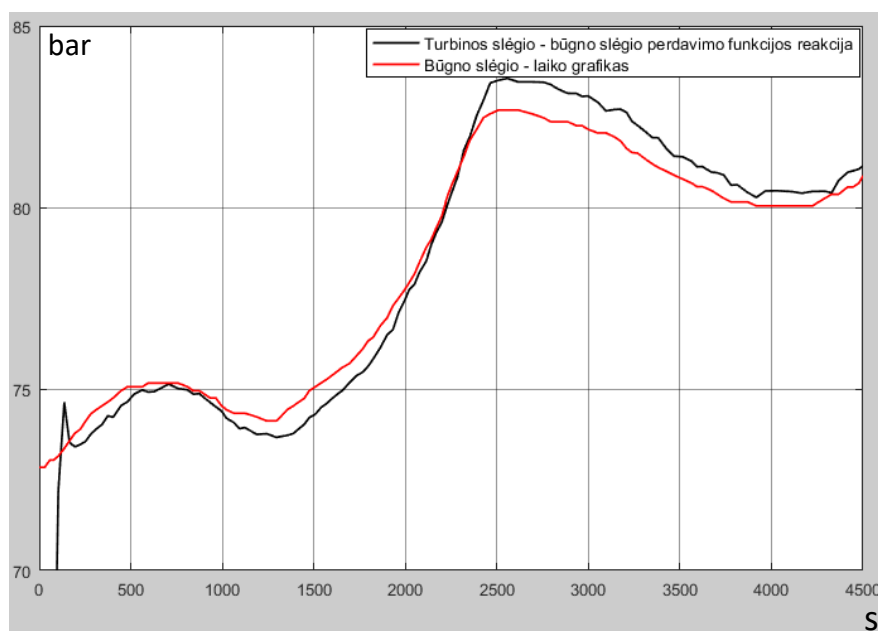
17 pav. Pradiniai turbinos ir būgno slėgių grafikai

Pagal 17 paveikslą matoma, kad slėgis būgne visą pereinamąjį laikotarpį yra apie 5 bar didesnis. Taip nutinka dėl nuostolių, kurie patiriami, kol garas patenka iš būgno į turbiną. Be to, dalis garo gali būti atiduodamas į šiluminius Kauno miesto tinklus.



**18 pav.** Gauta turbinos slėgio – būgno slėgio perdavimo funkcija

Gauta analogiška schema ir nustatyti parametrai, matomi 18 paveiksle. Į perdavimo funkciją paduodamas turbinos slėgio grafikas ir išėjimas lyginamas su būgno slėgio grafiku. Gauti rezultatai vaizduojami 19 paveiksle. Jame matomas geras grafikų sutapimas, todėl galima teigti, kad rasta tinkama perdavimo funkcija, aprašanti turbinos slėgio trikdžio įtaką katilo būgnui.



**19 pav.** Perdavimo funkcijos adekvatumas

### 3.2. Sistemos modeliavimas

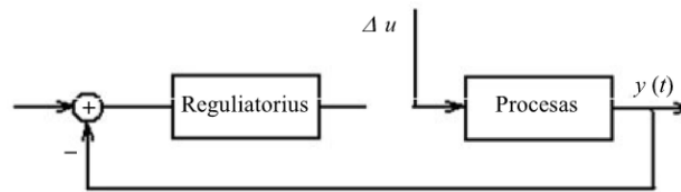
Šioje dalyje aprašoma sistemos modeliavimo eiga.

#### 3.2.1. Vienkontūrės schemos tyrimas

Norint sumodeliuoti sistemą ir ją suderinti pirmiausia reikia proceso perdavimo funkciją paversti į pirmos eilės su vėlavimu perdavimo funkciją. Tai yra atliekama tiriant vienkontūrę sistemą.



20 paveiksle vaizduojama vienkontūrė principinė schema, kuria naudojantis tiriamos proceso ir trikdžio sistemos.



**20 pav.** Vienkontūrės sistemos tyrimo schema

Toliau sistemos tiriamos Smith'o metodu. Tam reikalinga surasti kreivėje 2 taškus:

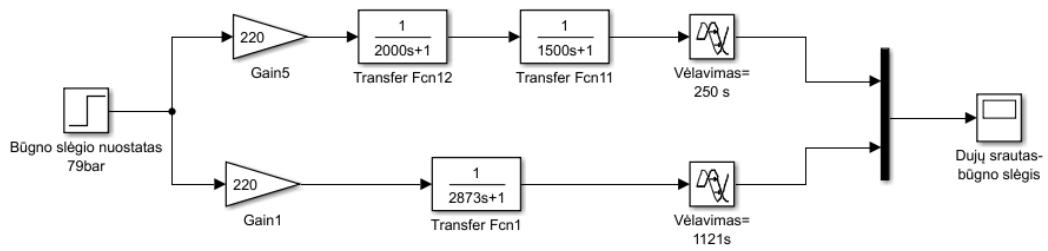
- $y(t_1) = 0,283 * y(\infty)$ ;
- $y(t_2) = 0,632 * y(\infty)$ .

Procesas (dujų srautas)	Trikdis (turbinos slėgis)
$t_1 := 2078$	$t_3 := 31.022$
$t_2 := 3993$	$t_4 := 52.924$
$K_{pr} := 220$	$K_d := 1.08$
$T_{pr} := \frac{3}{2} (t_2 - t_1)$	$T_d := \frac{3}{2} (t_4 - t_3)$
$\tau_{pr} := t_2 - T_{pr}$	$\tau_d := t_4 - T_d$
$T_{pr} = 2872.5$	$T_d = 32.853$
$\tau_{pr} = 1120.5$	$\tau_d = 20.071$

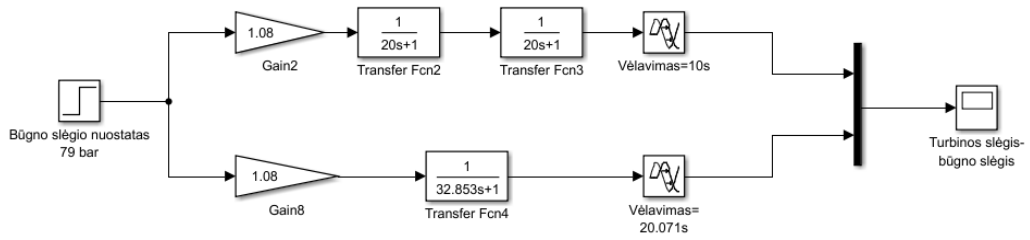
**21 pav.** Vėlinimo ir laiko pastoviųjų skaičiavimas

21 paveiksle įkelti skaičiavimai iš *Mathcad* programinės įrangos. Rastos proceso ir trikdžio  $y(t_1)$  ir  $y(t_2)$  vertės. Stiprinimo koeficientai paliekami tie patys. Laiko ir vėlavimo pastoviosios randamos pagal  $T_{pr}$ ,  $T_d$  ir  $\tau_{pr}$ ,  $\tau_d$  formules.

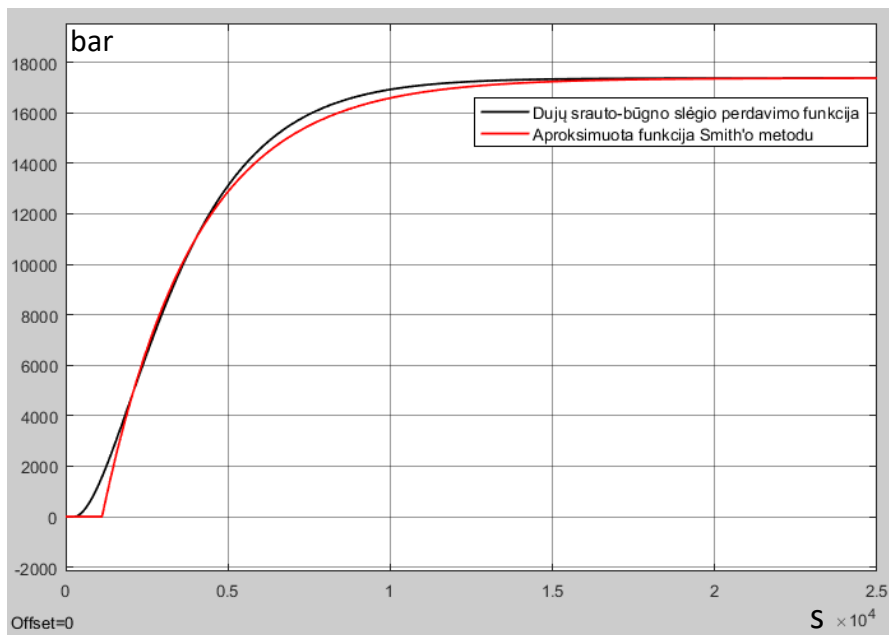
Gauti parametrai yra statomi į pirmos eilės su vėlavimu perdavimo funkciją ir lyginami rezultatai su originalia perdavimo funkcija. 22 paveiksle sudaryta ir tikrinama dujų srauto aproksimuota perdavimo funkcija, o 23 paveiksle – turbinos slėgio aproksimuota perdavimo funkcija. 24 ir 25 paveiksluose atvaizduoti perdavimo funkcijų palyginimai.



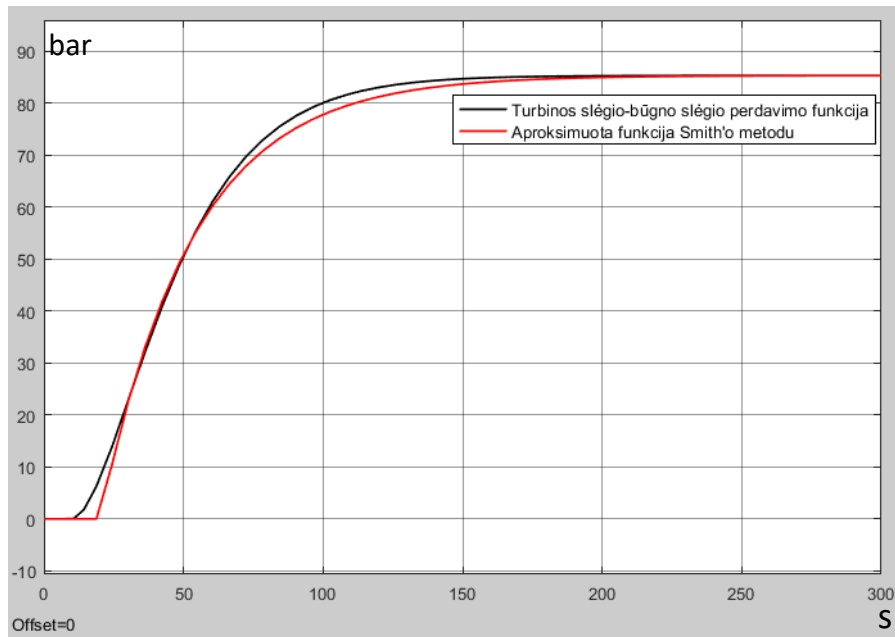
22 pav. Dujų srauto – būgno slėgio vienkontūrė ir aproksimuota perdavimo funkcijos



23 pav. Turbinos slėgio – būgno slėgio vienkontūrė ir aproksimuota perdavimo funkcijos



24 pav. Dujų srauto – būgno slėgio aproksimuotos funkcijos adekvatumas



25 pav. Turbinos slėgio – būgno slėgio aproksimuotos funkcijos adekvatumas

Palyginus vienkontūres ir aproksimuotas perdavimo funkcijas matoma, kad grafikai yra beveik identiški, todėl teigiama, jog aproksimacijos atliktos teisingai.

### 3.2.2. Grįžtamojo reguliatoriaus derinimas

Naudojant aproksimuotą proceso perdavimo funkciją galima rasti PID reguliatoriaus parametrus. 26 paveiksle įkelti skaičiavimai iš *Mathcad* skaičiavimo aplinkos, kurioje pagal ITAE (angl. *Integral Time Absolute Error*) trikdžio reguliavimo taisyklės yra apskaičiuojami P, I ir D parametrai.

ITAE taisyklės pagal trikdžio reguliavimą

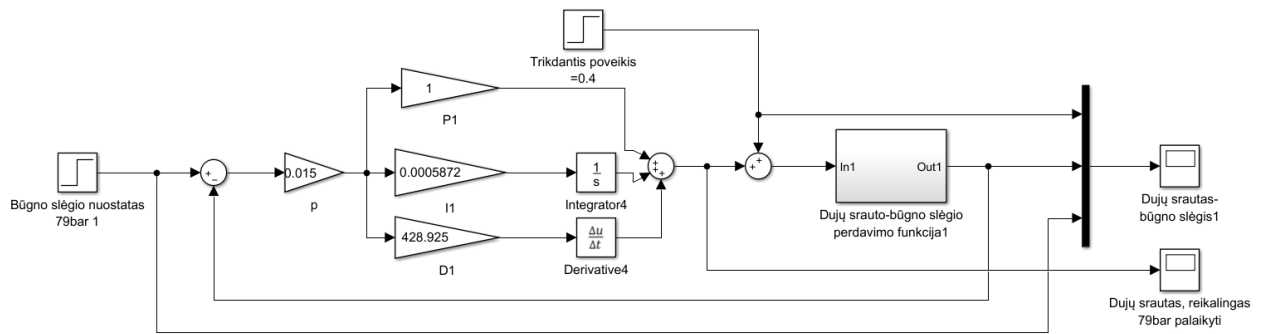
$$K_r := \frac{1.357}{K_{pr}} \cdot \left( \frac{T_{pr}}{\tau_{pr}} \right)^{0.947} \quad T_i := \frac{T_{pr}}{0.842} \cdot \left( \frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right)^{0.738} \quad T_d := 0.381 \cdot T_{pr} \cdot \left( \frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right)^{0.995}$$

$$K_r = 0.015$$

$$T_i = 1703.013 \quad \frac{1}{T_i} = 0.001$$

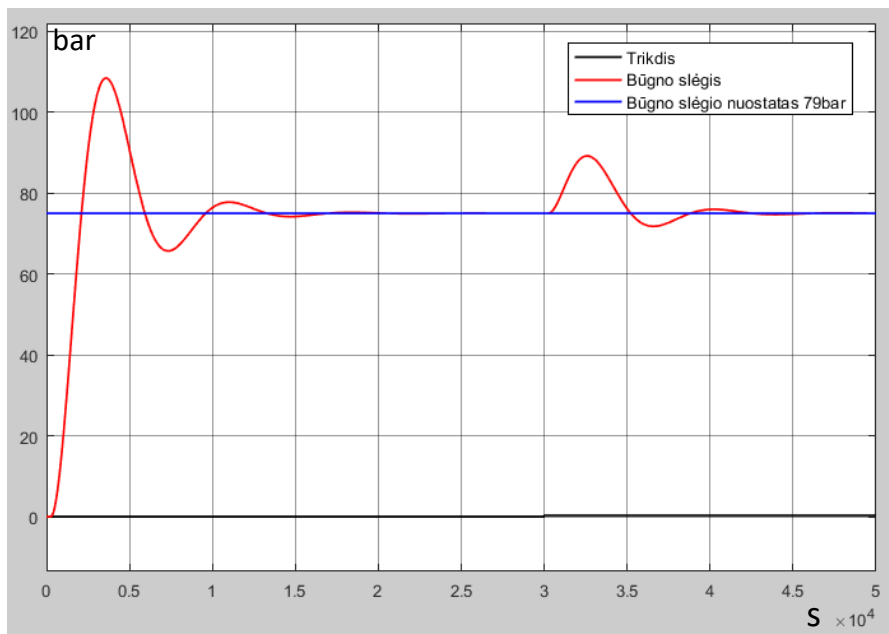
$$T_d = 428.925$$

26 pav. PID parametų skaičiavimai



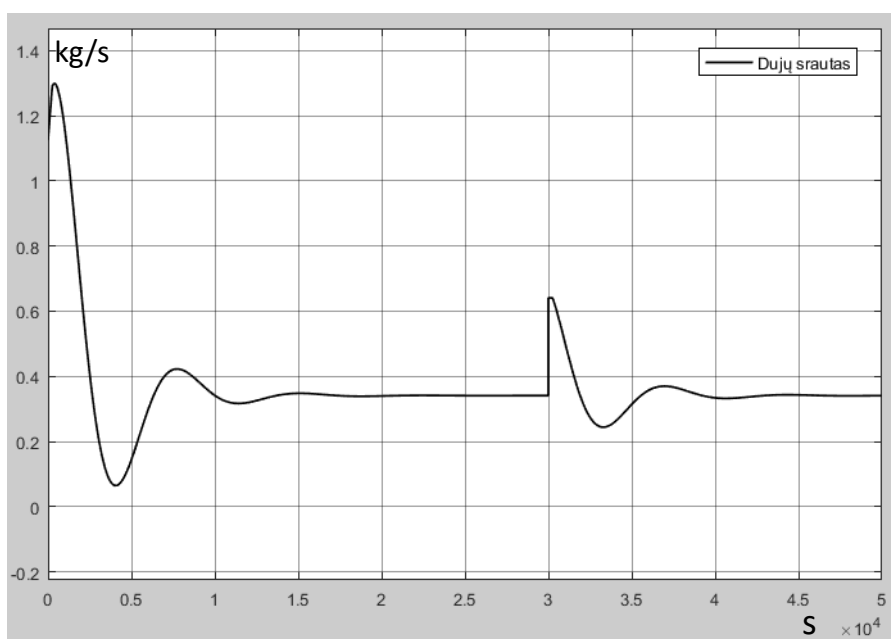
27 pav. Modelis su PID reguliatoriumi

Iš gautų reguliatoriaus parametrų sudaroma pirmoji katilo valdymo sistema, kuri matoma 27 paveiksle. Slėgio nuostatas pagal dokumentaciją yra palaikomas 79 bar. Procesui nusistovėjus 30000 sekundę įvedamas 0.4 bar trikdžis. Stebima, kaip nusistovi sistema.



28 pav. Būgno slėgio valdymas

28 paveiksle matomas sistemos pradinė reakcija į šuolinį įėjimą ir reakcija į trikdį. Matoma, kad sistema gerai susitvarko su užduotu trikdžiu. Be to, slėgis neviršija nustatytų ribų. Svarbu paminėti, jog į proceso pradžią neatsižvelgiama, stebimas tik trikdžio reguliavimas, nes PID reguliatoriaus parametrai yra apskaičiuoti ne nuostato pokyčiui, o trikdžio poveikiui reguliuoti.



**29 pav.** Dujų srautas, reikalingas palaikyti 79 bar būgno slėgį

Norint parinkti tinkamą šiuokščių srautai sistemos modeliui iš pradžių reikia rasti tokį dujų srautą, kuris palaikytų užduotą 79 bar slėgį. Būtent tai matoma 29 paveiksle. Rasta, jog tam reikalingas  $0,341 \text{ m}^3/\text{s}$  srautas.

Kaip žinoma, sistemoje naudojami ne  $\text{m}^3/\text{s}$ , o  $\text{kg}/\text{s}$  matavimo vienetai, todėl išsiaiškinta, jog norint konvertuoti natūralių dujų srautą, reikia padauginti iš koeficiento = 1,8315. Gaunamas  $0,6245 \text{ kg}/\text{s}$  dujų srautas. Šiuokščių srautas pagal šiuos duomenis bus perskaičiuotas kitame etape.

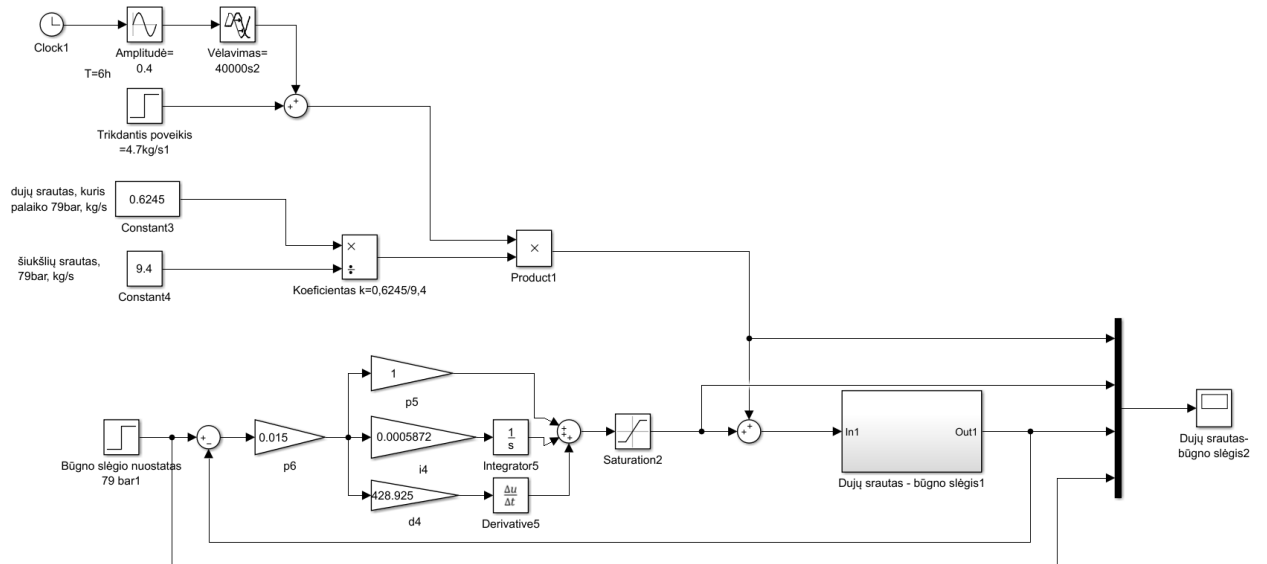
### 3.2.3. Sistemos derinimas pagal kintantį šiuokščių srautą ir kaloringumą

Sekantis modelio tyrimo etapas – būgno slėgio reguliavimo reakcija į kintantį šiuokščių srautą. Ją sudaro pradinė trikdžio schema, kurioje užduodamas pastovus šiuokščių srautas į katilą, bei pridamas trikdys – šiuokščių srautas.

Svarbu paminėti, jog šiuokščių maksimalus srautas buvo paimtas iš dokumentacijos lygus  $9,4 \text{ kg}/\text{s}$ . Modeliuojamoje sistemoje užduodamas pastovus šiuokščių srautas į katilą yra  $4,7 \text{ kg}/\text{s}$ . Toks srautas pasirinktas todėl, jog esant didesniems turbinos trikdžiams, regulatorius nusistovi ties 0 reikšme, gaunamas įsisotinimas, kuris sumažina regulatoriaus efektyvumą.

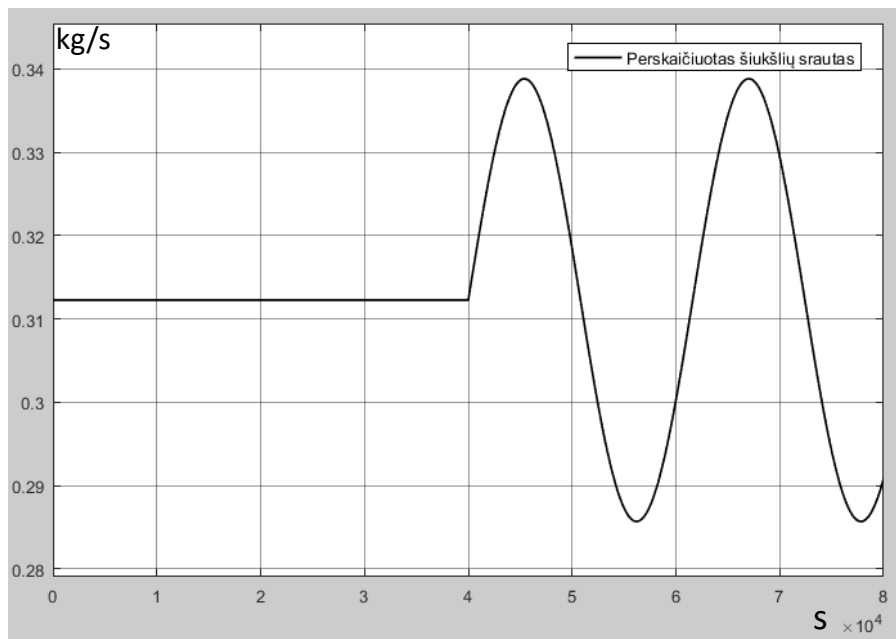
Kadangi regulatoriaus išėjimas (dujų srautas) ir šiuokščių srautas (trikdis) negali būti sumuojami, šiuokščių srautas yra padauginamas iš dujų–šiuokščių santykio koeficiento, reikalingo palaikyti 79 bar būgno slėgį. Tai reiškia, jog užduotas šiuokščių srauto trikdys turi būti padaugintas iš  $0,6245 \text{ kg}/\text{s}$  dujų srauto ir  $9,4 \text{ kg}/\text{s}$  šiuokščių srauto santykio koeficiento.

Dar vienas svarbus dalykas – tai šiuokščių kaloringumo įvertinimas. Atsižvelgiant į realius šiuokščių kalorijų duomenis (7 priedas) nuspręsta įvesti  $0,4$  amplitudės sinusinio signalo dedamąją, kuri imituos šiuokščių kaloringumo pokyčius. Tokia amplitudė parinkta todėl, jog tai yra maksimalūs svyravimai, kurie neišbalansuoja sistemos reguliavimo.

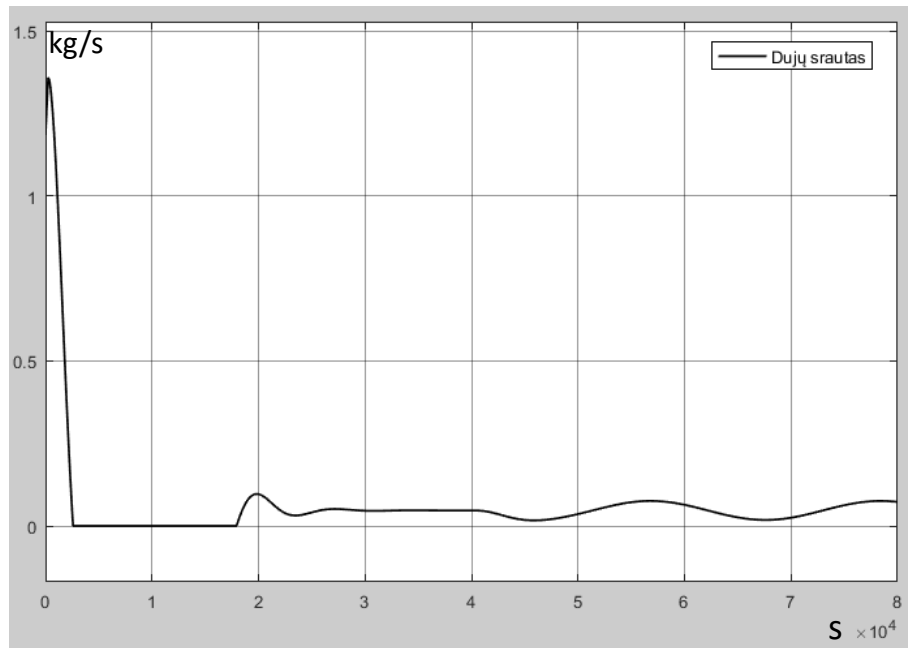


30 pav. Kuro reguliavimo schema

30 paveiksle matoma sumodeliuota sistema, reguliuojanti slėgį pagal šiuokšlių kaloringumo pokyčius. Kaloringumas imituojamas 31 paveiksle, kuris įvedamas nuo 40000 sekundės su sinusinio signalo dedamąja.

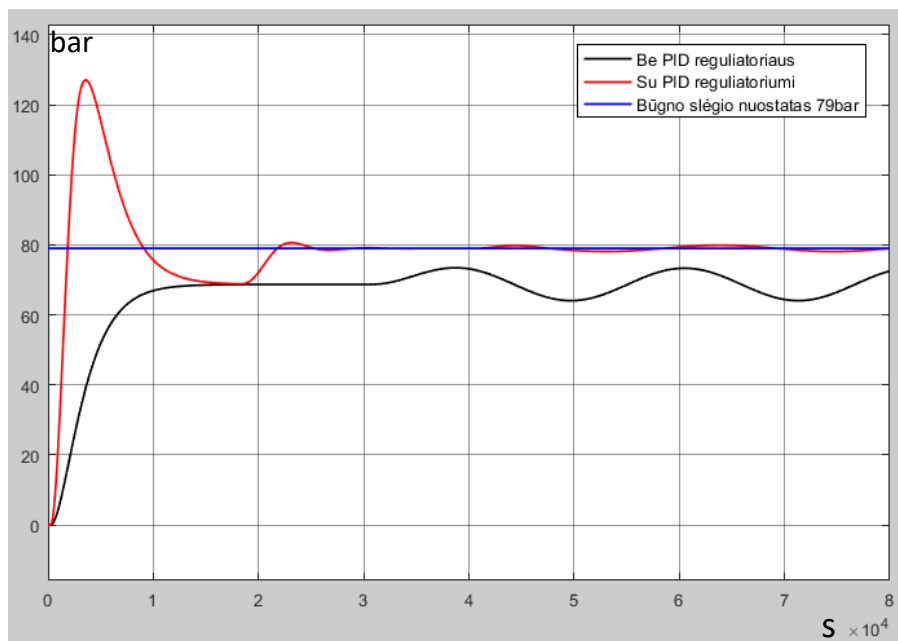


31 pav. Užduotas perskaiciuotas šiuokšlių srauto trikdys



**32 pav.** Paduodamas dujų srautas į katilą esant trikdžiui

32 paveiksle matomas dujų srauto tiekimas į katilą keičiantis šiukšlių kaloringumui. Nuo 30000s sistema nusistovi po pradinio sistemos šuolio, o nuo 40000s įvedamas trikdys. Trikdžio valdymas sureguliuotas gerai, kadangi nėra pasiekiamas sistemos įsisotinimas ir dujų srautas esant trikdžiui nepasiekia 0kg/s reikšmės.

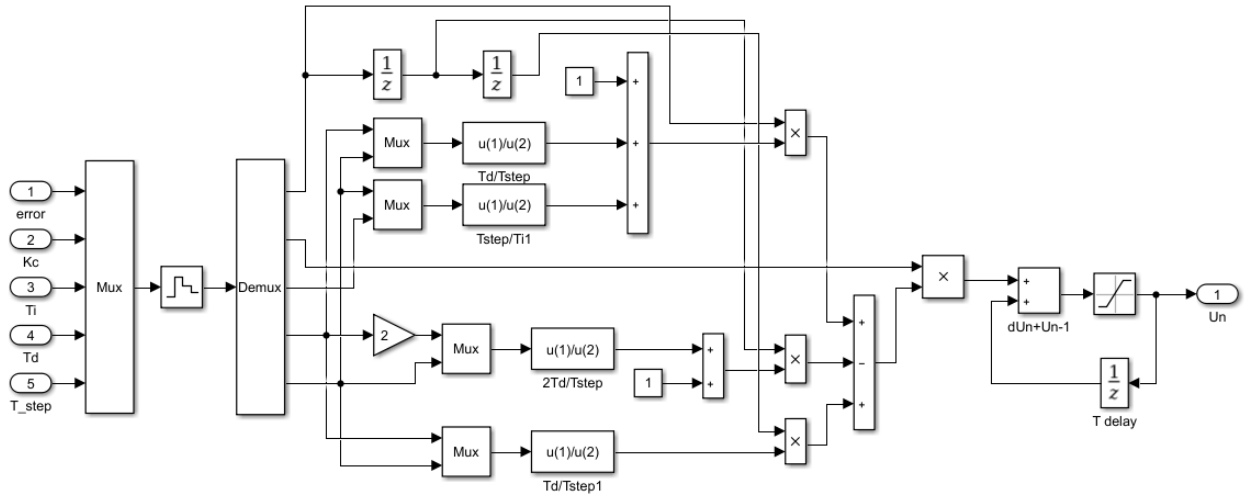


**33 pav.** Būgno slėgio reguliavimas be ir su PID reguliatoriumi

33 paveiksle yra palyginama sistema be PID reguliatoriaus ir su juo. Sistemoje be reguliatoriaus būgno slėgis nenusistovi ties užduotimi ir labai stipriai reaguoja į trikdį. O sistemoje su PID reguliatoriumi slėgio svyravimai yra labai nežymūs, o slėgis nusistovi ties nuostato signalu.

### 3.2.4. Diskretinio PID reguliatoriaus modeliavimas

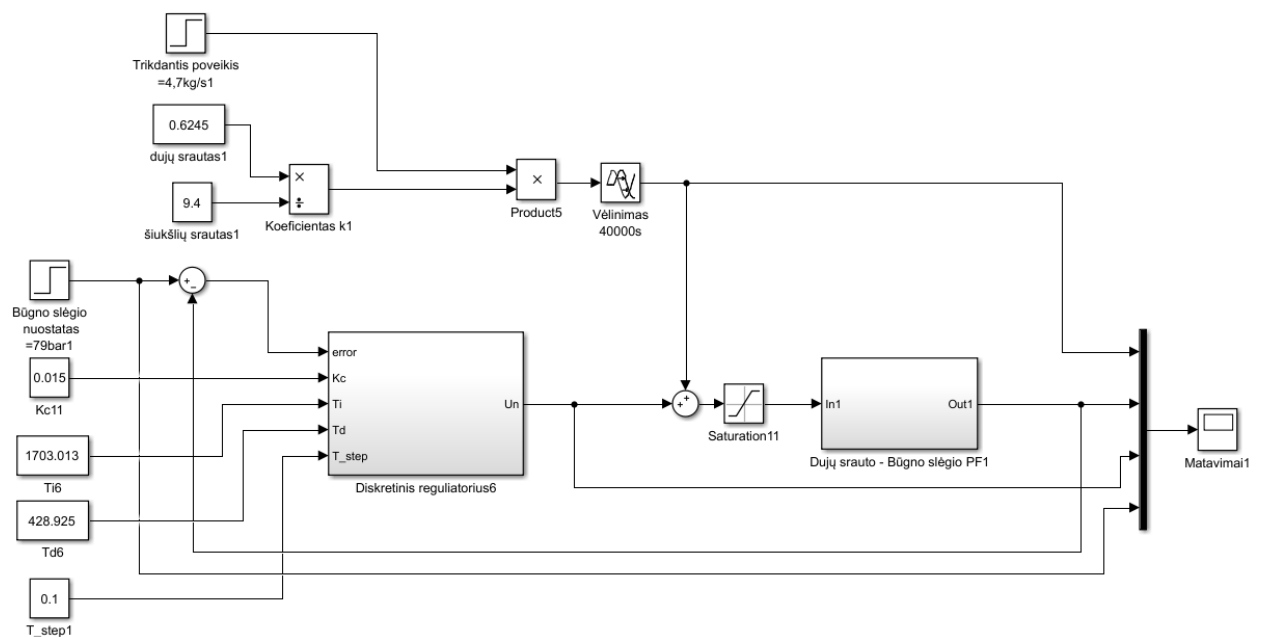
Šioje dalyje modeliuojamas diskretinis PID reguliatorius pagal tolydinio reguliatoriaus parametrus, kadangi realiose sistemose esančiuose valdikliuose naudojami ne tolydiniai, o diskretiniai reguliatoriai.



34 pav. Sudarytas tolydinio PID reguliatoriaus diskretizavimo modelis

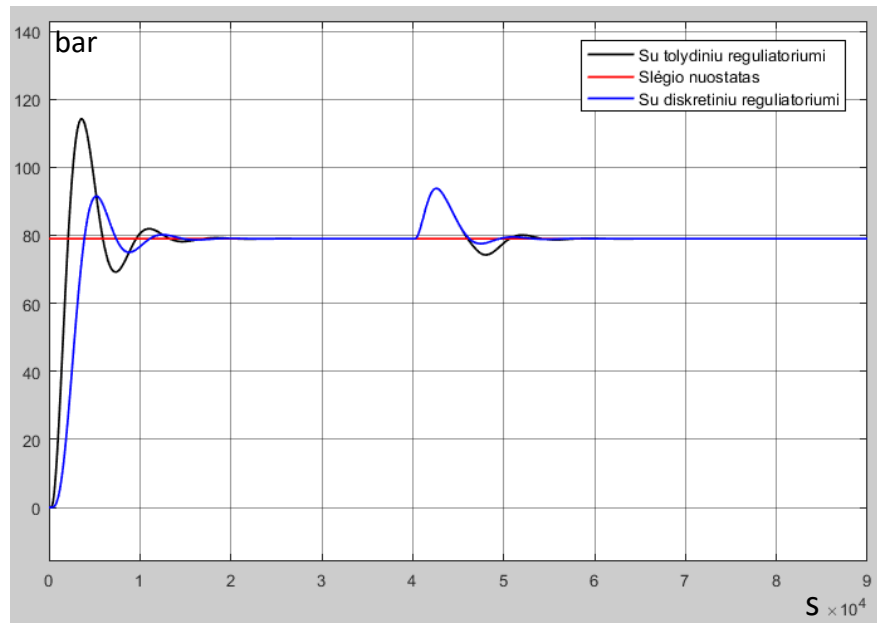
Pagal teorinėje dalyje esančias diskretinio reguliatoriaus formules (1.2.3.1) sudarytas modelis, matomas 34 paveiksle. Sistemos įėjimai yra:

- nuostato ir proceso vertės nuokrypis;
- stiprinimo koeficientas;
- integralinė dedamoji;
- diferencialinė dedamoji;
- diskretizavimo žingsnis.



35 pav. Valdymo sistemos modelis su suderintu diskretiniu reguliatoriumi





**36 pav.** Diskretinio reguliatoriaus adekvatumas

Teoriškai diskretinio reguliatoriaus veikimas turi sutapti arba būti labai artimas tolydinio reguliatoriaus veikimui. Pagal 36 paveiksle lyginamus tolydinį ir diskretinį reguliatorius galima spręsti, jog parinkti parametrai ir diskretinis reguliatorius suderintas teisingai.

### 3.2.5. Tiesioginio ryšio reguliatoriaus derinimas

Kompensatoriaus radimui naudojamos anksčiau aproksimuotų vienkontūrių perdavimo funkcijų parametrai. 37 paveiksle pavaizduota iškarpa iš *Mathcad* programinės skaičiuoklės. Apskaičiuojami kompensatoriaus stiprinimo bei vėlinimo koeficientai.

$$K_k := \frac{K_d}{K_{pr}} \quad \alpha := \tau_{pr} \quad \beta := \tau_d \quad \gamma := \beta - \alpha$$

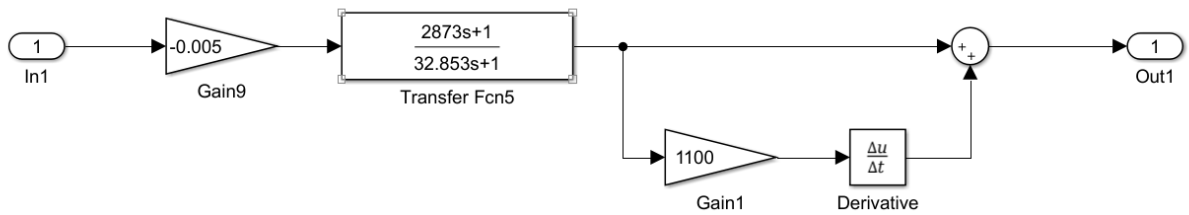
$$K_k = 0.005 \quad \gamma = -1100.429$$

**37 pav.** Randami kompensatoriaus parametrai

Matoma, kad laiko pastovioji gauta neigiamos reikšmės. Tokiu atveju, įstačius ją į perdavimo funkciją eksponentinės dedamoji gaunama teigiama. Esant tokiai situacijai būtina aproksimuoti kompensatoriaus perdavimo funkciją. Vienas iš variantų – Pade aproksimacija. Apytiksliai aproksimuojant:

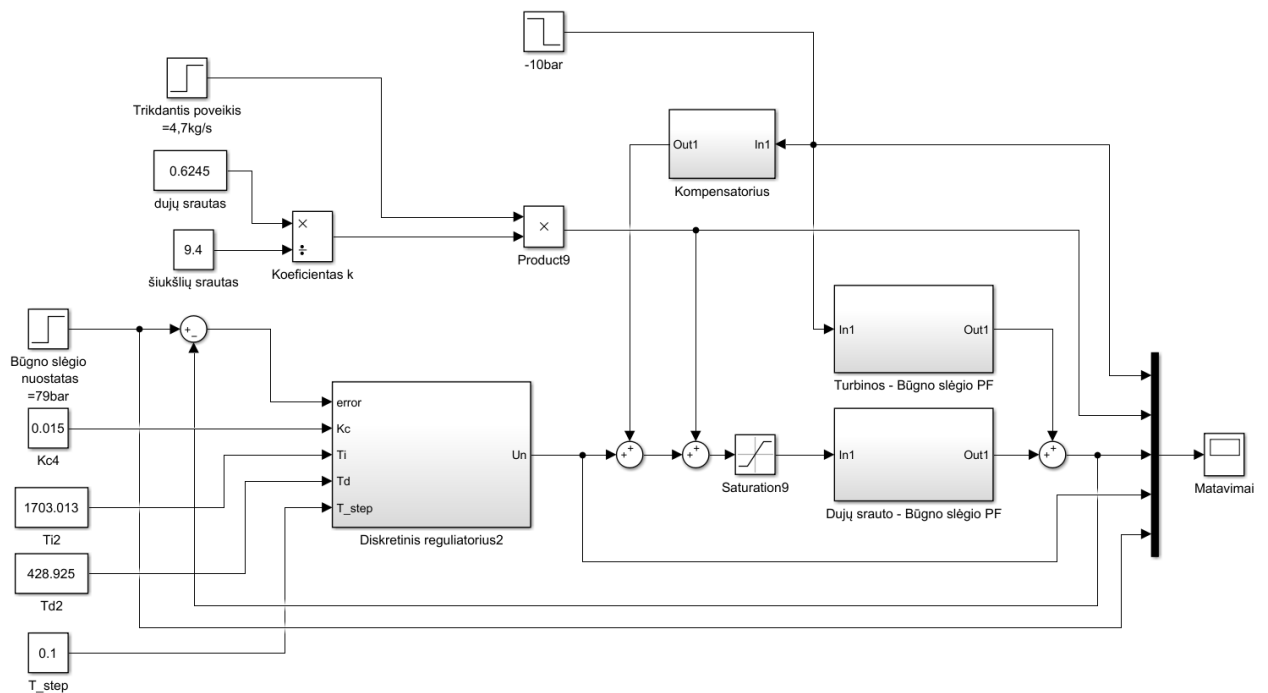
$$e^{-\tau_{pr}s} \approx 1 - s\tau_{pr}. \quad (3.2.4.1)$$

Pritaikius Pade aproksimacijos formulę kompensatorius realizuojamas Simulink modelyje. Modelis atvaizduotas 38 paveiksle. Dėl Pade aproksimacijos eksponentė pakeičiama diferencialiniu bloku.

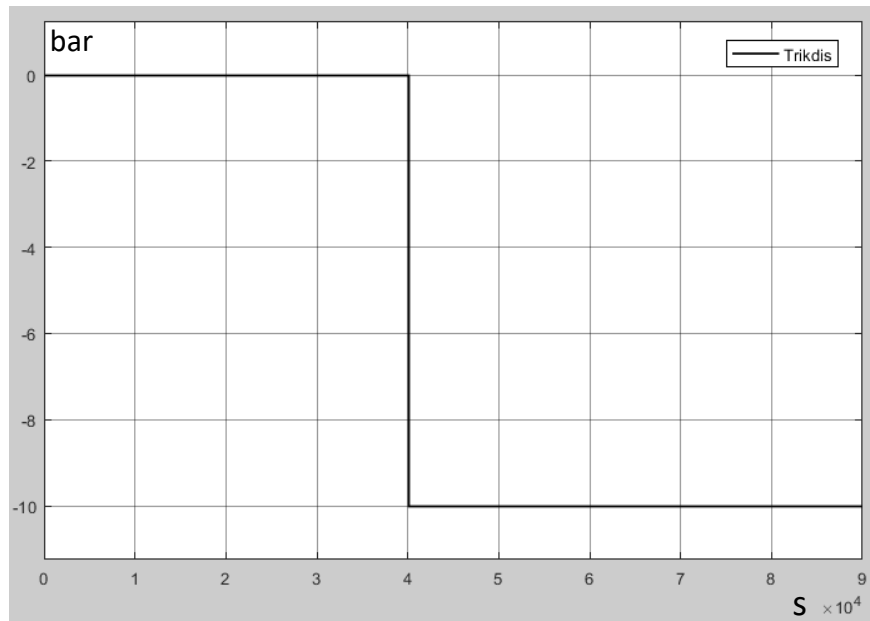


38 pav. Gauta kompensatoriaus perdavimo funkcija su Pade aproksimacija

Galiausiai sudaromas sistemos modelis su kompensatoriumi pagal Pade aproksimaciją, kuris matomas 39 paveiksle. Jį sudaro būgno slėgio nustato signalas, diskretinis reguliatorius, paduodamas pastovus šiukšlių srautas ir kompensatorius. 30000 sekundę nusistovėjus perinamiesiems procesams įvedamas šuolinis turbinos slėgio pokyčio trikdys ir stebimi slėgio bei dujų reguliavimai.

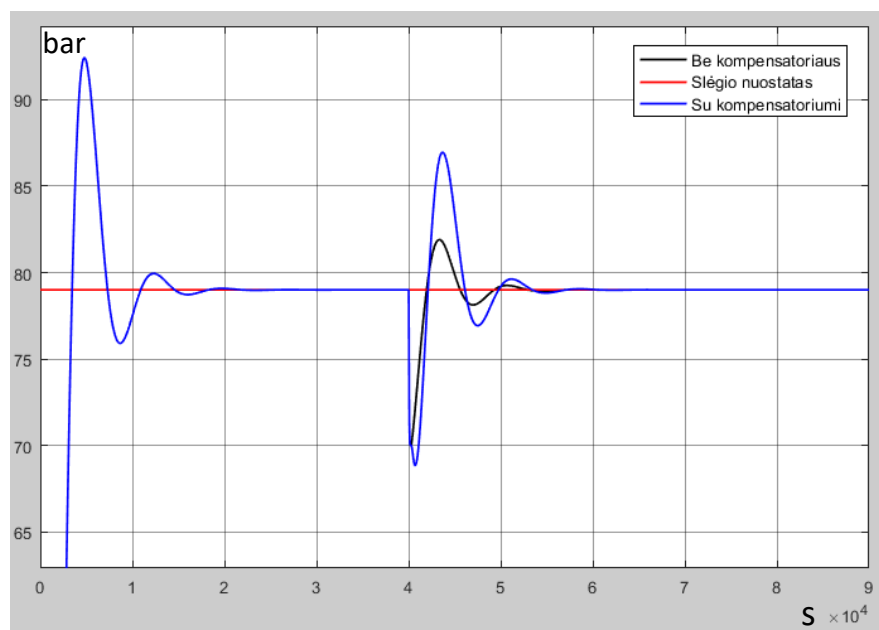


39 pav. Sistemos modelis su prijungtu kompensatoriumi



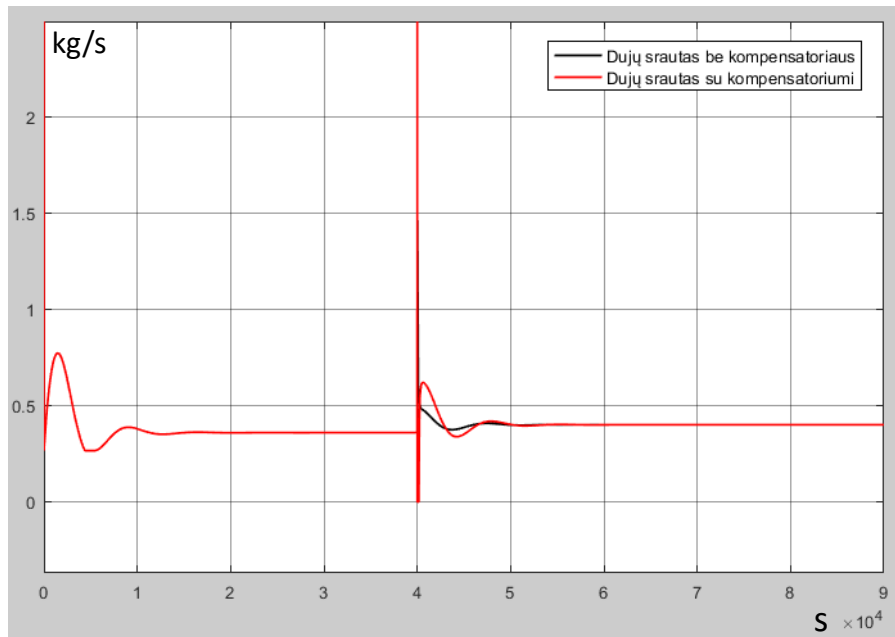
**40 pav.** Turbinos slėgio šuolinis pokytis

Užduodamas šuolinis –10 baro trikdys. Trikdys parinktas toks, kad sistema nepasiektų dujų reguliavimo įsisotinimo bei neviršytų leidžiamų matavimo ribų.



**41 pav.** Slėgio reguliavimas su ir be kompensatoriaus palyginimas

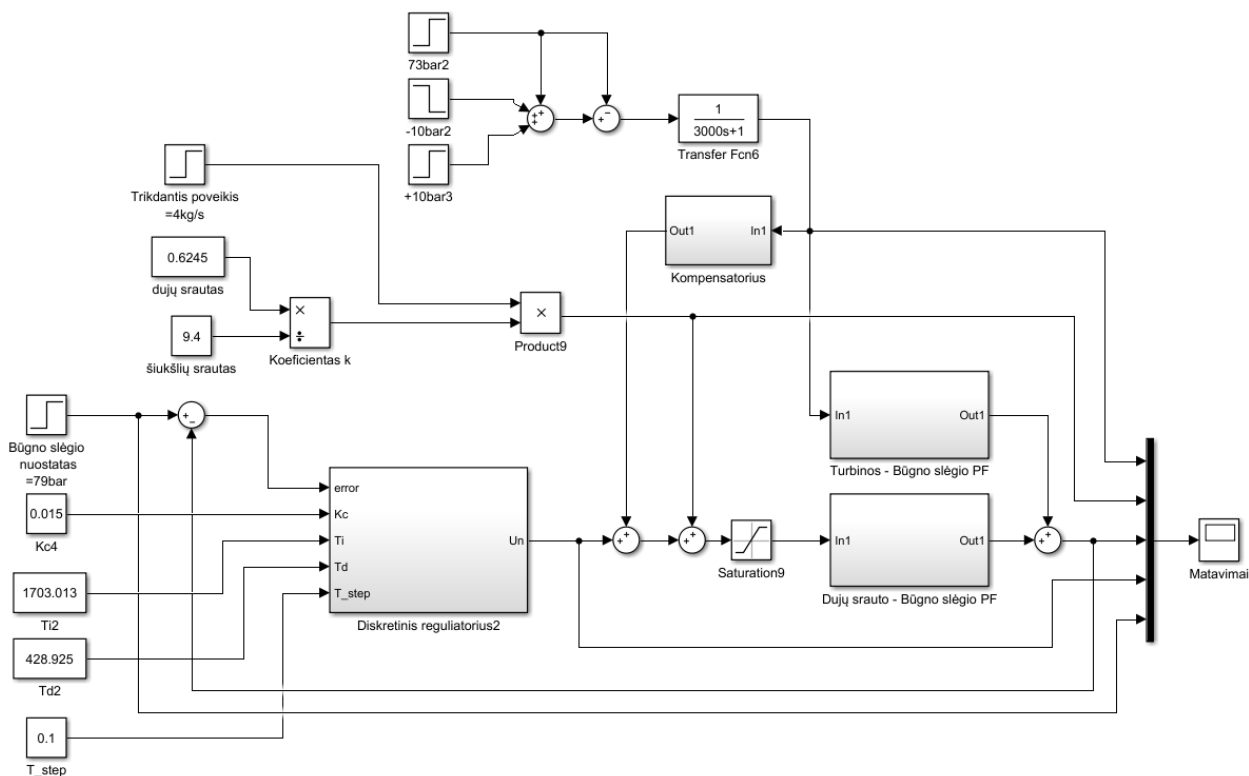
41 paveiksle lyginamas slėgio reguliavimas esant prijungtam ir atjungtam kompensatoriui. Pastebima, kad su kompensatoriumi slėgio reguliavimas tapo prastesnis. Daroma prielaida, jog tai nutiko dėl Pade aproksimacijos ir didelio diferencialinio koeficiento sukeliama sistemos šuolio.



**42 pav.** Bendro kuro srauto palyginimas su ir be kompensatoriaus

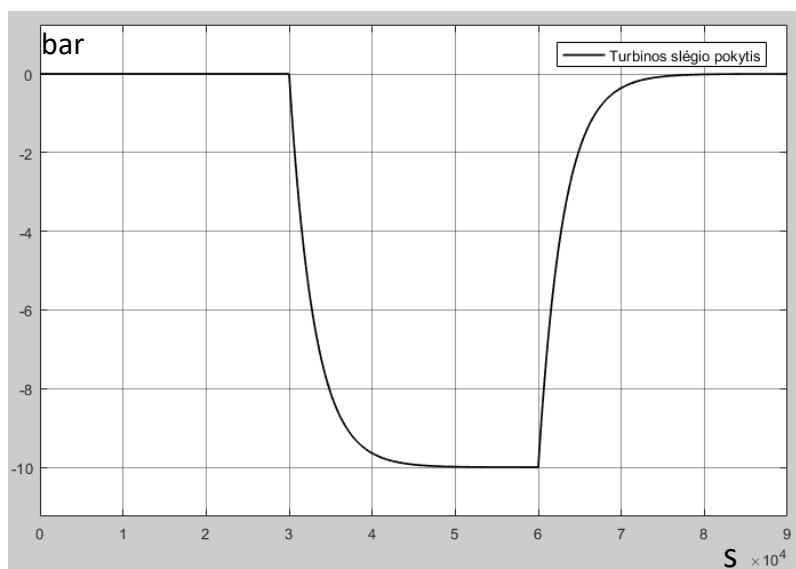
42 paveiksle palyginamas dujų srautas abiem atvejais. Taip pat, kaip ir slėgio reguliavime, taip ir kuro padavimo matavime, matomas prastesnis sureguliojimas ir didelis kuro padavimo šuolis.

Svarbu paminėti, kad realiose sistemose nebūna idealių šuolinių impulsų. Manoma, kad Pade aproksimacija galėjo neveikti dėl kompensatoriaus valdančio poveikio apskaičiuotos vertės pradiniu laiko momentu, kuri kompensatoriaus algoritme diferencijuojant teoriškai gaunama “begalybė”, o praktiškai – labai didelė vertė, kuri išderina suminį valdantį poveikį. Todėl Pade aproksimacijai patikrinti trikdžio signalas perleidžiamas per aperiodinę grandį su laiko pastoviaja 3000 s. Tokiu būdu gaunamas ne šuolinis trikdžio impulsas, o realistiškesnis turbinos slėgio pokytis realiaame procese. Galutinis sistemos modelis pavaizduotas 43 paveiksle.



43 pav. Galutinis būgno sistemos modelis

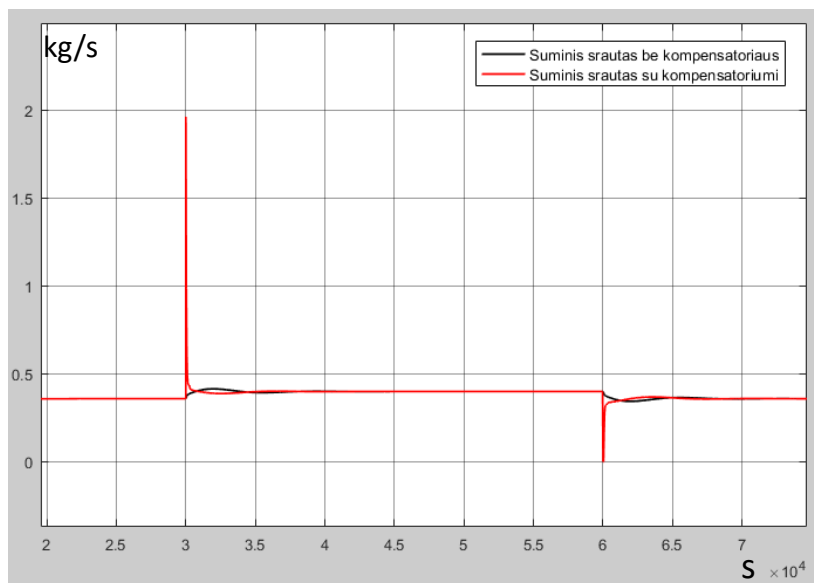
Sudarytas galutinis sistemos modelis, kuris bus naudojamas kompensatorių tyrime. Kaip pastebima schemoje, įprastas šuolinis trikdžio blokas pakeistas į turbinos slėgio nuokrypos signalą. Toks modelis yra naudojamas realioje sistemoje, kurioje pastoviai matuojamas turbinos slėgio pokytis.



44 pav. Turbinos slėgio trikdys sistemai perleistas per aperiodinę grandį

Šuoliniai trikdžiai pavaizduoti 44 paveiksle. Siekiant valdymo sistemoje vertinti realistinius trikdančius poveikius, modeliavimo eksperimentuose naudojami eksponentinio pobūdžio turbinos

slėgio pokyčiai. Šuolinis trikdys parinktas į abi puses, kad būtų galima patikrinti tariamą slėgio trūkumą ar perteklių.



**45 pav.** Suminis kuro srautas tiekiamas į katilą su ir be kompensatoriaus

Sprendžiant iš 45 paveikslo, šikart dujų srautas yra tiekiamas proceso ribose ir regulatorius puikiai susitvarko su užduotais trikdžiais.



**46 pav.** Slėgio palaikymas diskrečiuoju PID regulatoriumi su ir be kompensatoriaus

Kaip matoma 46 paveiksle, šikart kompensatorius su Pade aproksimacija pasiteisino dėl trikdžio, perleisto per aperiodinę grandį. Jis ne tik sumažino dinaminę nuokrypą, bet ir šiek tiek sutrumpino reguliavimo laiką.

Atlikus šį bandymą nuspręsta ištirti ir kitus kompensatoriaus parametrų skaičiavimo metodus, rezultatus palyginti tarpusavyje bei rasti tinkamiausią tiesioginio ryšio reguliatorių būgno slėgio palaikymo sistemai. Šie kompensatorių metodai tiriami naudojantis T. Tekoriaus ir D. Levišausko publikacija „Comparative Investigation of Feed-Forward Control Algorithms” [30].

1. Pastovios būsenos kompensatorius

$$G_k^I(s) = -\frac{K_d}{K_{pr}}; \quad (3.2.4.2)$$

$$G_k^I(s) = -0,005$$

2. Dinaminis kompensatorius

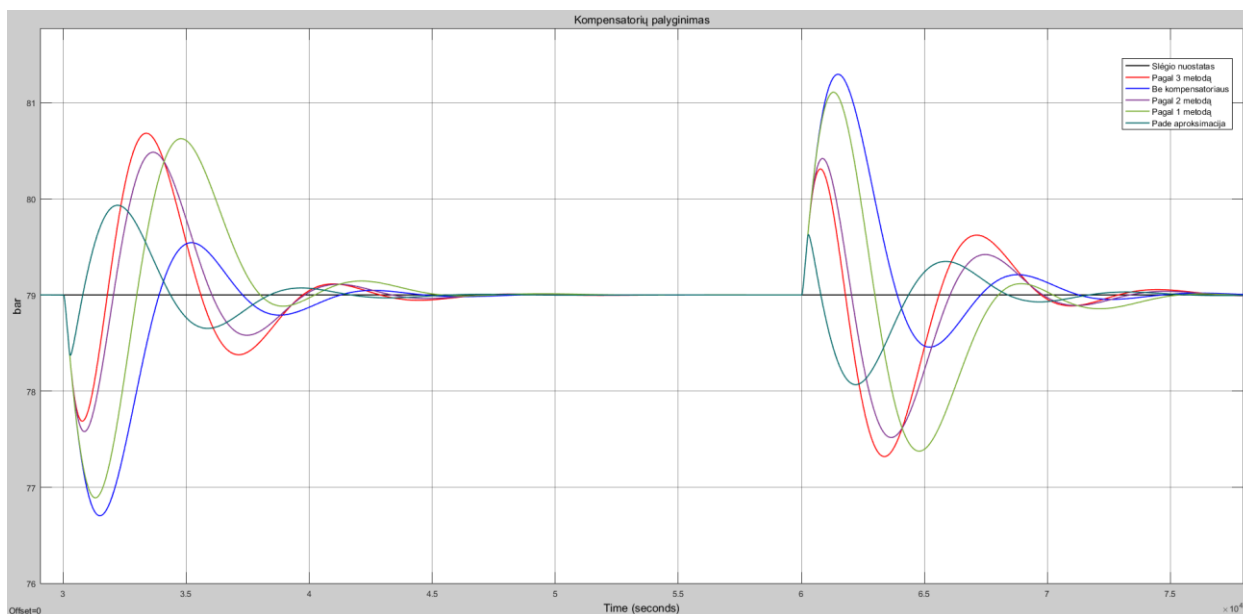
$$G_k^{II}(s) = -\frac{K_d}{K_{pr}} \cdot \frac{T_{pr}s+1}{T_d s+1}; \quad (3.2.4.3)$$

$$G_k^{II}(s) = -0,005 \cdot \frac{2873s + 1}{32,853s + 1}$$

3. Modifikuotas dinaminis kompensatorius

$$G_k^{III}(s) = -\frac{K_d}{K_{pr}} \cdot \frac{(T_{pr}+\tau)s+1}{T_d s+1}; \quad (3.2.4.4)$$

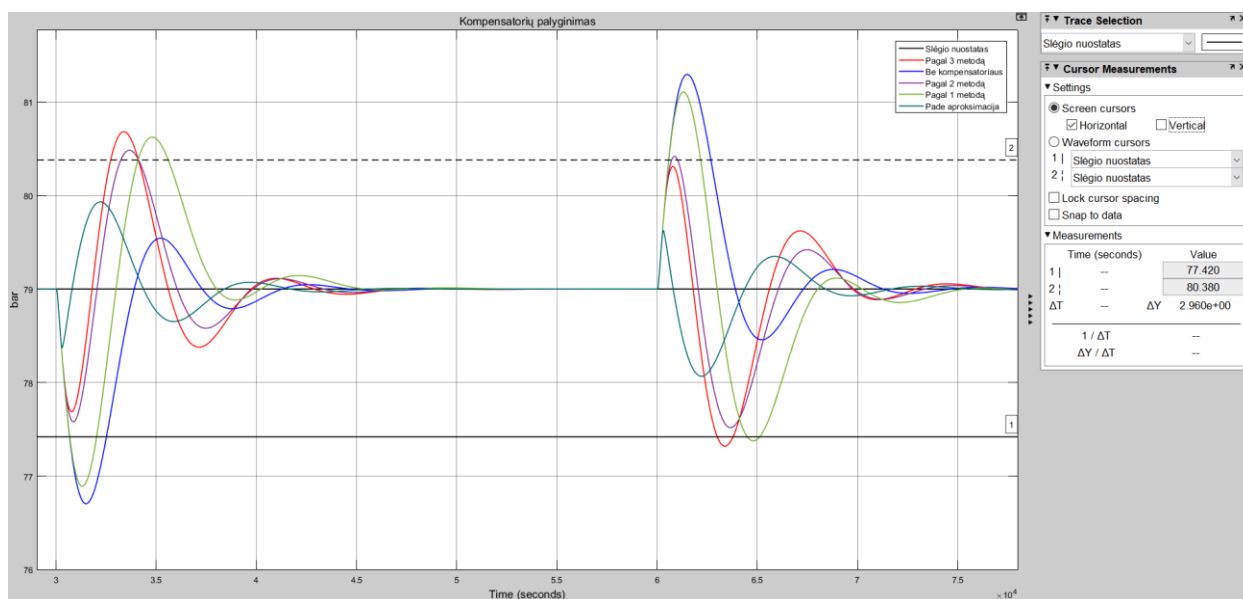
$$G_k^{III}(s) = -0,005 \cdot \frac{3691s + 1}{32,853s + 1}$$



**47 pav.** Būgno slėgio reguliavimas ir kompensatorių palyginimas

Tiriant skirtingus kompensatorių metodus būgno slėgio reguliavime didelių skirtumų nesimato. Sumažinus mastelį galima atlikti maksimalios dinaminės nuokrypos ir reguliavimo laiko tyrimą,

pavaizduotą 48 paveiksle. Pasitelkus *Matlab Simulink* programinės įrangos pagalbą galima rasti tikslias vertes pasirinktais laiko momentais ir apskaičiuoti reikiamus parametrus.



**48 pav.** Būgno slėgio maksimalios dinaminės nuokrypos ir reguliavimo laiko tyrimas

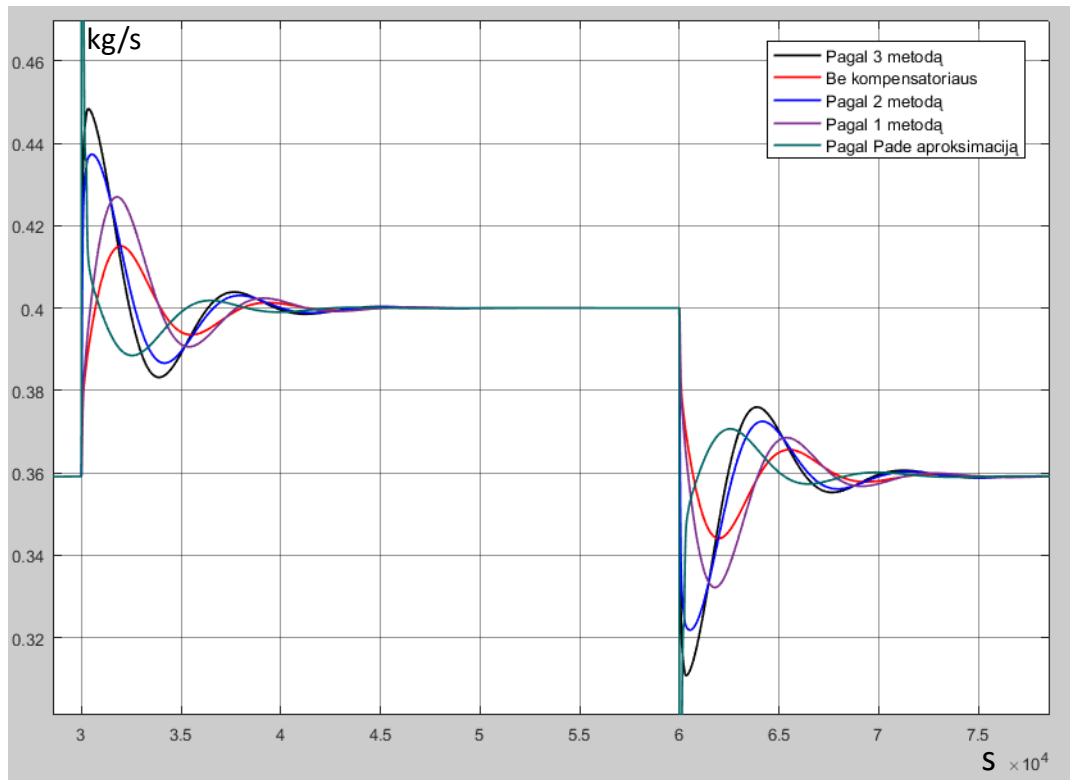
Grafikų atvaizdavimo bloke pasirinktos 2 % nuokrypos ribos nuo užduoties signalo. Žemutinė riba yra 77,42 bar, o viršutinė – 80,38 bar. Šiomis ribomis remiamasi ieškant sureguliuojamo laiko. Procesas laikomas sureguliuotu, kai kreivė nebeišeina iš nustatytų ribų.

**8 lentelė.** Būgno slėgio dinaminės nuokrypos ir reguliavimo laiko parametrai

Kompensatoriaus metodas	Maksimali dinaminė nuokrypa, %	Reguliavimo laikas, s
Be kompensatoriaus	2,899	2711
1 metodas	2,671	5187
2 metodas	1,797	1081
3 metodas	1,658	3884
Pade aproksimacija	0,797	–

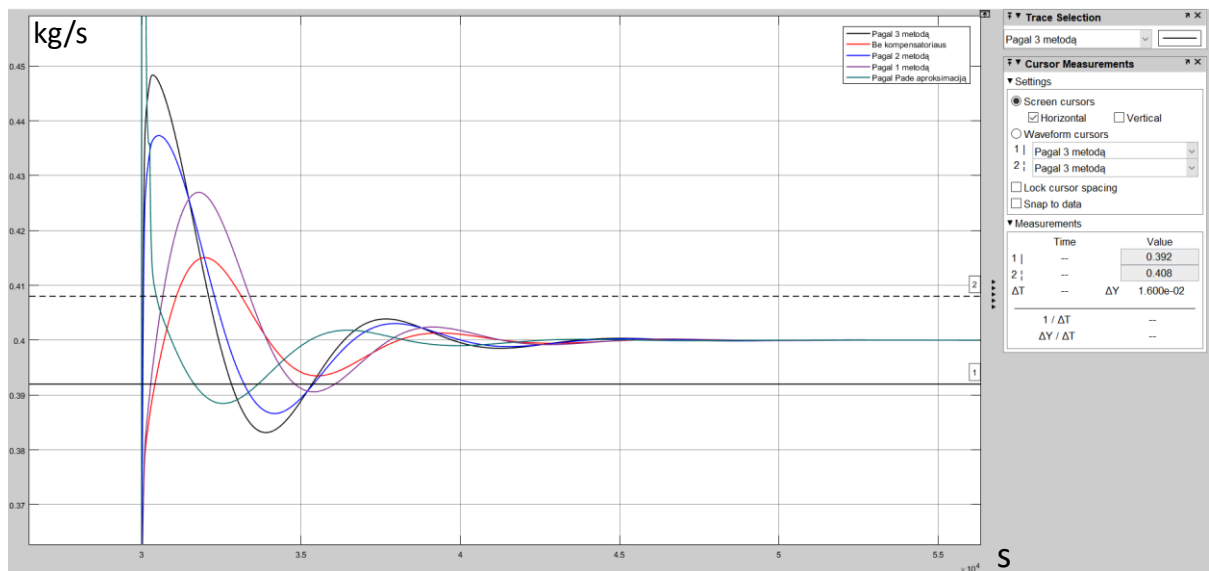
8 lentelėje apskaičiuoti slėgių grafikų be kompensatoriaus ir pagal Pade aproksimaciją maksimalūs dinaminiai nuokrypiai bei reguliavimo laikai. Iš lentelės grafikų matoma, kad Pade aproksimacija ir kompensatorius sumažino nuokrypą 2,1 %. Reguliavimo laikas taip pat žymiai sutrumpėjo, kadangi dėl ypatingai mažos nuokrypos grafikas net neišeina iš 2 % proceso nuostato ribos.





**49 pav.** Dujų srautų palyginimas esant skirtingiems kompensatoriams

49 paveiksle dujų srauto grafikų skirtumai matomi taip pat tik sumažinus mastelį. Toliau pasitelkus tuos pačius tyrimo metodus analizuojami dinaminės nuokrypos ir reguliavimo laiko parametrai.



**50 pav.** Dujų srauto reguliavimo laiko tyrimas

Parinktos 2 % ribos nuo nusistovėjusios 0,4 kg/s reikšmės. Gauta žemutinė riba 0,392 kg/s, o viršutinė – 0,408 kg/s. Atliekami tie patys stebėjimai, kaip ir su būgno slėgio grafikais. Svarbu paminėti, kad Pade aproksimacijos metodu diferencialinė dedamoji pradiniu momentu sustiprina proceso vertę, todėl į ją nėra atsižvelgiama šio tyrimo metu. Svarbiausia yra tai, kad ši pradinė vertė neviršytų techninių reikalavimų.

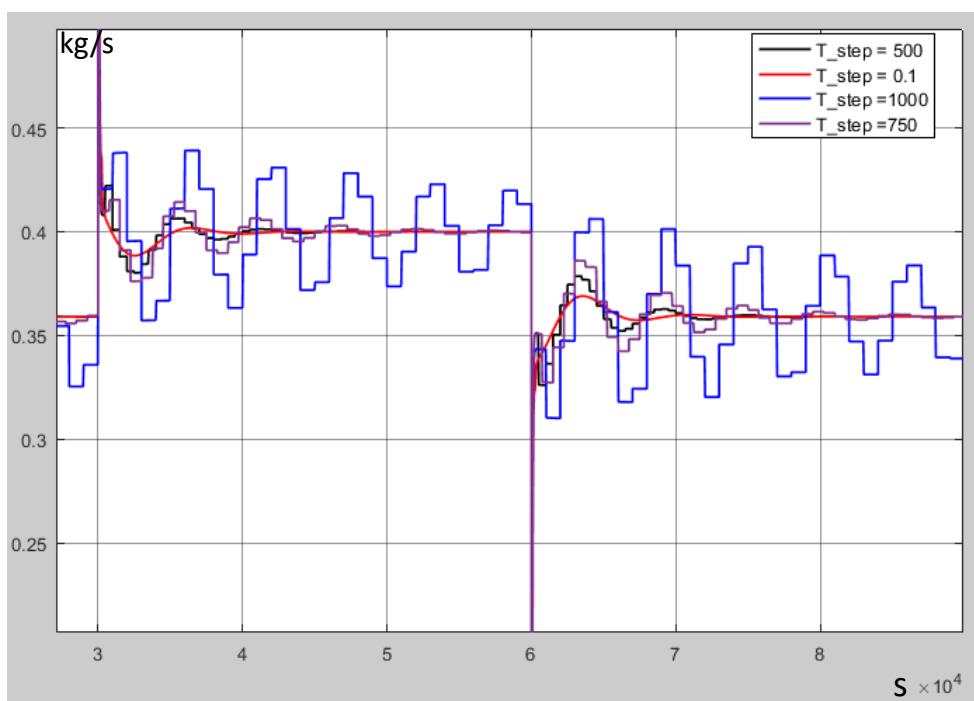
### 9 lentelė. Dujų srauto dinaminės nuokrypos ir reguliavimo laiko parametrai

Kompensatoriaus metodas	Maksimali dinaminė nuokrypa, %	Reguliavimo laikas, s
Be kompensatoriaus	3,75	3115
1 metodas	6,75	6098
2 metodas	9,325	5380
3 metodas	12,05	5321
Pade aproksimacija	2,8	3666

Šiuo atveju Pade aproksimacijos metodas sumažina maksimalią dinaminę nuokrypą 1,15 %, tačiau prailgina dujų suregulavimo laiką 550 s. Darant bendrą išvadą pagal būgno slėgio ir dujų srauto kompensatorių palyginimą geriausias metodas yra laikomas kompensatorius su Pade aproksimacija.

#### 3.2.6. Diskretizavimo žingsnio tyrimas

Kadangi sistemos modelis yra atliktas ir ištirtas su 0,1 sekundės diskretizavimo žingsniu, reikia atlikti bandymą ir su platesniu žingsniu ir tokiu būdu bandyti sutaupyti valdiklio junginėjimo dažnį, o tuo pačiu – resursus bei kainą. Diskretinio regulatoriaus efektyvumui įvertinti tiriama sistema su papildomai užduotais 500 s, 750 s ir 1000 s diskretizavimo žingsniais. Kuro srauto ir būgno slėgio reguliavimo grafikai palyginti 51 ir 52 paveiksluose.

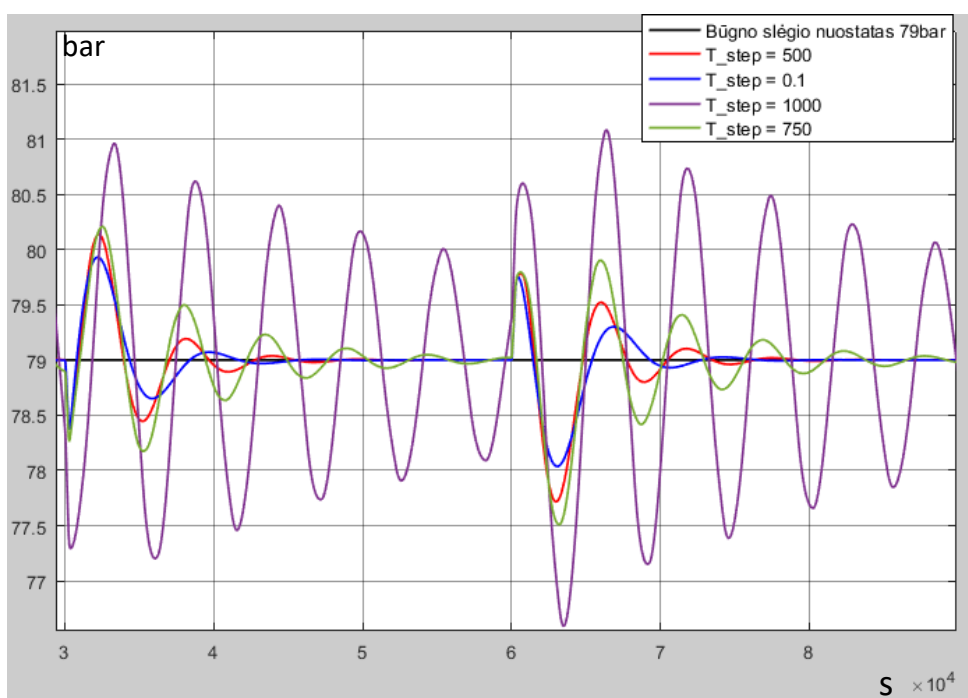


51 pav. Kuro srauto palyginimas esant skirtingiems diskretizavimo žingsniams

Kuro srauto kreivės sutampa net ir esant dideliame diskretizavimo žingsnio skirtumui. Esant 500 s žingsniui pastebimi nežymūs „laipteliai“, tačiau jie didelės įtakos procesui nedaro.

Esant užduotam 1000 s diskretizavimo žingsniui dujų srauto valdymas tampa nesureguliuojamas. Tiriant 750 s diskretizavimo žingsnį dujų srautas yra sureguliuojamas, tačiau ties technologinių

specifikacijų riba. Teigiama, kad naudojant pastarąjį diskretizavimo žingsnį, vis dar gaunami patenkinami rezultatai valdant dujų srautą.



**52 pav.** Slėgio reguliavimas esant skirtingiems diskretizavimo žingsniams

Būgno slėgių grafike esančiame 50 paveiksle naudojant 500 s žingsnį taip pat nematomi žymūs pokyčiai ir nukrypimai lyginant su 0,1 s. Tiriant su 1000 s žingsniu lygiai taip pat, kaip ir stebint dujų srautą, taip ir slėgio valdyme, pastebimas nesureguliuojamas. Toliau tiriant su 750 s žingsniu gaunami ne tokie geri rezultatai, kaip dujų srauto valdyme – pastebimas didesnis bangavimas ir ilgesnis proceso sureguliuojimas. Galima daryti išvadą, kad siekiant gauti gerą sistemos reguliavimą nebūtina naudoti 0,1s diskretizavimo žingsnio ir apkrauti sistemą, kadangi panašūs rezultatai gaunami ir su 500 s žingsniu. Esant didesniai žingsniui gaunamas neefektyvus sistemos reguliavimas.

## Išvados ir rezultatai

1. Apžvelgti teoriniai ir eksperimentiniai garo katilo technologinių procesų modeliavimo metodai.
2. Išanalizuota Kauno kogeneracinės jėgainės valdymo sistemos dokumentacija, išnagrinėti garo katilo technologiniai parametrai, garo slėgio, srauto bei būgno vandens lygio technologinės schemas. Sukaupti realūs elektrinės istoriniai matavimų duomenys, reikalingi garo katilo eksperimentinių modelių kūrimui.
3. Sudaryti valdomo proceso perdavimo funkcijų modeliai: dujų srautas – būgno slėgis bei turbinos slėgis – būgno slėgis. Atliktas sudarytų perdavimo funkcijų aproksimavimas pirmos eilės su vėlavimu modeliais, reikalingais valdymo sistemos reguliatorių derinimui.
4. Naudojant ITAE derinimo taisyklės atliktas PID reguliatoriaus derinimas, sudarytas vienkontūrės grįžtamojo ryšio valdymo sistemos modelis *Matlab Simulink* aplinkoje ir atliktas valdymo sistemos veikimo tyrimas kompensuojant kuro kaloringumo ir turbinos slėgio trikdančius poveikius. Vienkontūrė valdymo sistema su PID reguliatoriumi reikšmingai pagerina katilo būgno slėgio palaikymo tikslumą lyginant su tikslumu naudojant nustatytą pastovų dujų srautą.
5. Sudaryti tiesioginio ryšio reguliatoriaus (kompensatorius) alternatyvūs algoritmai ir nustatyti algoritmų derinimo parametrai. Sudarytas tiesioginio/grįžtamojo ryšio valdymo sistemos modelis *Matlab Simulink* aplinkoje ir atliktas valdymo sistemos veikimo tyrimas kompensuojant kuro kaloringumo ir turbinos slėgio trikdančius poveikius, naudojant skirtingus kompensatoriaus algoritmus. Tyrimo rezultatai parodė, kad geriausias turbinos slėgio trikdančio poveikio kompensavimas pasiekiamas kompensatoriaus algoritme įvedant spartinimo elementą, kuris realizuojamas naudojant Pade aproksimaciją. Tiesioginio/grįžtamojo ryšio valdymo sistema naudojant efektyvų kompensatoriaus algoritmą reikšmingai pagerina būgno slėgio valdymo kokybę, lyginant su vienkontūre grįžtamojo ryšio valdymo sistema: maksimali dinaminė nuokrypa sumažėja 2,1 %, be to, procesas neišeina iš pasirinktų 2 % ribų, todėl Pade aproksimacijai net nėra skaičiuojamas reguliavimo laikas.
6. Atliktas valdymo sistemos reguliatorių algoritmų diskretizavimo žingsnio įtakos valdymo kokybės rodikliams tyrimas. Nustatyta, kad siekiant minimizuoti valdymo sistemoje vykdymo mechanizmo jungimų dažnį, maksimalus diskretizavimo žingsnis neturintis reikšmingos neigiamos įtakos valdymo kokybės rodikliams yra 500 s.
7. Darbo rezultatai gali būti panaudoti derinant ir tobulinant Kauno kogeneracinės jėgainės garo katilo valdymo sistemas.

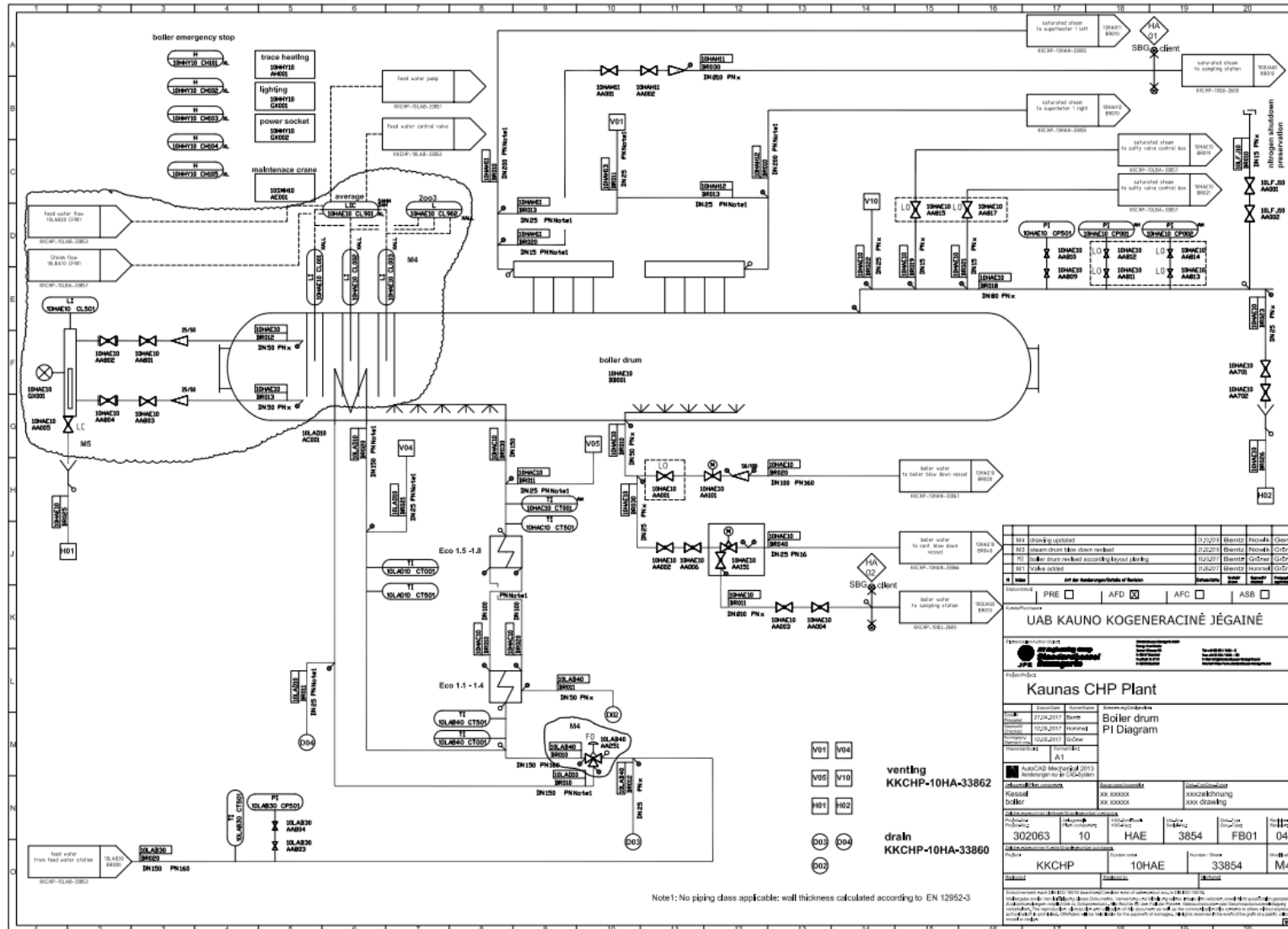
## Literatūros sąrašas

1. Sunil, Barve, and Nataraj. „Boiler Model and Simulation for Control Design and Validation.” IFAC Proceedings Volumes 47.1 (2014): 936–40. Web. [interaktyvus] [žiūrėta 2020–05–24] prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016327665?via%3Dihub>
2. 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 2020–05–24] prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=744528>
3. Bouskela, Daniel. „Multi-Mode Physical Modelling of a Drum Boiler.” Procedia Computer Science 95 (2016): 516–23. Web. [interaktyvus] [žiūrėta 2020–05–24] prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050916325042?via%3Dihub>
4. 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 2020–05–24] prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/63140>
5. Zhen Tian, Jingqi Yuan, and Liang Xu. „Modeling of Drum Boiler-turbine Unit and the Modelbased Coordinated Control Strategy.” 2016 35th Chinese Control Conference (CCC) 2016 (2016): 3327–332. Web. [interaktyvus] [žiūrėta 2020–05–24] prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7553869>
6. A. Del Rosso, D. L. Brooks and Y. R. Jusino, „Impacts of bulk wind generation and waste-to-energy on the economic operation of the Puerto Rico Electric Power Authority system,” IEEE PES General Meeting, Providence, RI, 2010, pp. 1–7. Web. [interaktyvus] [žiūrėta 2020–05–24] prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5590056>
7. S. Bardi and A. Astolfi, „Modeling and Control of a Waste-to-Energy Plant [Applications of Control],” in IEEE Control Systems Magazine, vol. 30, no. 6, pp. 27–37, Dec. 2010, Web. [interaktyvus] [žiūrėta 2020–05–24] prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5643706>
8. B. Anggoro, A. Aprilian and B. Halimi, „Potency of waste to energy — Bandung city case study,” 2017 International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS), Sanur, 2017, pp. 135–139, Web. [interaktyvus] [žiūrėta 2020–05–24] prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8225929>
9. „Apie jėgainę”, Web. [interaktyvus] [žiūrėta 2021–02–13] prieiga per internetą: <https://kkj.lt/apie-mus/apie-jegaine/16>
10. „Bioenergy research”, Web. [interaktyvus] [žiūrėta 2021–02–13] <http://www.biopress.dk/PDF/FiB%20nr.%2012-2006%20-%20UK.pdf>
11. AF-Consult. UAB Kauno kogeneracinė jėgainė. KKCHP-2601. „The main control concept”, 2017.
12. Standardkessel Baumgarte. UAB Kauno kogeneracinė jėgainė. „Combustion diagram”, 2017.
13. AF-Consult. UAB Kauno kogeneracinė jėgainė. KKCHP-2600. „Plant operation mode description and disturbances”, 2018.

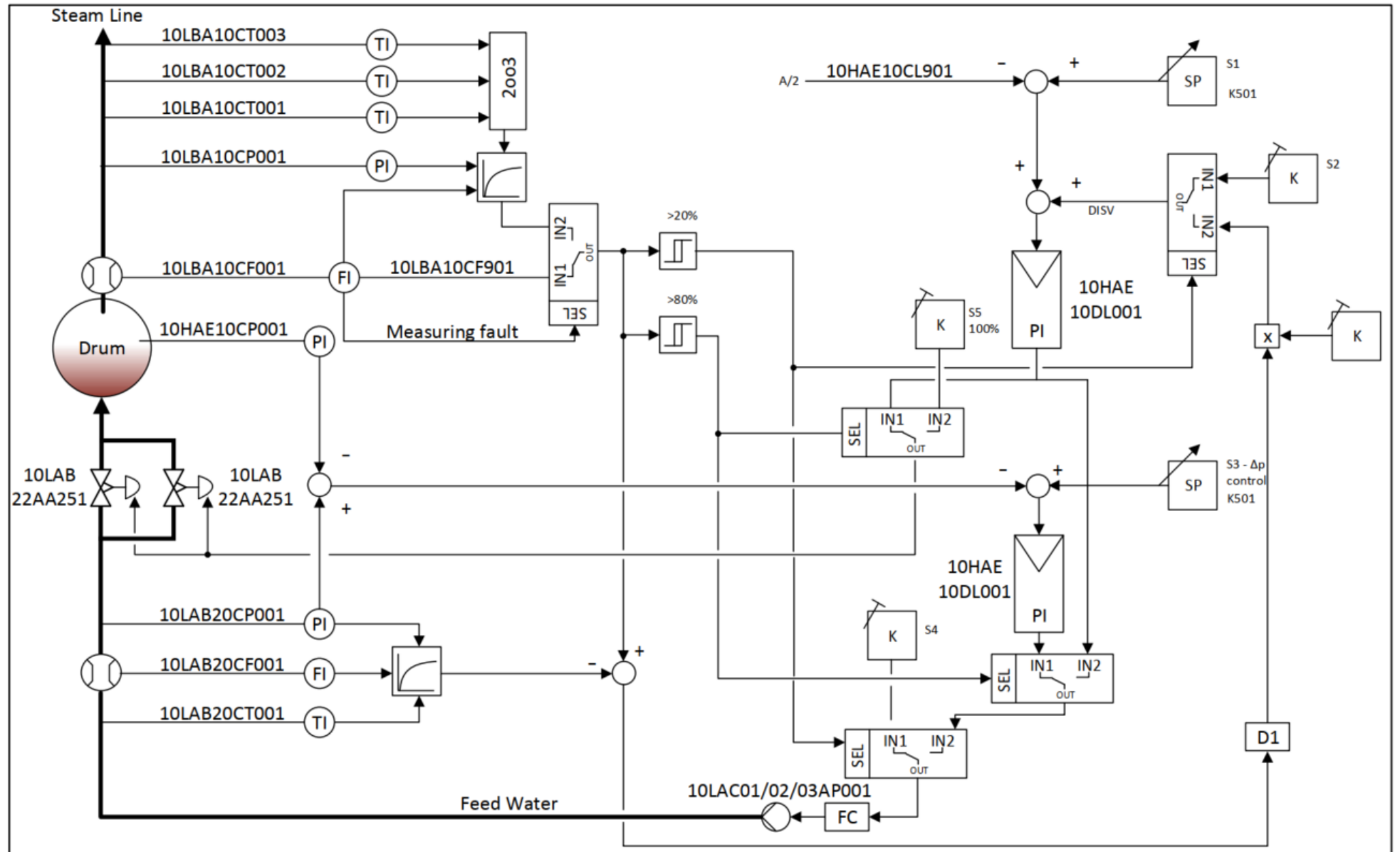
14. AF–Consult. UAB Kauno kogeneracinė jėgainė. KKCHP–10PG–2602. „Closed cooling water system”, 2018.
15. AF–Consult. UAB Kauno kogeneracinė jėgainė. KKCHP–10SC–2602. „Compressed air system”, 2018.
16. AF–Consult. UAB Kauno kogeneracinė jėgainė. KKCHP–10ND–2602. „District heating system”, 2018.
17. AF–Consult. UAB Kauno kogeneracinė jėgainė. KKCHP–10GH–2601. „Make–up water system”, 2018.
18. AF–Consult. UAB Kauno kogeneracinė jėgainė. KKCHP–10EK–2601. „Natural gas system”, 2018.
19. AF–Consult. UAB Kauno kogeneracinė jėgainė. KKCHP–10GA–2601. „Raw water system”, 2018.
20. AF–Consult. UAB Kauno kogeneracinė jėgainė. KKCHP–10LB–2601. „Steam, BoP drain and Spray water system”, 2018.
21. AF–Consult. UAB Kauno kogeneracinė jėgainė. KKCHP–10EA–2601. „Wate receiving and storage system”, 2018.
22. Standardkessel Baumgarte. UAB Kauno kogeneracinė jėgainė. KKCHP–10HA–33980. „Steam Boiler System”, 2018.
23. Standardkessel Baumgarte. UAB Kauno kogeneracinė jėgainė. KKCHP–10HH–33980. „Firing System”, 2018.
24. YARA Environmental Technologies AB. UAB Kauno kogeneracinė jėgainė. PMA18002. „SNCR functional description”, 2018.
25. LAB Groupe CNIM. UAB Kauno kogeneracinė jėgainė. KKCHP–50004. „Flue gas process description”, 2017.
26. „Apie kogeneraciją”, Web. [interaktyvus] [žiūrėta 2021–02–23] prieiga per internetą: <https://ignitisgrupe.lt/lt/Kogeneracin%C4%97s-jegaines>
27. L. S. Kazarinov, D. A. Shnayder and O. V. Kolesnikova, „Heat load control in steam boilers,” 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), St. Petersburg, Russia, 2017, pp. 1–4, doi: 10.1109/ICIEAM.2017.8076177.
28. Z. Wang and Z. Zhang, „Analysis of a Combined Cycle Recovering Pressure Energy of Natural Gas”, 2009 International Conference on Energy and Environment Technology, Guilin, China, 2009, pp. 519–521, doi: 10.1109/ICEET.2009.131.
29. „Drum pressure the key to managing boiler stored energy”, Web. [interaktyvus] [žiūrėta 2021–02–23] prieiga per internetą: <https://www.powermag.com/drum-pressure-the-key-to-managing-boiler-stored-energy/>
30. T. Tekorius, D. Levišauskas, „Comparative Investigation of Feed–Forward Control Algorithms”, 2011.
31. D. Levišauskas, „Automatinio reguliavimo sistemų derinimas: mokomoji knyga”, Vilnius: Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, 2008.

# Priedai

## 1 priedas. Elektrinės katilo technologinė schema

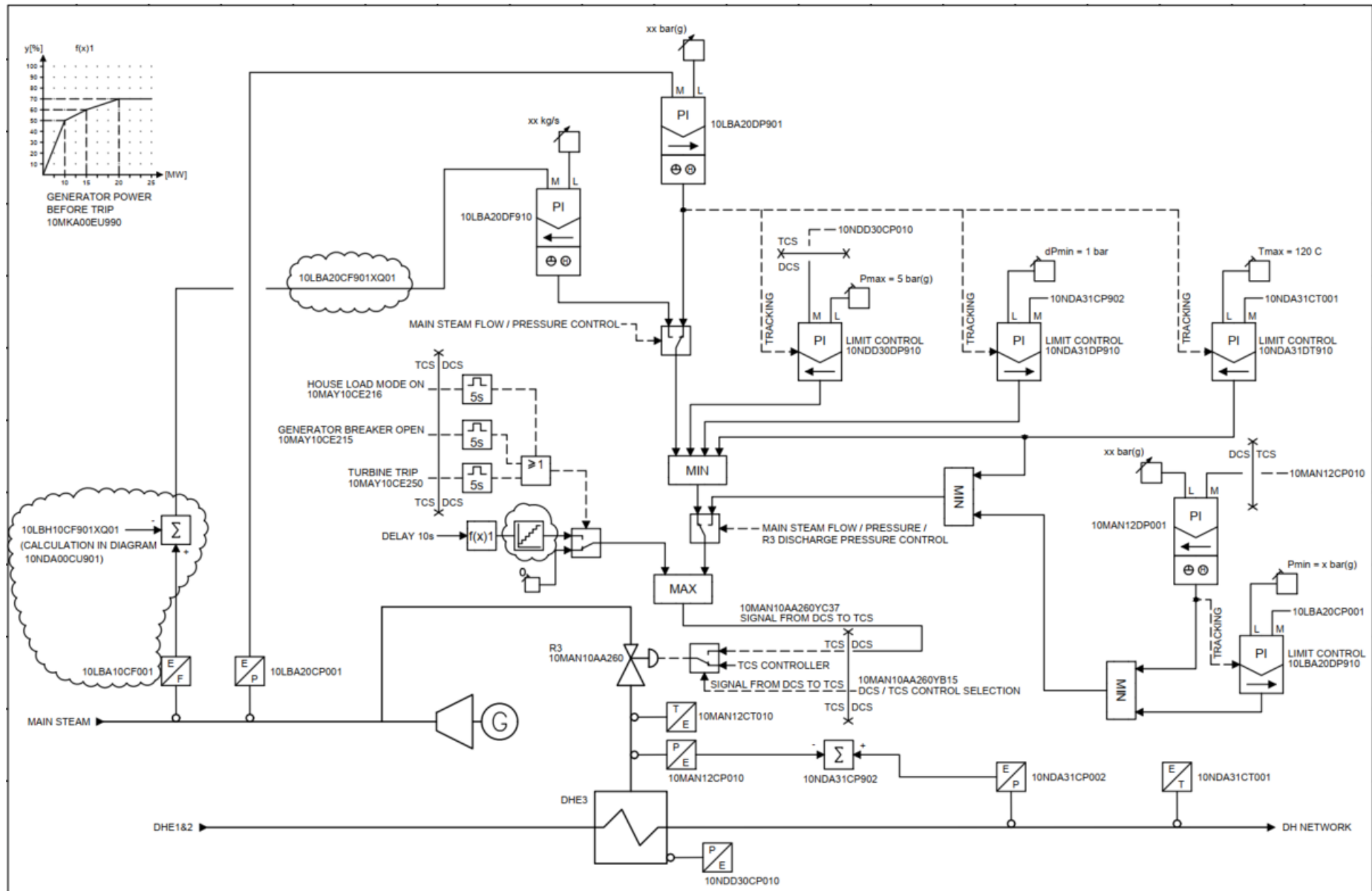


2 priedas. Elektrinės katilo būgno lygio reguliavimo schema

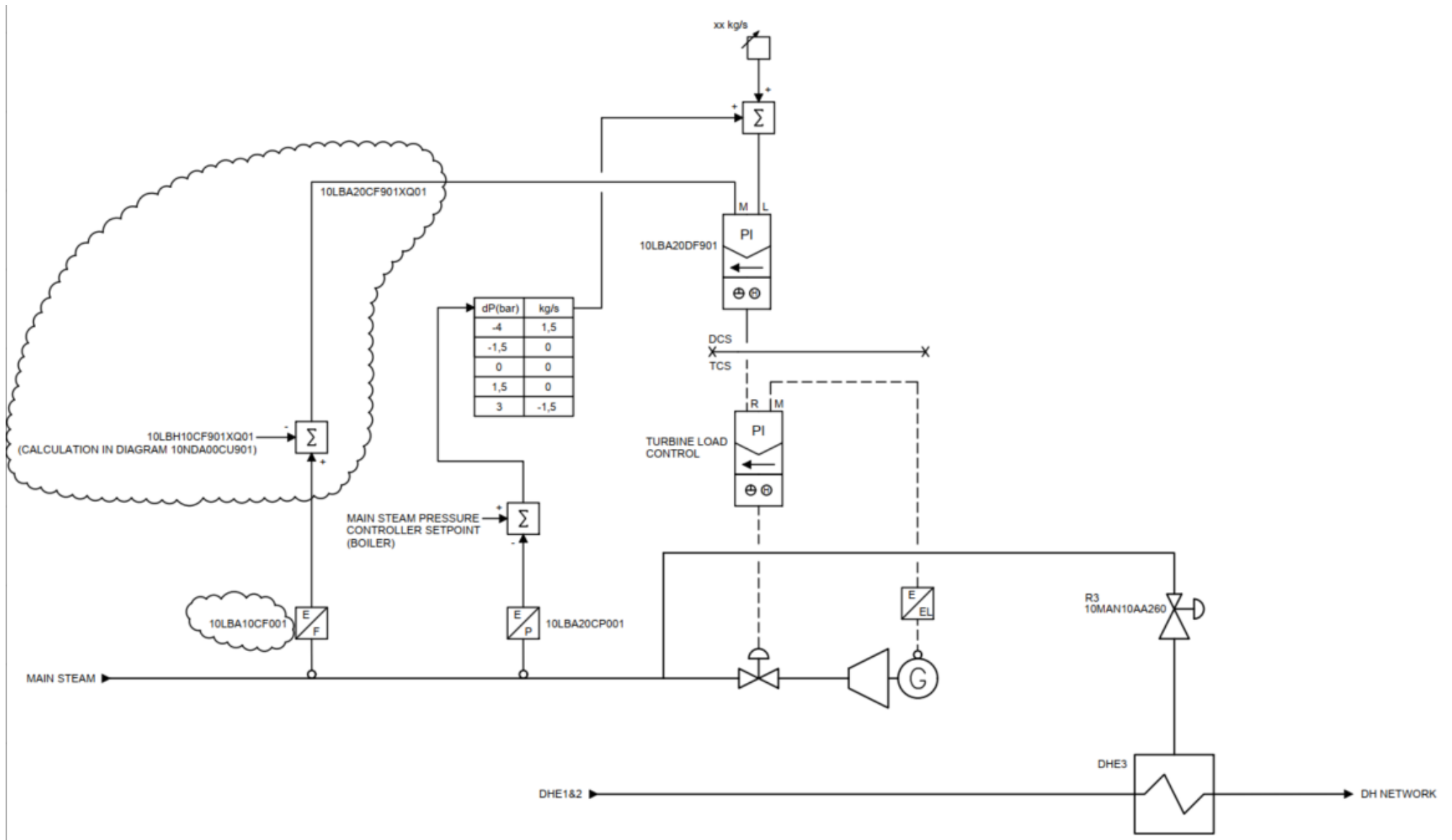




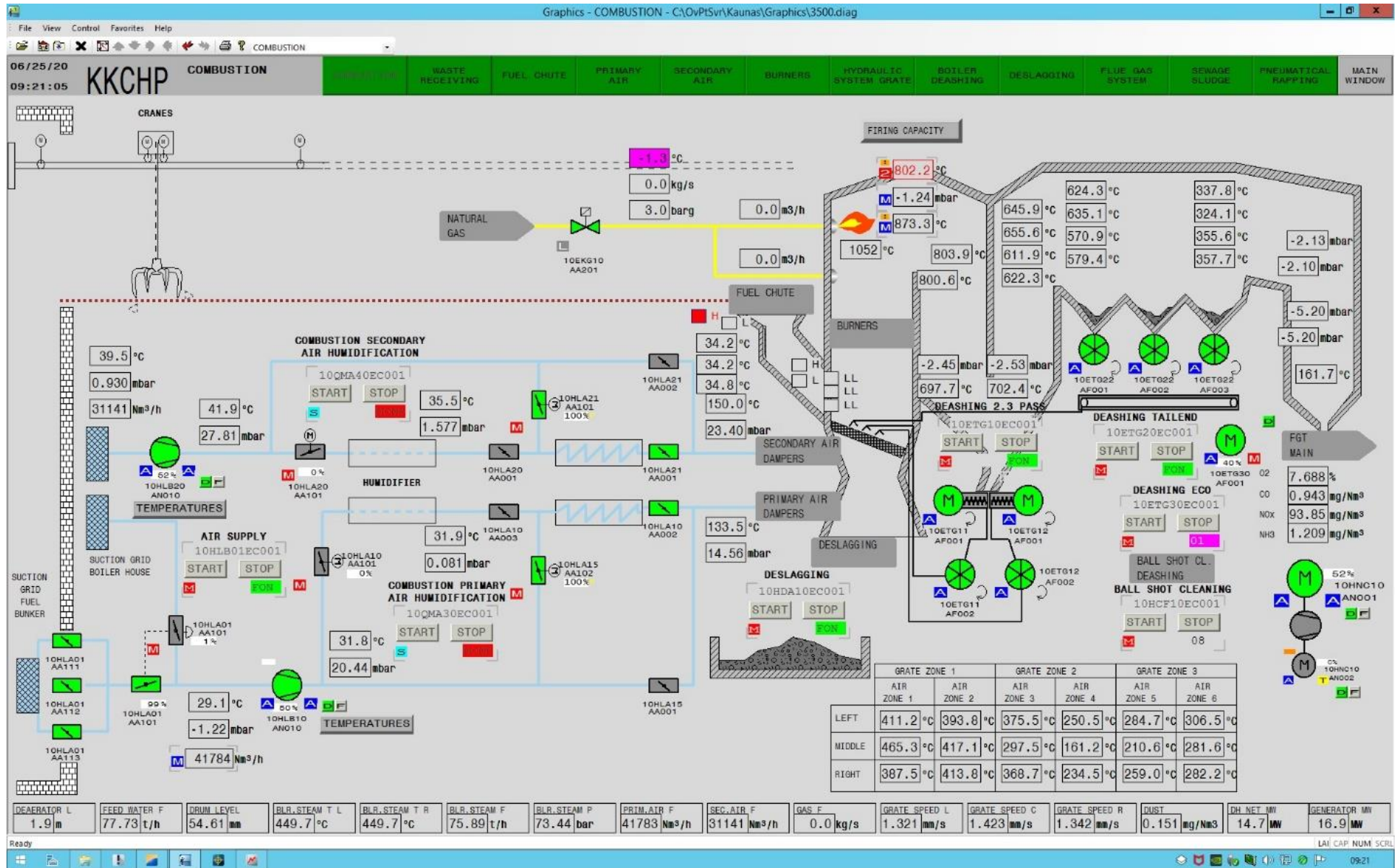
### 3 priedas. Pagrindinio garo slėgio reguliavimo schema



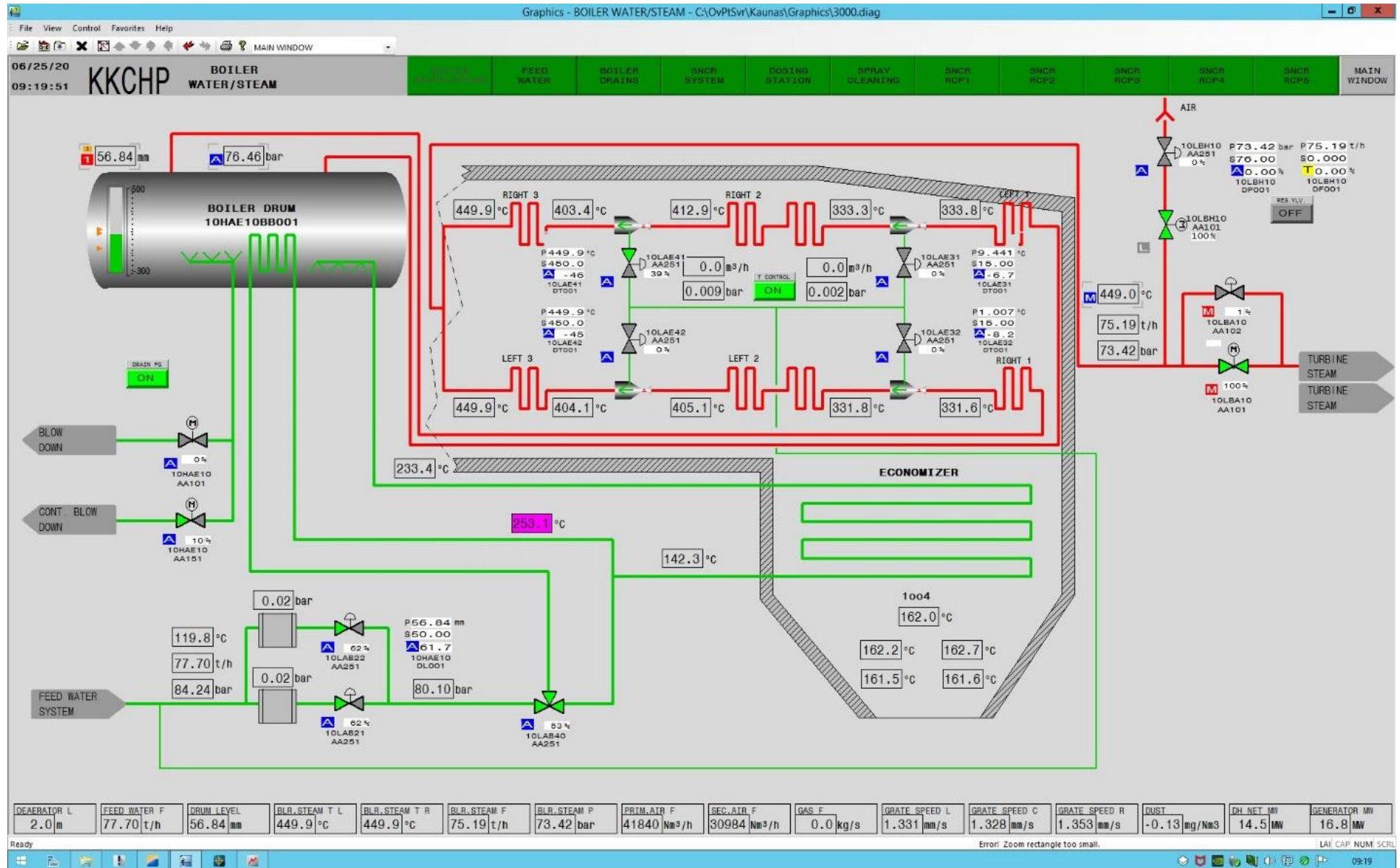
4 priedas. Pagrindinio garo srauto valdymo schema



# 5 priedas. Operatoriaus degimo sistemos langas

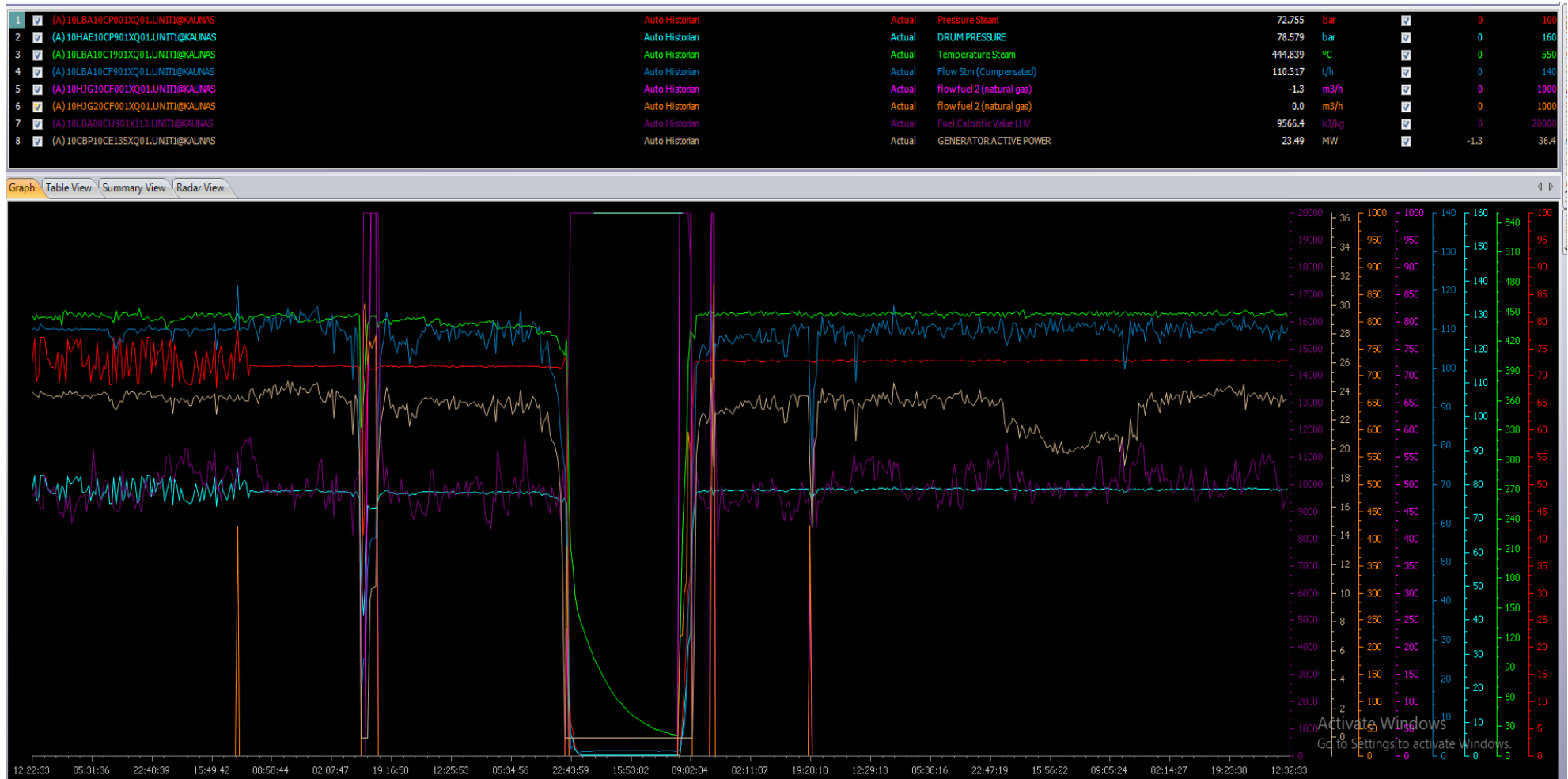


## 6 priedas. Operatoriaus garo katilo langas





## 7 priedas. Matavimai iš elektrinės



8 priedas. Kauno jėgainės blokinė schema

