



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Tomas Jonas Januška

**KATILO DŪMŲ TRAUKOS VALDYMO SISTEMOS SU
ADAPTYVIUOJU PID REGULIATORIUMI TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas
Prof. Vytautas Galvanauskas

KAUNAS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
AUTOMATIKOS KATEDRA

**KATILO DŪMŲ TRAUKOS VALDYMO SISTEMOS SU
ADAPTYVIUOJU PID REGULIATORIUMI TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas
Valdymo technologijos (621H66001)

Vadovas

(parašas) Prof. Vytautas Galvanauskas
2017-06-05

Recenzentas

(parašas) Prof. Donatas Levišauskas
2017-06-05

Projektą atliko

(parašas) Tomas Jonas Januška
2017-06-05

KAUNAS, 2017



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos

(Fakultetas)

Tomas Jonas Januška

(Studento vardas, pavardė)

Valdymo technologijos (621H66001)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto

„Katilo dūmų traukos valdymo sistemo su adaptyviuoju PID reguliatoriumi tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 ____ m. _____ d.

Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Tomo Jono Januškos** baigiamasis projektas tema „Katilo dūmų traukos valdymo sistemos su adaptyviuoju PID reguliatoriumi tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Tomas Jonas Januška. “Katilo dūmų traukos valdymo sistemos su adaptyviuoju PID reguliatoriumi tyrimas” valdymo sistemų magistro baigiamasis projektas / vadovas Prof. Vytautas Galvanauskas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Automatikos katedra.

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

Reikšminiai žodžiai: dūmų traukos sistema, adaptyvus valdymas, katilas, PTVM-100.

Kaunas, 2017. 68 p.

SANTRAUKA

Magistro studijų baigiamajame projekte aprašyta adaptyvi katilo PTVM-100 dūmų traukos valdymo sistema turėtų 1,5–2 % padidinti katilo naudingumo koeficientą ir galią, užtikrinti saugų katilo darbą bei sumažinti išmetamųjų teršalų (NO_x , CO ir kt.) kiekius. Darbe pateiktas dūmų traukos sistemos imitacinis modelis – pneumatinė sistema, imituojanti dūmų slėgio ir srautų keitimąsi, keičiantis traukos kanalo laidumui (žaliuzių atvėrimo laipsniui), kamino traukai ir dūmų slėgiui liepsnos zonoje. Modelyje įvertinti katilo ir traukos kanalo geometriniai, mechaniniai, aerodinaminiai parametrai ir dūmų temperatūros pokyčiai sistemoje. Modelis patikimai imituoja traukos sistemoje vykstantį dūmų pernešimo procesą, kurio negalima gauti eksperimentiniu keliu. Remiantis imitacinio modelio struktūra ir apskaičiuotais parametrais sudaryti šeši traukos sistemos tiesiniai dinaminiai modeliai, iš kurių kompiuterinio modeliavimo būdu gautos reakcijos kreivių šeimos visų įėjimo kintamųjų atžvilgiu kiekvienai dirbančių degiklių kombinacijai. Atlikus traukos valdymo sistemos ir jos galimų struktūrų analizę, tyrimui pasirinkta: vieno kontūro ARS su standartiniu PI reguliatoriumi ir adaptyvi sistema su PI reguliatoriumi, kurio parametrai nepertraukiamai koreguojami keičiantis degikliams tiekiamų dujų srautui. Abiejų sistemų reguliatoriai suderinti ITAE kriterijui. Matematinio modeliavimo būdu gauti ir tarpusavyje palyginti sudarytų valdymo sistemų kokybės rodikliai traukos sistemą veikiančių pagrindinių trikdžių – kamino traukos ir susidariusių dūmų slėgio atžvilgiu. Sudaryta programa adaptyvaus PI reguliatoriaus su pakopiniu derinimo parametru koregavimu realizavimu programuojamame loginiame valdiklyje (PLV). Modeliavimo keliu gauti ir įvertinti valdymo kokybės rodikliai, kai traukos procesą valdo pakopinį derinimo parametru koregavimą turintis PI reguliatorius.

Gauti tyrimo rezultatai leidžia daryti išvadą, kad katilo PTVM-100 dūmų traukai valdyti gali būti panaudotas adaptyvus PI reguliatorius tiek su nepertraukiamu tiek ir su pakopiniu derinimo parametru koregavimu.

Tomas Jonas Januska. Investigation Of Boiler Flue Gas Draft Control System Based On Adaptive PID Controller Master's thesis in control systems supervisor assoc. prof. Vytautas Galvanauskas. Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Automation

Research area and field: Electrical and Electronics Engineering, Technological Sciences

Key words: flue gas draft system, adaptive control, boiler, PTVM-100.

Kaunas, 2017. 68p.

SUMMARY

The final project of the master studies describes the adaptive flue gas control system of PTVM-100 boiler, which should increase the boiler efficiency factor and power by 1.5–2% allowing to achieve safe boiler operation and reduce emissions (NO_x, CO, etc.) The work presents the imitation model of the flue gas control system – a pneumatic system simulating the exchange of the flue gas pressure and flows with the change of the throughput of the draught channel (louvre opening degree), chimney draught and flue gas pressure in the flame zone. The model evaluates the geometric, mechanical, and aerodynamic parameters of the boiler and the draught channel, as well as the changes of the flue gas temperature in the system. The model reliably simulates the flue gas transfer process in the draught system, which cannot be obtained experimentally. Based on the simulation model structure and the calculated parameters, six linear dynamic models of the draught system were prepared. By means of computer-based simulation, reaction curve families (in terms of all input variables for each combination of operating burners) were obtained. After performing the analysis of the draught control system and its potential structures, the following structure control system was selected for the research: single loop control system with the standard PI regulator, and adaptive control system with PI regulator, with parameters being continuously adjusted according to the changing burners and the supplied flue gas flow. Regulators of both systems have been tuned according to ITAE criterion. Quality benchmarks of the developed control systems (in terms of the main disturbances affecting the draught system – chimney draught and the resulting flue gas pressure) were obtained by mathematical modeling, and compared with each other. The program was developed for the adaptive PI regulator with stepwise correction of tuning parameters in the programmable logical controller (PLC). The control quality benchmarks when the draught process is controlled by the PI regulator having the stepwise adjustment parameter correction were obtained and evaluated by means of simulation.

The results of the research allowed to conclude that the adaptive PI regulator with both continuous and stepwise correction of tuning parameters can be used for flue gas control of the PTVM-100 boiler.

Turinys

Įvadas	7
1. Katilų klasifikacija ir katilo charakteristikos	9
2. Degimo proceso parametrai	13
3. Katilo traukos sistemos imitacinis modelis	16
4. Katilo traukos sistemos dinaminis modelis	19
5. Traukos proceso modeliavimas	27
6. Traukos sistemos modelių perdavimo funkcijos	30
6.1 Reakcijos kreivių pakitus nuostatui aproksimavimas pirmos eilės perdavimo funkcijomis	31
6.2 Traukos sistemos antros eilės perdavimo funkcijų parametrai	31
7. Modelio su kintamais parametrais sudarymas	32
8. Katilo galios valdymo sistemos schema	34
9. Reikalavimai traukos valdymo sistemai	38
10. Standartinio PI regulatoriaus derinimo parametrų skaičiavimas	39
11. Sistemos su standartiniu PI regulatoriumi tyrimas	40
12. Adaptyvaus valdymo sistemos struktūra	44
13. Adaptyvaus PI regulatoriaus derinimas	45
14. Adaptyvaus PID regulatoriaus skaitmeninis modelis	47
15. Adaptyvios ARS valdymo kokybės tyrimas	47
16. Tiesinės ir adaptyvių valdymo sistemų kokybės palyginimas	50
17. Adaptyvaus PID regulatoriaus realizacija SIEMENS valdikliuose	53
18. Adaptyvaus PI regulatoriaus reguliavimo kokybės tyrimas tarpiniuose taškuose	54
Išvados ir rezultatai	58
Literatūros sąrašas	59
PRIEDAI	61
Priedas Nr.1 MATLAB programos tekstas objektų pirmos eilės perdavimo funkcijoms gauti	61
Priedas Nr.2 MATLAB programos tekstas objektų antros eilės perdavimo funkcijoms gauti	62
Priedas Nr.3 Adaptyvaus PID regulatoriaus realizacijos STEP7 pakete programos fragmentai.	63

Išvadas

Būstui, ofisui ar gamybinėms patalpoms šiluma gali būti tiekiamą centralizuotai arba iš vietinio šilumos šaltinio.

Centralizuotą šilumos tiekimo (CŠT) sistemą sudaro trys posistemai: karšto (termofikacinio) vandens jėgainė (katilinė), vamzdynai jungiantys jėgainę su vartotojais ir šilumos punktai, per kuriuos šiluma perduodama į vartotojų vidaus šilumos sistemas.

CŠT katilinės yra labai efektyvios, nes tam pačiam šilumos energijos kiekiui pagaminti sunaudoja daug mažiau kuro nei individualios ar grupinės katilinės. Pingant gamtinėms dujoms ir pradėjus plačiai naudoti biokurą bei buitines atliekas, CŠT tapo pigiausiu ir patogiausiu apsirūpinimo šiluma būdu. Šiuo būdu gaminant šilumą daug mažiau oras teršiamas anglies ir azoto oksidais, o aplinka – suodžiais ir kitomis kietosiomis dalelėmis. Lietuvoje CŠT katilinės yra pastatytos ir statomos už miesto ribų arba pramoniniuose rajonuose. Jų vieta būna parenkama atsižvelgiant į vietinius klimato veiksnius, vyraujančias vėjo kryptis ir kt. Katilinės turi 50–200 m. aukščio kaminus, taigi dūmai yra išmetami aukštai virš žemės paviršiaus ir išsisklaido didesnėje teritorijoje, todėl teršalų koncentracija gyvenamojoje aplinkoje išlieka santykinai maža.

Vietinės ir individualios katilinės teršia orą ten kur gyvenama. Be to CŠT katilinių taršą kontroliuoja valstybės institucijos, riboja aplinkosaugos normatyvai.

Naujai statomose CŠT katilinėse montuojami dūmavamzdžiai, biokuro ir kitokie šiuolaikinių konstrukcijų katilai. Šie katilai aprūpinti mažai NO_x išmetančiais degikliais, dūmų recirkuliacijos ir dūmų valymo sistemomis NO_x, CO, SO₂ kiekiui mažinti. Lietuvos didžiųjų miestų senosiose katilinėse iki šiol eksploatuojami didelės galios, iš dalies susidėvėję, Rusijoje gaminti termofikacinio vandens katilai. Siekdama pratęsti mažiau susidėvėjusių PTVM-100 modelio katilų tarnavimo laiką, Kauno termofikacijos elektrinė (KET), modernizuoja jų technologines ir automatizavimo sistemas. Didžiausias technologinės dalies modernizavimo efektas pasiekiamas senus dujų – mazuto degiklius pakeičiant naujais, didesnės galios degikliais, turinčiais autonomines kuro ir oro tiekimo sistemas, integruotas degimo proceso (santykio kuras – oras) valdymo ir apsaugos – signalizavimo sistemas. Naujų konstrukcijų degikliai leidžia realizuoti bepakopį katilo galios valdymą. Tai labai efektyvu, kai katilas dirba vienas ar su kitais katilais nuolatos keičiantis bendrai apkrovos galiai. Katilo vandens siurblių ir orapūčių varikliai pritaikomi dirbti per dažnio keitiklius, diegiamos daugiau katilo parametrų matuojančios ir valdančios sistemos, atnaujinama buvusi katilinės SCADA sistema.

Katilo technologinėje schemoje esančios dūmų traukos sistemos darbo efektyvumas daro žymią įtaką išmetamųjų teršalų koncentracijai, padidina katilo naudingumą ir užtikrina saugų katilo darbą. Keičiantis katilo apkrovai, aplinkos temperatūrai ir slėgiui ar kintant degimo proceso

parametrams atitinkamai privalo keistis ir susidariusių dūmų trauka. KET esantis 150 m aukščio kaminas įgalina panaudoti jo sukuriamą natūralią trauką katile susidariusių dūmų išmetimui. Darbe pateikiamos dūmų traukos valdymo sistemos paskirtis – droseliuojant dūmų srautą stabilizuoti slėgio kritimą katilo vertikalioje ašyje.

Darbe pateikiami traukos valdymo sistemos projektavimui reikalingi: katilo PTVM-100 dūmų traukos sistemos atstojamasis (imitacinis) ir dinaminis modeliai. Traukos sistemos atstojamasis modelis sudarytas padarius prielaidą, kad ji yra pasyvinė pneumatinė sistema, sudaryta iš nuoseklaus pneumatinių droselių ir pneumatinių talpų junginio. Remiantis šiuo modeliu sudarytas traukos sistemos dinaminis modelis, apskaičiuoti degimo proceso ir sudarytų modelių parametrai. Atliktas traukos sistemos su apskaičiuotais parametrais modeliavimas naudojantis MATLAB/Simulink paketu.

Modeliavimo būdu gautos valdymo sistemos projektavimui reikalingos slėgio kitimo katile kreivės – reakcijos: į šuolinį žaliuzių atvėrimą /privėrimą, šuolinį kamino traukos pokytį ir į degimui tiekiamo oro slėgio šuolį.

Modeliavimo būdu gautos reakcijos kreivės panaudotos traukos reguliavimo sistemos struktūrai ir reguliatorių tipui parinkti bei derinimo parametrams apskaičiuoti. Be to, sudarytas modelis panaudotas suprojektuotų reguliavimo sistemų dinaminių savybių tyrime.

Palyginta valdymo sistemų su standartiniu PI ir adaptyviu PI reguliatoriumi kokybė visame katilo galios kitimo diapazone.

Spręsti klausimai, susiję su adaptyvaus PI reguliatoriaus realizavimu Simatic valdiklyje. Ištirta, kaip keičiasi traukos valdymo sistemos dinaminės savybės, kai adaptyvaus reguliatoriaus savybės keičiasi pakopomis.

Pateikiamos išvados apie traukos adaptyvaus valdymo privalumus ir problemas valdiklyje realizuojant adaptyvų PI reguliatorių.

1. Katilų klasifikacija ir katilo charakteristikos

Pramoninio katilo paskirtis tiekti karštą vandenį arba garą patalpų šildymui, technologiniam procesui ar elektros energijos gamybai. Vandens katilai termofikacinėse elektrinėse dažniausiai dirba nuolatiniu arba pikiniu režimu, kai padidėja jėgainės šiluminė apkrova. Katile pašildomas vanduo iki 110–150 °C neturi pasiekti virimo temperatūros, tam tikslui sistemoje palaikomas atitinkamas vandens slėgis [2].

Vandens ir garo katilai skirstomi į dujų vamzdžių ir vandens vamzdžių katilus. Vandens vamzdžių katiluose degimo produktai šildo vamzdžius, kuriais teka vanduo ar vandens ir garo mišinys.

Vandens pašildymo katilai skirstomi į žemos temperatūros (≤ 115 °C) ir perkaitinto vandens – pašildantiems vandenį iki 150 °C ir didesnės temperatūros. Pastarieji yra patikimesni, ilgaamžiški, mažiau teršia aplinką, paprastesnės konstrukcijos ir paprasčiau valdomi.

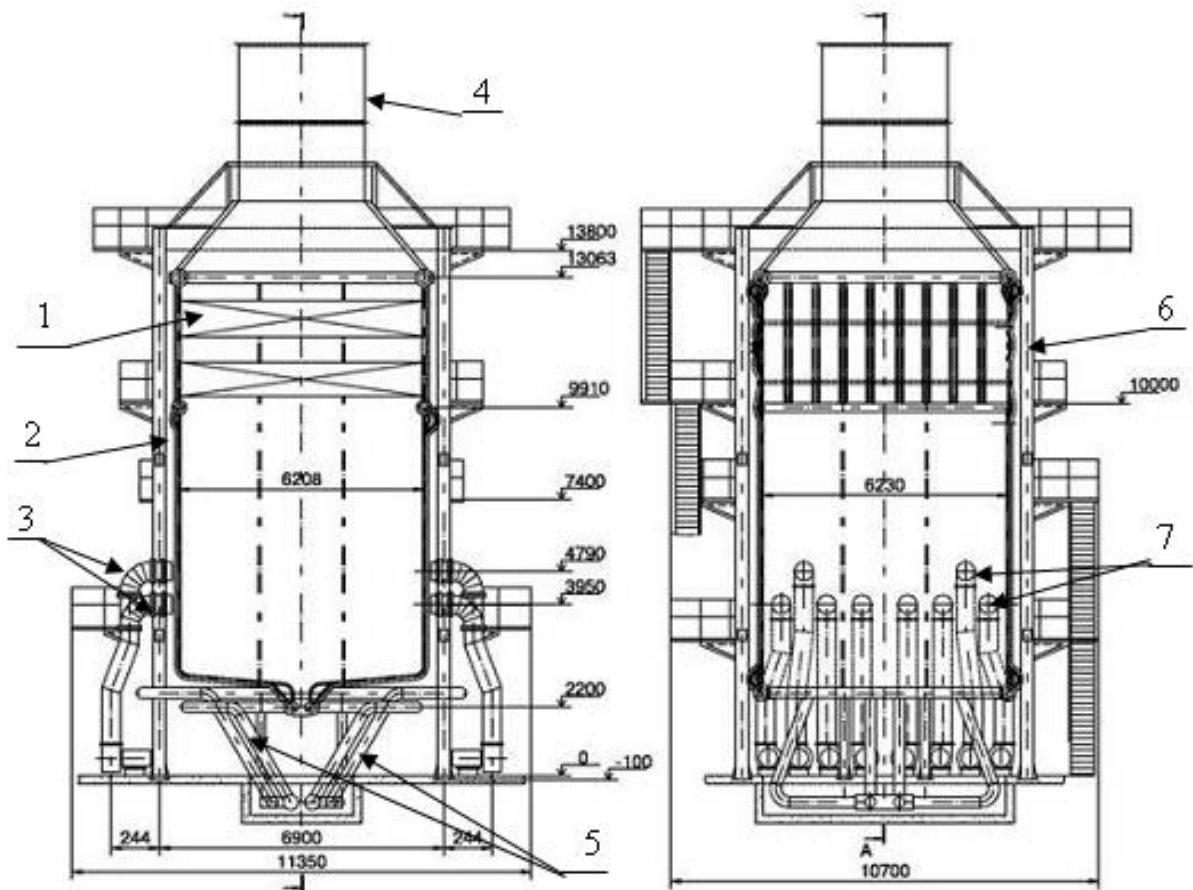
Daugelis pramoninių vandens katilų yra vandens vamzdžių konstrukcijos ir ruošia perkaitintą vandenį.

Pagal naudojamo kuro rūšį katilai skirstomi : dujų, dujų – mazuto, kieto kuro ir biokuro katilus. Dujų katilai mažiausia teršia aplinką, turi aukštą naudingumo koeficientą, patikimi, paprastai aptarnaujami. Biokuro katilai patys ekonomiškiausi ir ekologiškiausi. Dujų-mazuto katiluose esantys universalūs, abiem kuro rūšims pritaikyti degikliai.

Pagal oro - dūmų trakto struktūrą katilai skirstomi į: sistemas su orapūte-dūmsiurbiu ir sistemas tik su orapūte. Pastarosios struktūros katile susidariusių dūmų trauką garantuoja aukštas kaminas.

Katilas PTVM-100 yra didelės – 116,3 MW (100 Gcal/h) šiluminės galios, kvadratinio skerspjūvio vertikalios konstrukcijos, vandens vamzdžių, perkaitinto vandens paruošimo, dujų-mazuto degiklių ir dirbantis tik su orapūte.

Katilo PTVM-100 konstrukcija su pagrindiniais matmenimis ir technologiniais mazgais matoma 1 paveiksle [8].



1.1 pav. Katilas PTVM-100.

Konstruktinėje schemoje: viršutinis kolektorius – 1; vamzdžių ekranas – 2; ortakiai į degiklius – 3; dūmtraukis – 4; vandens įtekėjimo ir ištekėjimo vamzdžiai – 5; katilo termoizoliacija – 6 ir degikliai – 7.

Pastoviu režimu dirbantis katilas pašildo termofikacinį vandenį nuo 70 iki 150 °C, o impulsiniu režimu nuo 110 iki 150 °C. Pašildyto vandens nominalus srautas impulsiniame režime $2140 \cdot 10^3$ kg/h, nuolatiniam – $1500 \cdot 10^3$ kg/h.

Pagrindinis kuras – gamtinės dujos, rezervinis – mazutas. Katilo galia valdoma keičiant pašildomo vandens temperatūrą, nekeičiant nustatyto vandens srauto.

Katilo gamintojo numatytas pakopinis galios valdymas 25–100 % diapazone keičiant dirbančių degiklių skaičių. Katile sumontuota 14 degiklių, kurių kiekvieno galia 8 MW. Degimui reikalingą orą kiekvienam degikliui tiekia atskiras ventiliatorius. Modernizuojamuose katiluose diegiamos autonominės kiekvienam degikliui tiekiamų dujų ir oro srautų tolydinio valdymo sistemos. Šios sistemos išsiplėčia katilo našumo keitimo diapazoną iki 15–100%, 2–4% padidėja katilo naudingumo koeficientas ir įgyvendinamas švelnus galios keitimas būdas. Valdant galią tokiu būdu išnyksta dujų srauto ir slėgio šuoliai tiekimo sistemoje.

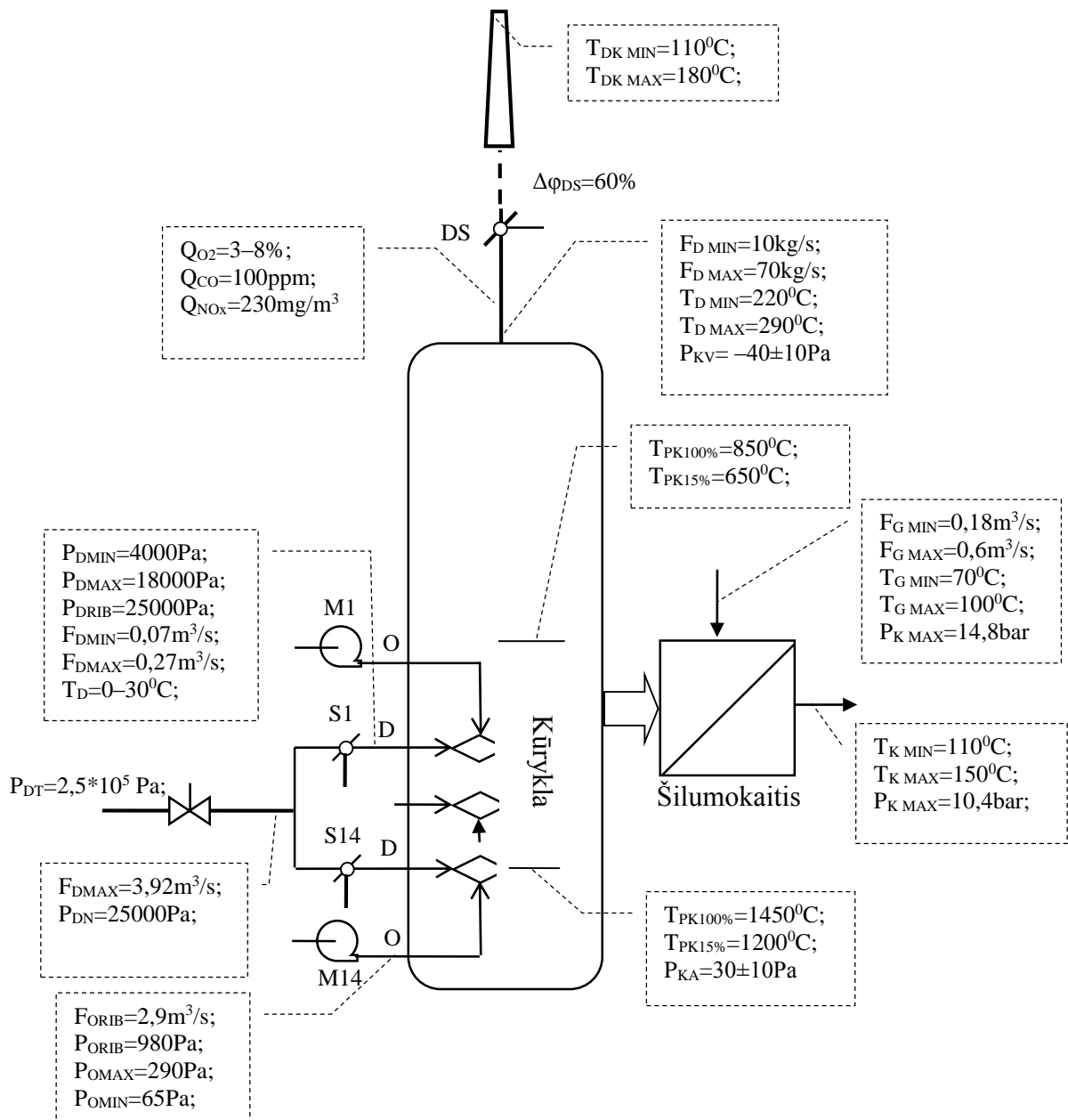
Katilo degimo kamera: kūrykla 244 m^3 (6,23 x 6,23 x 6,3 m), viršutinės prizminės dalies su dūmtraukių tūris 196 m^3 . Kameros šoninius paviršius dengia: vertikalių U formos

vamzdžių (\varnothing 60x3 mm) paketai po 96 ir 98 vamzdžius kiekvienoje sienoje su angomis degikliams. Oro tarpeliai tarp vamzdžių 3–4 mm. Prieš patekdami į dūmtraukį degimo produktai prateka per konvekcinę dalį – du U formos vamzdžių daugiasluoksnius paketus. Gyvatuko vamzdžių diametras 28 mm, tarpai 5 mm. Katilo šilumokaičio (kamos ekranų ir konvekcinės dalies) šilumą priimančios dalies suminis plotas 3184 m². Šilumokaitį užpildžiusio vandens tūris 30 m³.

Katilo trauka natūrali – esant reikiamo aukščio kaminui nereikalinga dūmsiurbė, kurią sukančio variklio galia būna iki 250 kW.

Degikliams orą tiekia 10 kW galios asinchroninis variklis. Modernizuotuose katiluose šie varikliai valdomi naudojant dažnio keitiklius.

Katilo būseną darbo metu aprašo keliolika šiluminių, hidraulinių, aerodinaminių ir mechaninių parametru: dujų, vandens ir degimo produktų temperatūros, slėgiai ir srautai, kurie katilo darbo metu matuojami ir reguliuojami. Katilą veikiantys pagrindiniai trikdžiai: grįžtančio vandens ir aplinkos temperatūros pokyčiai. Pagrindinių katilo PTVM-100 parametru minimalios, maksimalios ir nominalios vertės parodytos 2 paveiksle.



1.2 pav. Katilo technologinė schema

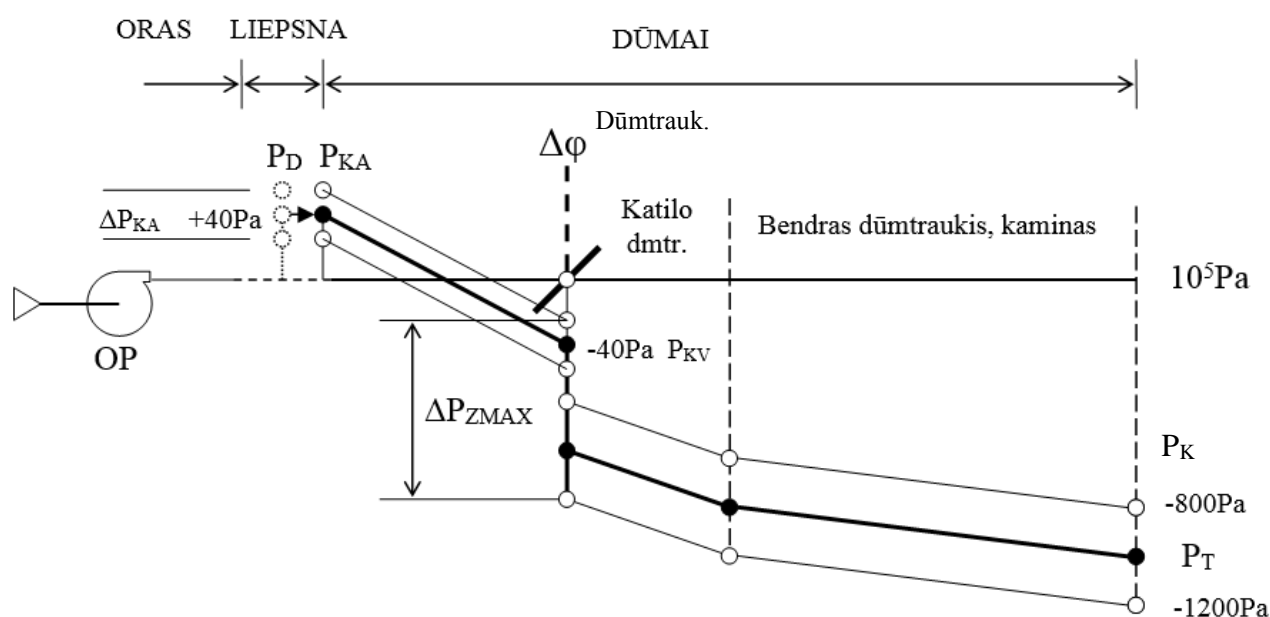
Bendroje dujų magistralėje palaikomas $P_{DT} = 2,5$ barų slėgis, maksimaliu $F_{D\ MAX} = 3,92\text{ m}^3/\text{s}$ srautu. Iš bendros magistralės dujos, per sklendes S1–S14 paskirstomos į kiekvieną degiklį atskirai. Į kiekvieną degiklį tiekiamų dujų srautas (F_D), priklausomai nuo apkrovos, gali kisti $0,07-0,27\text{ m}^3/\text{s}$ ribose, dujų slėgis (P_D) $4000-18000\text{ Pa}$. Oras degikliams, orapūtėms M1–M16, tiekiamas per atskirus ortakius. Paduodamo oro slėgis (P_O), priklausomai nuo apkrovos, svyruoja $65-980\text{ Pa}$, ribinis srautas $F_{ORIB} = 2,9\text{ m}^3/\text{s}$.

Kūrykloje, ties degikliais, temperatūra T_{PK} , priklausomai nuo apkrovos (15%–100%), svyruoja $1200-1450^{\circ}C$. Dūmų temperatūra virš degiklių T_{PK} keičiasi $650-850^{\circ}C$ ribose priklausomai nuo katilo apkrovos [8].

I šilumokaitį grįžtančio vandens srautas (F_G) svyruoja 0,18–0,6 m³/s ribose, temperatūra (T_G) 70–100 °C. Grįžtančio vandens maksimalus slėgis $P_{K\text{MAX}} = 14,8$ bar. Ištekancio vandens temperatūra (T_K), priklausomai nuo apkrovos, svyruoja 110–150 °C ribose. Ištekancio vandens maksimalus slėgis $P_{K\text{MAX}} = 10,4$ bar.

Išeinančių dūmų temperatūra dūmtraukyje (T_D) svyruoja, priklausomai nuo apkrovos, 220–290 °C ribose. Dūmų srautas (F_D) taip pat priklauso nuo katilo apkrovos ir gali kisti nuo 10 iki 70 kg/s. Katilo dūmtraukio pradžioje turi būti palaikomas pastovus praretinimas $P_{KV} = -40 \pm 10$ Pa. Išeinančių dūmų temperatūra kamino viršuje (T_{DK}) svyruoja nuo 110 iki 180 °C.

Dūmų slėgio kitimas katilo vertikaloje ir likusioje traukos sistemoje parodyta 1.3 paveiksle.



1.3 pav. Slėgio kitimas traukos sistemoje

Kūryklos apatinėje dalyje maždaug degiklių lygyje, turi būti palaikomas $P_{KA} = 40$ Pa slėgio perviršis lyginant su atmosferos slėgiu ($\approx 10^5$ Pa). Susidariusiems dūmams kylant aukštyn per katilą, slėgis turi kristi 80 Pa ir ties katilo dūmtraukio pradžioje turi atsirasti praretinimas lygus -40 Pa. Praretinimas (P_{KV}) palaikomas keičiant, katilo dūmtraukyje esančių, žaliuzių atvėrimo kampą $\Delta\phi$. Kamino viršuje, priklausomai nuo oro temperatūros, praretinimas (P_{KV}) svyruoja tarp -800 ir -1200 Pa. Didelė (30–60 %) dalis kamino sukurtos traukos sunaudojama trinties ir vietiniams nuostoliams traukos sistemoje nugalėti.

2. Degimo proceso parametrai

Dujų degimo metu gamtinėse dujose esantys degūs anglies junginiai jungdamiesi su ore esančiu deguonimi sudaro naujus junginius ir jungimosi metu išskiria šilumą.

Į katilo kūryklą tiekiamos gamtinės dujos yra degių ir nedegių cheminių medžiagų mišinys, kurio sudėtinės komponentės ir jų tūriniai kiekiai pateikti 2.1 lentelėje, degimo procesui tiekiamo oro sudėtis matoma 2.2 lentelėje [2].

2.1 lentelė. Gamtinių dujų sudėtis

Gamtinių dujų sudėtis		
Dujų komponentė	Cheminė formulė	Tūrinė dalis %
Metanas	CH ₄	98,117
Etanas	C ₂ H ₆	0,7
Propanas	C ₃ H ₈	0,225
Butanas	C ₄ H ₁₀	0,04
Pentanas	C ₅ H ₁₂	0,009
Azotas	N ₂	0,811
Deguonis	O ₂	0,009
Anglies dioksidas	CO ₂	0,042

2.2 lentelė. Tiekiamo oro sudėtis

Deguonies sudėtis		
Dujų komponentė	Cheminė formulė	Tūrinė dalis %
Azotas	N ₂	78
Deguonis	O ₂	21
Argonas	Ar	1
Anglies dioksidas	CO ₂	0,03
Helis	He	iki 0,001
Vandenilis	H ₂	iki 0,001
Neonas	Ne	iki 0,001
Metanas	CH ₄	iki 0,001
Kriptonas	Kr	iki 0,001
Ksenonas	Xe	iki 0,001

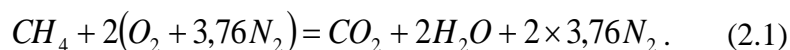
Gamtinėse dujose esantys: metanas (CH₄), etanas (C₂H₆), propanas ir butanas yra degūs, kitos dujų komponentės nedegios. Degdamas metanas sukuria apie 97 % visos šilumos energijos, maždaug 2 % – degdamas etanas. Kūrykloje įkaisdami nedegūs dujų komponentai sukuria tik šilumos energijos nuostolius.

Priklausomai nuo kūryklai tiekiamų dujų ir oro santykio, degios dujų komponentės gali sudegti pilnai arba dalinai. Su dūmais į aplinką ištraukiami nesudegę dujų komponentai išsiskiria anglies viendeginis (CO) ir kiti teršalai.

Katilo modeliams sudaryti apskaičiuojami katilui tiekiamo oro ir degimo metu susidariusių degimo produktų srautai ir tūriniai kiekiai.

Skaičiavimuose daroma prielaidos, kad katilui tiekiamas dujas sudaro tik metanas (CH₄), ore esantis deguonis sudaro 21 % oro tūrio ir ore esančių – azoto (N₂) ir deguonies (O₂) tūrinis santykis lygus 3,76.

Pilną metano sudegimą aprašo tokia reakcijos lygtis:



Pagal šią išraišką vienai CH₄ tūrinei daliai pilnai sudegti reikalingos 2O₂ ir 7,52N₂ tūrinės dalys. Tokiu būdu metano 1 m³ pilnai sudegti reikalingas oro tūris $V_{TO} = 2 + 7,52 = 9,52m^3$.

Pagal reakcijos lygtį (2.1) 1 m³ metano sudegti reikalingas dujų mišinio teorinis tūris:

$$V_{TD} = V_{CH} + V_{TO} = 1 + 9,52 = 10,52 \text{ m}^3. \quad (2.2)$$

Įvertinus leistiną oro perviršio koeficientą ($\alpha=1,2$) dujų mišinio tūris sudegus 1 m³ metano būtų:

$$V_{DL} = V_{TD} + (\alpha - 1)V_{TO} = 10,52 + (1,2 - 1) \times 9,52 = 12,42 \text{ m}^3. \quad (2.3)$$

Priklausomai nuo katilo apkrovos (įjungtų degiklių skaičiaus) vidutinė temperatūrą katilė būna nuo 650 iki 750 K. Iš kamino išmetamų dūmų temperatūra keičiantis apkrovai kinta nuo 400 iki 450 K. Priimu, vidutinę dūmų temperatūrą visoje traukos sistemoje lygią 550 K ($T_D = 550$ K), degimui tiekiamo oro temperatūrą $T_O = 300$ K ir slėgį labai artimą atmosferiniam – $P_O = P_D = 10^5$ Pa. Apskaičiuoju išsiskyrusių dūmų tūrį sudegus 1 m³ dujų.

$$V_D = \frac{V_{DL} P_D T_D}{T_O P_O} = \frac{12,42 * 10^5 * 550}{300 * 10^5} = 22,8 \text{ m}^3. \quad (2.4)$$

Tiekiant į kūryklą 1 m³/s dujų tūrio srautą skirtinguose traukos sistemos pjūviuose prateka skirtingas, nuo dūmų temperatūros priklausantis dūmų tūrio srautas.

Sudegus 1 m³ dujų susidariusių dūmų masė:

$$m_D = V_D \times \rho = 22,8 \times 0,719 = 16,4 \text{ kg}, \quad (2.5)$$

čia $\rho = 0,719$ kg/m³ – 550 K temperatūros dūmų tankis.

Degant 1 m³/s dujų srautui visuose traukos sistemos pjūviuose prateka tas pats dūmų masės srautas, lygus 16,4 kg/s.

Lentelėje 2.1 pateikti apskaičiuoti minimalūs ir maksimalūs dūmų masės srautai skirtingiems įjungtų degiklių skaičiams.

2.1 lentelė

Įjungtų degiklių skaičius/katilo galia/siluminė apkrova N/MW/Gcal/h	Minimalus dujų srautas F_{KMIN} m ³ /s	Maksimalus dujų srautas F_{KMAX} m ³ /s	Minimalus dūmų masės srautas traukos sistemoje F_{DMIN} kg/s	Maksimalus dūmų masės srautas traukos sistemoje F_{DMAX} kg/s
1	2	3	4	5
4/35,0/30,0	0,54	1,07	8,86	17,55
6/52,3/45,0	1,07	1,59	17,55	26,10
8/69,8/60,0	1,59	2,12	26,10	34,77
10/87,3/75,0	2,12	2,65	34,77	43,46
12/104,4/90,0	2,65	3,18	43,46	53,15
14/116,3/100,0	3,18	3,55	53,15	58,22

3. Katilo traukos sistemos imitacinis modelis

Degimo proceso metu katilo kūrykloje išsiskyrę dūmai apteka įvairias kliūtis: šilumokaičio vamzdžius, konvektorius, trauką valdančias žaliuzes dūmtraukio posūkius, susiaurėjimus ir atšakų į kitus katilus angas ir kaminą. Traukos kanalais tekėdami dūmai palaipsniui vėsta nuo 700–900 °C susidarymo zonoje iki 120–180 °C kamino viršuje. Dėl šių ir kitų priežasčių dūmų srautus ir slėgius atskirose traukos sistemos dalyse sieja sudėtingos, kintančios priklausomybės. Neturint katilo PTVM-100 traukos sistemos parametrų kitimo grafikų ir neesant galimybių eksperimentuoti su veikiančiu katilu, realų traukos sistemos dinaminį modelį sudaryti nebuvo galimybių. Panaudojus surinktus katilo ir jo traukos sistemos konstrukcinius ir technologinius duomenis, buvo sudarytas realios traukos sistemos imitacinis modelis, kuris toliau laikomas realaus katilo traukos sistema.

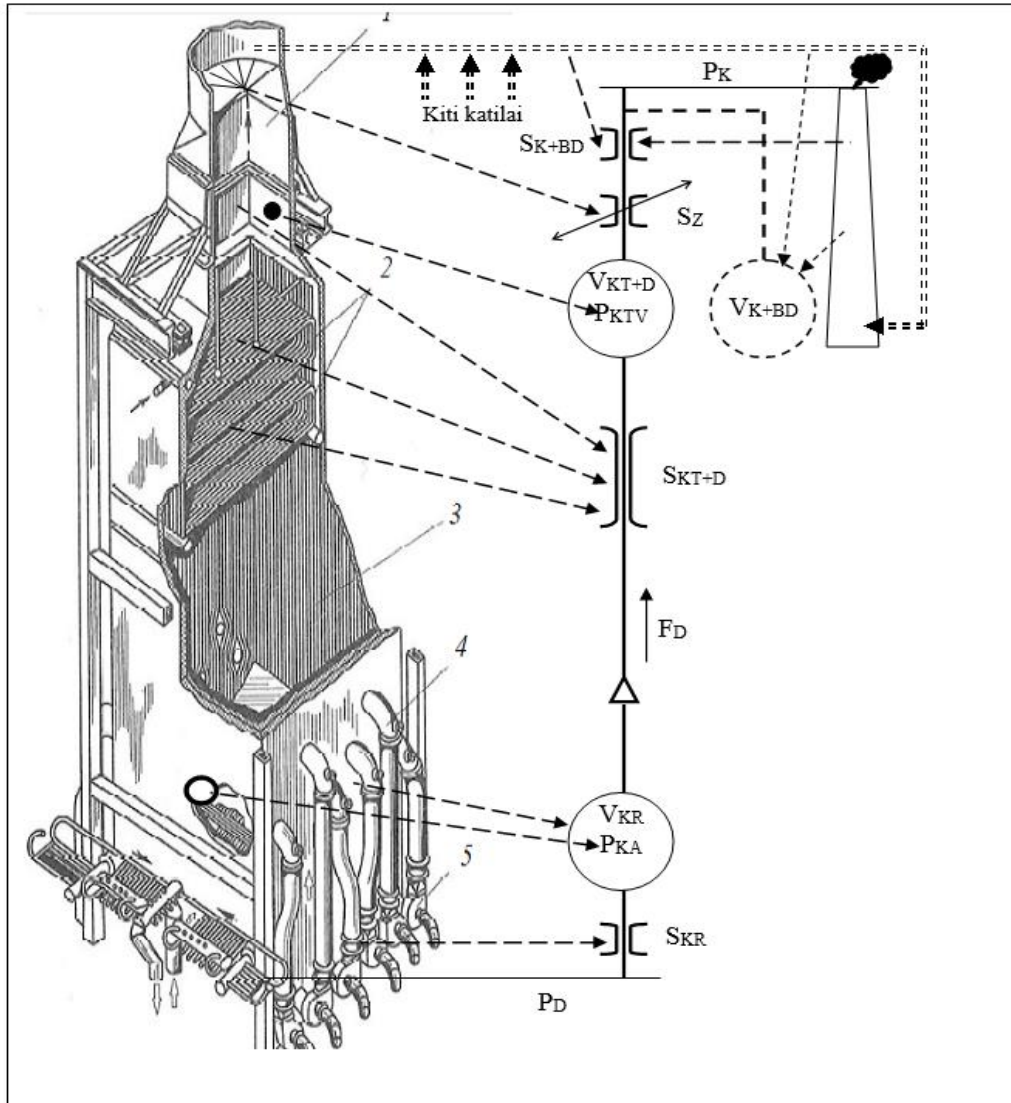
Modeliui sudaryti taikytas literatūroje [lit.6] aprašytas analogijos tarp skirtingos prigimties procesų: elektrinių, šiluminių, hidraulinių ir netgi mechaninių metodas. Visi šie procesai aprašomi analogiškėmis diferencialinėmis lygtimis, šiuos procesus galima skaidyti į atskirus, lengvai aprašomus procesus, po to jungiant juos į bendrą sistemą.

Sudarant imitacinį (analogo) modelį siekta, kad jis pakankamu tikslumu imituotų dūmų susidarymo procesą, dūmų temperatūros, slėgio ir srauto kitimo procesus katilo PKVT-100 traukos sistemoje. Toks modelis galėtų būti panaudotas ir kitų, sudėtingų traukos sistemų dinaminėms savybėms tirti ir jų valdymo sistemoms analizuoti ir projektuoti.

Darbe pateikiamas traukos sistemos imitacinis modelis – pasyvinė pneumatinė sistema, susidedanti iš nuosekliai sujungtų pasyvinių elementų: pneumatinių droselių, pneumatinių talpų ir neinerinių pneumatinių linijų (3.1 pav.). Pneumatinė sistema suskaidoma į elementų junginius, kurių dinaminės savybės aprašomos tiesinėmis diferencialinėmis lygtimis ar perdavimo funkcijomis. Sudarytas modelis pakankamu tikslumu imituoja realios traukos sistemos elgseną, keičiantis ją veikiantiems išoriniams poveikiams.

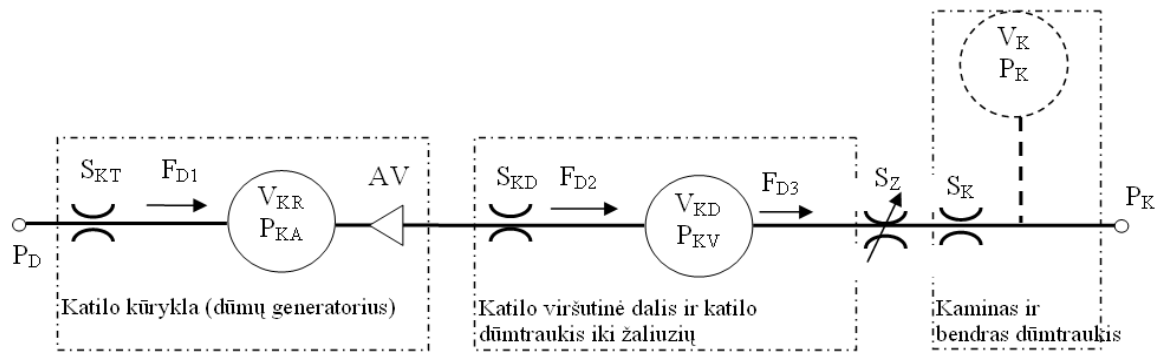
Katilą PTVM-100 sudaro: dūmtraukis su trauką keičiančiomis žaliuzėmis (1), konvektoriai (2), vertikalių vamzdžių šilumokaitis (3), kūrykla su ortakiais ir degikliais (4) ir termofikacinio vandens komunikacijos (5) (3.1 pav.). Tame pačiame paveiksle pavaizduotame traukos sistemos imitaciniame modelyje esantys žymėjimai: P_D – liepsnos zonoje susidariusių dūmų slėgis; P_{KA} – slėgis kūryklos apatinėje dalyje; P_{KV} – slėgis katilo dūmtraukio pradžioje; P_K – kamino trauka; F_D – dūmų masės srautas; S_{KR} ir V_{KR} – kūryklos laidumą modeliuojantis droselis ir kūryklos talpa; S_{KT+D} ir talpa V_{KT+D} katilo viršutinės dalies ir katilo dūmtraukio modelis; S_Z – trauką keičiančių žaliuzių laidumas; S_{K+BD} – kamino ir bendro dūmtraukio laidumas; V_{K+BD} – kamino ir bendro dūmtraukio talpa.

Traukos sistemą veikiantys pagrindiniai trikdžiai: $P_D = f(F_O, F_K, T_{KR})$ – dūmų slėgis liepsnos zonoje ir $P_K = f(T_O, T_D, p_{AP})$ – kamino sukurta trauka. Valdymo poveikis – žaliuzių laidumo pokytis: 0–100 %. Trikdžiai kinta keičiantis: tiekiamų dujų ir oro srautams, aplinkos ir dūmų temperatūroms ir aplinkos slėgiui ($F_O, F_K, T_{KR}, T_O, T_D, p_{AP}$).



3.1 pav. Katilas ir traukos sistemos imitacinis modelis

Tolimesniuose skaičiavimuose naudoju 3.2 paveiksle, iš elementarių pneumatinių grandžių sudarytą traukos sistemos imitacinį modelį.



3.2 pav. Traukos sistemos imitacinis modelis

Dinaminiam modeliui gauti traukos sistemos imitacinis modelis (3.2 pav.) padalinamas į elementarias pneumatines grandines ir priimama, kad dūmai visoje sistemoje teka laminarine tėkme. Tai leidžia pneumatines grandis (3.3 pav.) aprašyti perdavimo funkcijomis su pastoviais parametrais.

Visų grandžių savybes aprašo du kintamieji: slėgis arba slėgių skirtumas ir dūmų (oro) masės srautas.

Laminarinės dūmų tėkmės atveju droselis aprašomas pastoviu perdavimo koeficientu K_D , apskaičiuojamu pagal tokią išraišką:

$$K_D = \frac{F_T \times \rho}{\Delta P} = \frac{F}{\Delta P}. \quad (3.1)$$

čia: $\Delta P = P_1 - P_2$ – slėgio kritimas droselyje, lygus slėgių prieš ir už droselio skirtumui (Pa); F_T ir ρ – dūmų tūrinis srautas (m^3/s) ir dujų tankis (kg/m^3); F – dūmų masės srautas (kg/s).

Indą, kuriame kaupiasi dūmai (oras) aprašo pneumatinė talpa (kg/Pa):

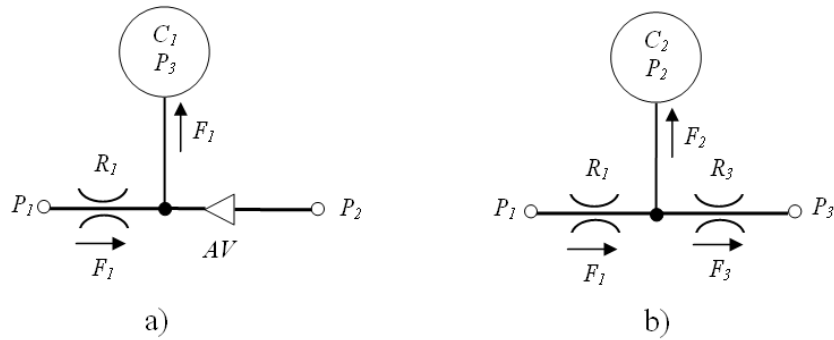
$$C = \frac{V \times \rho}{n \times P} = \rho \frac{dV}{dP}. \quad (3.2)$$

čia: V – uždaro indo tūris (m^3); ρ – indą užkildžiusių dujų tankis (kg/m^3); P – indą užpildžiusių dujų slėgis (Pa); $n = 1$ – izoterminio proceso koeficientas.

Pneumatinę magistralę (bendrą dūmtraukį ir kaminą) apibudina slėgio ar srauto fronto sklidimo trukmė, apskaičiuojama pagal išraišką:

$$\tau = \frac{l}{w}. \quad (3.4)$$

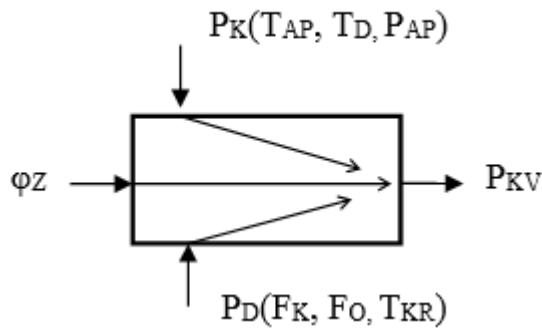
čia: w – vidutinis slėgio ar srauto fronto greitis (m/s); l – magistralės ilgis (m).



3.3 pav. Pneumatinių grandžių schemas

4. Katilo traukos sistemos dinaminis modelis

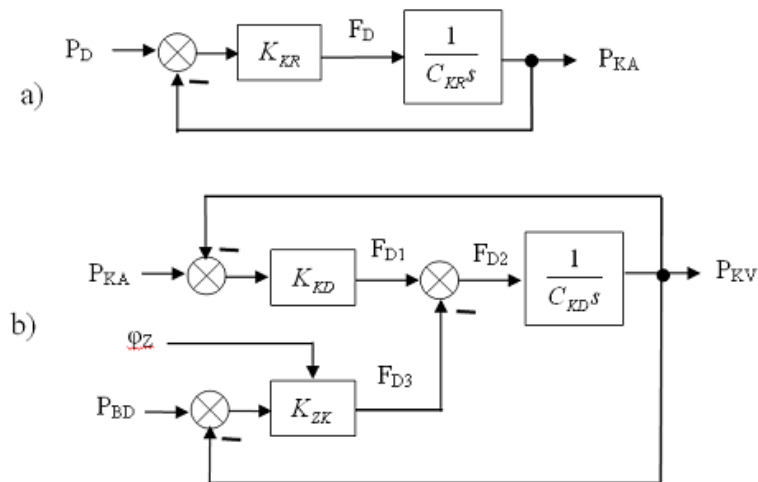
Pradinė traukos sistemos struktūra parodyta 4.1 paveiksle.



4.1 pav. Traukos sistemos struktūra

Sistemą veikiantys išoriniai trikdžiai yra slėgis dūmų susidarymo zonoje P_D ir kamino trauka (P_K) priklausantys nuo: tiekiamo kuro srauto F_K , oro srauto F_D , temperatūros degimo zonoje T_{KR} , aplinkos ir dūmų temperatūrų T_{AP} ir T_D , ir slėgio P_{AP} .

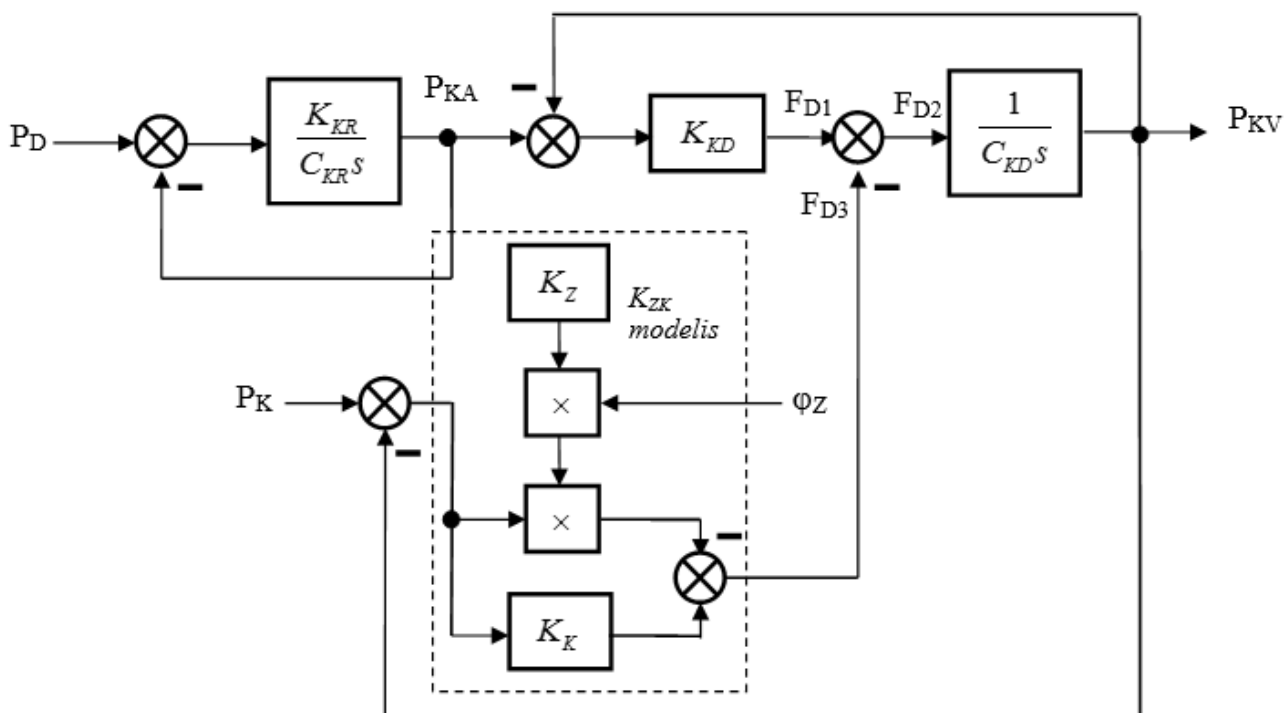
Pirmajame sistemos dinaminio modelio sintezės etape sudaromos imitacinį modelių sudarančių grandžių (3.3 pav.) struktūrinės schemas (4.2 pav.).



4.2 pav. Pneumatinių grandžių struktūrinės schemas

Pažymėjimai 4.2 paveiksle: K_{ZK} – bendras žaliučių, dūmtraukio ir kamino perdavimo koeficientas; P_{BD} – slėgis bendrame dūmtraukyje.

Antrajame modelio sintezės etape sudaroma imitacinio modelio struktūrinė schema (4.3 pav.), kuri toliau laikoma traukos sistemos dinaminio modeliu.



4.3 Traukos sistemos struktūrinė schema

Trečiajame modelio sudarymo etape apskaičiuojami 4.3 paveiksle pateiktos struktūrinės schemos parametrai. Galutiniam sistemos modeliui sudaryti reikalingi parametrai: dūmų srauto kitimo inertiškumas dėl dūmų spūdumo ir baigtinis žaliuzių atsivėrimo ar užsivėrimo greičiai, slėgio P_D kitimo inertiškumas, keičiantis degimui tiekiamo oro slėgiui ir kamino traukos kitimas staiga pasikeitus aplinkos slėgiui, pavyzdžiui nuo vėjo gūσιο virš kamino.

Realiai išmatuoti visų šių kintamųjų įtaką sistemos dinamikai būtų reikalinga atitinkama matavimo įranga ir galimybė eksperimentuoti su veikiančiu katilu.

Kamino (150 m aukščio) sukurta trauka turi būti didesnė už maksimalius aerodinaminis nuostolius katilo traukos sistemoje, kurie priklauso nuo susidariusių dūmų srauto, kitų katilų poveikio traukai, nuo išorės slėgio ir temperatūros.

Traukos kintamuosius turi sieti tokia priklausomybė

$$P_K \geq \sum \Delta P_A + \Delta P_{KT} - P_{KA}. \quad (4.1)$$

čia: P_K – kamine sukurta trauka, Pa; ΔP_A – aerodinaminiai nuostoliai traukos sistemoje, Pa; ΔP_{KT} – dūmų traukai reikalingas slėgio kritimas katilo vertikaloje, Pa; P_{KA} – viršslėgis kūryklos apačioje.

Aerodinaminiai nuostoliai traukos sistemoje yra dėl trinties ir vietinių kliūčių atsiradęs slėgio kritimas kamine, bendrame ir katilo dūmtraukiuose ir trauką reguliuojančiose žalizėse:

$$\sum \Delta P_A = \Delta P_K + \Delta P_{BD} + \Delta P_{KD} + \Delta P_Z. \quad (4.2)$$

Pagal katilo PTVM-100 darbo režimų kortą slėgis kūryklos viršuje (P_{KV}) turi būti 40 Pa žemesnis už atmosferos slėgį, o jo nuokrypis neturi viršyti ± 10 Pa. Fakelų liepsnos sukeltų slėgio pulsacijų dažnis būna 2 – 10 Hz, o amplitudė neturi viršyti ± 15 Pa. Viršijus šias ribas katilas stabdomas avariniu būdu. Siekiant katilo optimalaus darbo režimo slėgio nuokrypiai ir pulsacijos turi būti minimizuoti. Pagal režimų kortą liepsnos fakelų zonoje (apatinėje kūryklos dalyje) slėgio perviršis (P_{KA}) turi būti 40 ± 5 Pa. Optimaliam traukos palaikymui kūryklos vertikalėje slėgio kritimas ΔP_{KT} turi būti pastovus ir lygus 80 Pa (8 mm H₂O stulpelio).

Slėgių skirtumas katilo vertikalėje stabilizuojamas keičiant katilo dūmtraukio kanale įstatytų žaliuzių aerodinaminį laidumo koeficientą, tai yra keičiant jų atvėrimo kampą. Keičiantis dūmų srautui žaliuzių atvėrimo kampas keičiasi nuo 20 % iki 80–85 %, šiame diapazone žaliuzių statinė charakteristika išlieka artima tiesinei.

Kamino sukurta trauka (slėgio sumažėjimas kamine) apskaičiuojama pagal išraišką:

$$P_K = \frac{H_K g p_o \left(\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_D} \right)}{R_o}. \quad (4.3)$$

čia: $H_K = 136$ m – kamino aktyvios (dūmais užsipildžiusios) dalies aukštis; $p_o = 10^5$ Pa – vidutinis aplinkos slėgis; T_o ir T_D – oro ir dūmų temperatūros, K; $R_o = 287$ – dujų konstanta orui; $g = 9,81$ m/s².

Skaičiavimuose priimta: maksimali oro temperatūrą vasarą 300 K, žiemą – 240 K, vidutine dūmų temperatūrą kamine 600 K.

Pagal (4.3) apskaičiuota: kamino trauka žiemą –1160 Pa (kai –33⁰C) ir vasarą –780 Pa (kai +27⁰C). Minimalios kamino traukos turi pakakti nugalėti didžiausius sistemos aerodinaminius nuostolius katilui dirbant maksimalia apkrova ir garantuoti katilo reglamente rekomenduojamą dūmų greitį sistemoje ne mažesnę 15–20 m/s.

Aerodinaminiai nuostoliai bet kurioje traukos sistemos dalyje susideda iš nuostolių dėl trinties į kanalo paviršių ir nuostolių dėl vietinių kliūčių kanale (susiaurėjimų, angų į kitus katilus, kanalo kampų ir kt.), apskaičiuojami pagal tokias išraiškas:

$$\Delta P_{TR} = \lambda \frac{L}{d_E} * \frac{\rho_D * v_D^2}{2} \text{ ir } \Delta P_V = \xi \frac{\rho_D * v_D^2}{2}. \quad (4.4)$$

čia: trinties koeficientas λ priklauso nuo dūmų kanalo paviršiaus šiurkštumo: $\lambda=0,015$ metaliniam kanalui (katilo ir bendram dūmtraukiui) ir 0,02 – gelžbetonio kaminui; vietinių nuostolių koeficientas $\xi= 0,1-0,4$ – priklausantis nuo kanalo konfigūracijos, vietinių kliūčių, atšakų į kitus katilus ir pan.; ρ_D – priklausantis nuo temperatūros kanalo dalimi pratekančių dūmų tankis; L ir d_E – dūmų kanalo ilgis ir ekvivalentinis diametras; v_D – nuo susidariusio dūmų kiekio priklausantis jų tėkmės greitis.

Skaičiavimuose priimta laminarinė dūmų tėkmė ir pastovus vietinių nuostolių koeficientas.

Katilo PTVM-100 traukos kanalo reikalingas ekvivalentinis diametras apskaičiuojamas katilui dirbant maksimalia galia:

$$d_E = \sqrt{\frac{4F_{D1} \times F_{KMAX}}{\pi \times \rho_D \times v_D}} = \sqrt{\frac{4 \times 16,4 \times 3,55}{3,14 \times 0,756 \times 20}} = 2,12m. \quad (4.5)$$

Čia: F_{D1} – dūmų masės srautas, deginant 1 m³/s dujų srautą; $v_D = 20$ m/s – rekomenduojamas dūmų srauto greitis; F_{KMAX} – tiekiamų dujų srautas maksimalia galia dirbantiems visiems katilo degikliams; ρ_D – vidutinis dūmų tankis kamine, priėmus jų temperatūrą lygią 170 °C.

Tolimesniuose skaičiavimuose priimu $d_E = 2,0$ m.

Dūmų srauto greitis dirbant bet kokiam degiklių skaičiui apskaičiuojamas iš išraiškos

$$v_D = \frac{4F_{D1} \times F_K}{\pi \times \rho_D \times d_E^2}. \quad (4.6)$$

Pagal (4.6) apskaičiuoti maksimalūs greičiai visiems degiklių deriniams pateikti 4.1 lentelėje

4.1 lentelė

Minimalus dujų srautas F_{KMIN}/F_{KMAX} m ³ /s	MIN/MAX dūmų masės srautas F_{DMIN}/F_{DMAX} kg/s	MIN/MAX dūmų greitis katile iki žaliuzių m/s	MIN/MAX dūmų greitis katilo dūmtraukyje m/s	MIN/MAX dūmų greitis bendrame dūmtraukyje m/s	MIN/MAX dūmų greitis kamine m/s
1	2	3	4	5	6
0,54/1,07	8,86/17,55	6,17/12,22	5,37/10,65	4,57/9,05	3,77/7,47
1,07/1,59	17,55/26,10	12,22/18,16	10,65/15,82	9,05/13,45	7,47/11,10
1,59/2,12	26,10/34,77	18,16/24,21	15,82/21,1	13,45/17,94	11,10/14,80
2,12/2,65	34,77/43,46	24,21/30,27	21,10/26,37	17,94/22,42	14,80/18,50
2,65/3,18	43,46/53,15	30,27/36,32	26,37/31,64	22,42/26,90	18,50/22,20
3,18/3,55	53,15/58,22	36,32/40,55	31,64/35,32	26,9/30,00	22,20/24,80

Lentelėje 4.2 pateikti pagal formules (4.4) apskaičiuoti aerodinaminiai nuostoliai ($\Delta P_{TR} + \Delta P_V$) kiekvienoje traukos sistemos dalyje, kai katilas dirba minimalia, nominalia (vidutine) ir maksimali galia. Skaičiavimuose priimu: trinties koeficientą dūmtraukiams $\lambda = 0,015$, kaminui $\lambda = 0,02$ ir vietinių nuostolių koeficientą $\zeta = 0,2$.

4.2 lentelė

Tiekiamų dujų srautas F_K m^3/s	Nuostoliai katilo dūmtraukyje Pa	Nuostoliai bendrame dūmtraukyje Pa	Nuostoliai kamine Pa	Bendri nuostoliai už žaliuzių Pa
1	2	3	4	5
1,07	13,5	21,0	32,5	67,0
1,59	18,5	44,5	72,0	135,0
2,12	32,5	79,5	128,0	240,0
2,65	52,0	124,0	200,0	376,0
3,18	73,5	179,0	288,0	540,5
3,55	104,5	222,0	353,5	680,0

Slėgio kitimas visoje katilo traukos sistemoje esant $+27\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ aplinkos temperatūroms:

$$P_{T+} = -780 - (-40) = -740\text{Pa};$$

$$P_{T-} = -1160 - (-40) = -1120\text{Pa}.$$

Nesikeičiant kamino traukai santykis tarp slėgio nuostolių traukos sistemoje ir katile turi išlikti pastovus visame katilo apkrovos kitimo diapazone:

$$D = \frac{P_T - \Delta P_{KT}}{\Delta P_{KT}}. \quad (4.7)$$

Pagal (4.7) apskaičiuotas santykis, kai temperatūra $+27\text{ }^{\circ}\text{C}$ lygus 8,25, o kai $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ lygus 13.

Slėgių santykis išliks pastovus, kai jam bus lygus katilo dūmtraukio ir likusios traukos sistemos perdavimo koeficientų santykis bus pastovus:

$$D = \frac{K_{KT}}{K_{KZ}} = \frac{K_{KT}}{K_{TS} + K_Z}. \quad (4.8)$$

čia: K_Z ir K_{TS} – žaliuzių ir traukos sistemos už žaliuzių perdavimo koeficientai.

Traukos sistemos dalyje laminariai tekančių dūmų masės srautą su slėgio nuostoliais sieja priklausomybė:

$$F_{Di} = K_i \times \Delta P_i. \quad (4.9)$$

Čia: F_{Di} ir ΔP_i – dūmų masės srautas ir slėgio kritimas i-toje sistemos dalyje; K_i – i-tosios dalies perdavimo koeficientas.

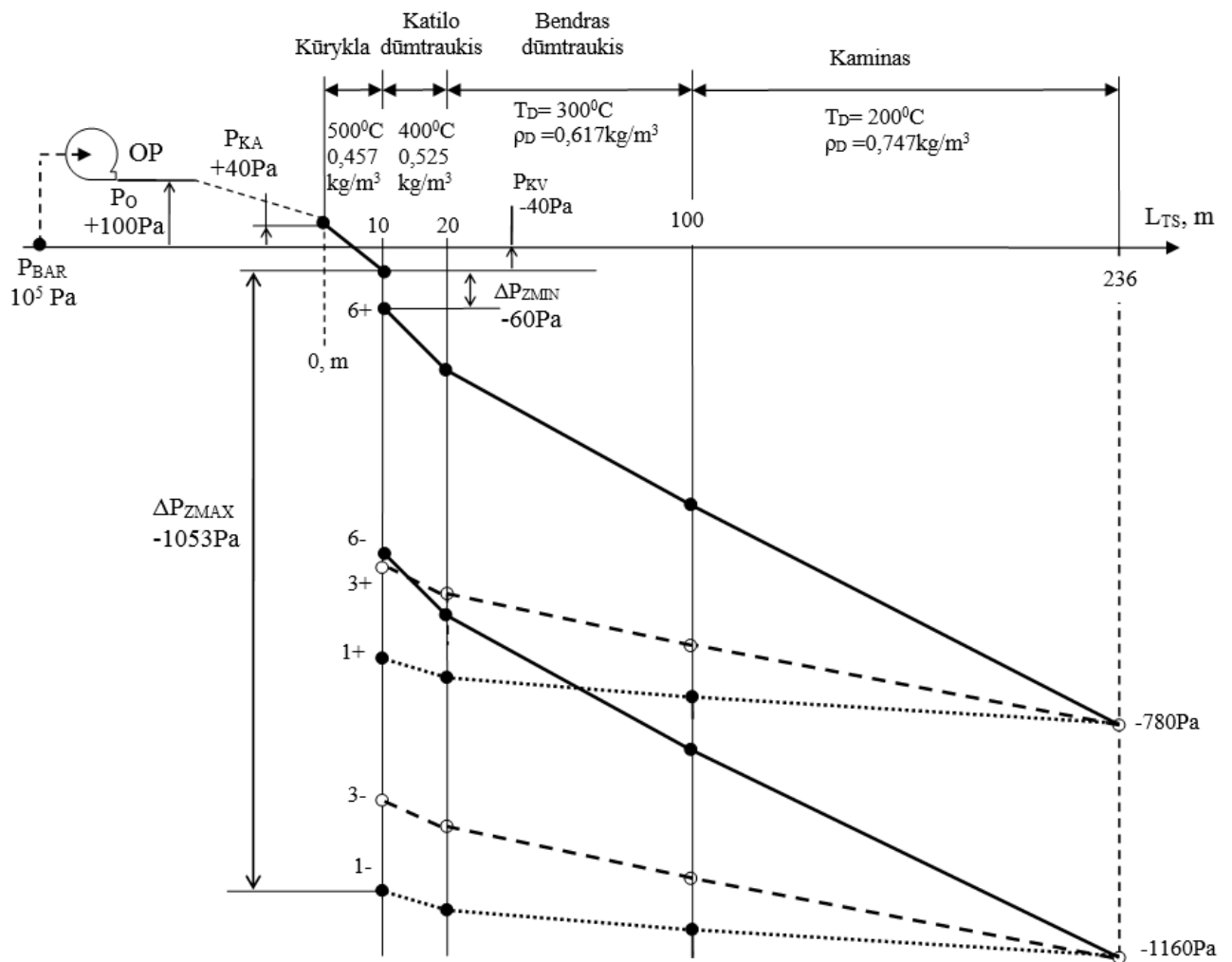
Pagal (4.9) apskaičiuoti traukos sistemos dalių perdavimo koeficientai: kai temperatūra $+27\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$, pateikti 4.3 lentelėje.

4.3 lentelė

Sistem darbo taškas (4.3 pav.)	Dujų srautas m ³ /s	Dūmų srautas F _D kg/s	Bendri nuostol. už žaliuzių Pa	Slėgio kritim as katile Pa	Slėgio nuostoliai žaliuzėse +/- Pa	Sistemos už žaliuzių perdavimo koficient. K _{TS} kg/sPa	Katilo perdavim koficient. K _{KT} kg/sPa	Žaliuzių perdavimo koficientas +/- K _Z kg/sPa	Žaliuzių užsivėrimo kampas φ %
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1+/1-	1,07	17,5	67,0	80	673/1053	0,260	0,22	-0,233/-0,243	77,7/81,0
2+/2-	1,59	26,0	135,0	80	605/985	0,190	0,325	-0,151/-0,165	50,3/55,0
3+/3-	2,12	34,8	240,0	80	500/880	0,145	0,435	-0,092/-0,112	30,7/37,3
4+/4-	2,65	43,5	376,0	80	364/744	0,116	0,544	-0,050/-0,074	16,7/24,7
5+/5-	3,18	52,1	540,5	80	200/580	0,096	0,650	-0,017/-0,046	5,7/15,3
6+/6-	3,55	58,2	680,0	80	60/440	0,086	0,725	0,001/-0,030	0/10,0

Pagal 4.3 lentelės duomenis sudaryti ir 4.3 paveiksle pateikti slėgio kitimo grafikai traukos sistemoje, kai katilas dirba esant +27 °C ir -33 °C temperatūrai, minimalia (darbo taškai +1 ir -1), vidutine (+3 ir -3) ir maksimalia (+6 ir -6) apkrova. Skaičiavimuose įvertinta vidutinė dūmų temperatūra kiekvienoje traukos sistemos dalyje (4.4 pav.).

Iš 4.4 paveikslo matyti, kad dirbant katilui maksimalia apkrova esant +27 °C temperatūrai, slėgio kritimas žaliuzės yra tik 60 Pa, dirbant katilui minimalia apkrova prie -33 °C temperatūrai, slėgio kritimas žaliuzėse siekia 1053 Pa. Nors tokie katilo darbo režimai yra mažai tikėtini, traukos sistema privalo patikimai dirbti ir tokiomis sąlygomis.



4.4 pav. Slėgio kitimas katilo PKVT -100 traukos sistemoje

Pagal techninius duomenis katilo PTVM-100 vidinis tūris yra 396 m^3 , ištekantių dūmų temperatūra 800 K , šią temperatūrą atitinkantis dūmų tankis yra $0,457 \text{ kg/m}^3$. Apskaičiuota dūmų masė $C_{KR} = 0,457 \cdot 396 = 180 \text{ kg}$.

Katilo gaubto ir dūmtraukio dalies iki žaliuzių tūris ir juos užpildžiusių dūmų masė:

$$V_{KD} = \frac{\pi d_D^2 \cdot l_D}{4} = \frac{\pi \cdot 2,8^2 \cdot 6}{4} = 36,9 \text{ m} \text{ ir } C_D = 36,9 \cdot 0,525 = 19,4 \text{ kg}. \quad (4.10)$$

Modeliuojant parinktos dūmų susidarymo proceso perdavimo koeficiento K_{KR} vertės, prieš tai apskaičiavus katilo tūrio užsipildymo dūmais laiką:

$$t_i = \frac{C_{KR}}{F_{Di}}. \quad (4.11)$$

čia: F_{Di} – dūmų srautas dirbant i-tam degiklių skaičiui.

Gauta: staiga įjungus 14-ai degiklių dirbti pilna galia katilas užsipildo dūmais per 3,4 s, jeigu parinktas perdavimo koeficientas $K_{KR} = 200 \text{ kg/sPa}$, dirbant 4-iems degikliams – per 11,5 s, jeigu parinktas $K_{KR} = 50 \text{ kg/sPa}$. Modeliavimui turi būti parinkti kūryklos perdavimo koeficientai visiems dirbančių degiklių deriniams.

Modeliuojant traukos sistemos reakciją į šuolinį reguliatoriaus išėjimo signalą (valdymo poveikį) įvertintas žaliuzių atsivėrimo kampo kitimo greitis. Pagal gautą informaciją žaliuzės pilnai atsiveria ar užsiveria per 45–50 s.

Dūmų slėgio P_D degiklių zonoje kitimui įtaką turi dujų ar oro srautų ar slėgių kitimo greičiai. Pagal turimą informaciją degimui tiekiamo oro slėgio (P_O) kitimo greitis $P_O/dt = 10 \text{ Pa/s}$ maksimalus kamino traukos kitimo greitis 8 Pa/s ir žaliuzių atsivėrimo/užsivėrimo greitis $0,5 \text{ \% / s}$. Sistemos patikslintame modelyje (4.5 pav.): $K_O = P_{DN}/P_{ON} = 40/100 = 0,4$, $T_O = P_{ON}/10 = 100/10 = 10 \text{ s}$.

Kamino ir bendro dūmtraukio laiko pastovioji primama lygia trečdaliui laiko, per kurį dūmais užsipildo ši sistema ir apskaičiuojama pagal išraišką:

$$T_K = \frac{C_K}{3F_{Di}} \quad (4.12)$$

čia: C_K kamino ir bendrame dūmtraukyje susikaupusių dūmų masė

$$C_K = V_K * \rho_D = 568 * 0,747 = 424 \text{ kg} \quad (4.13)$$

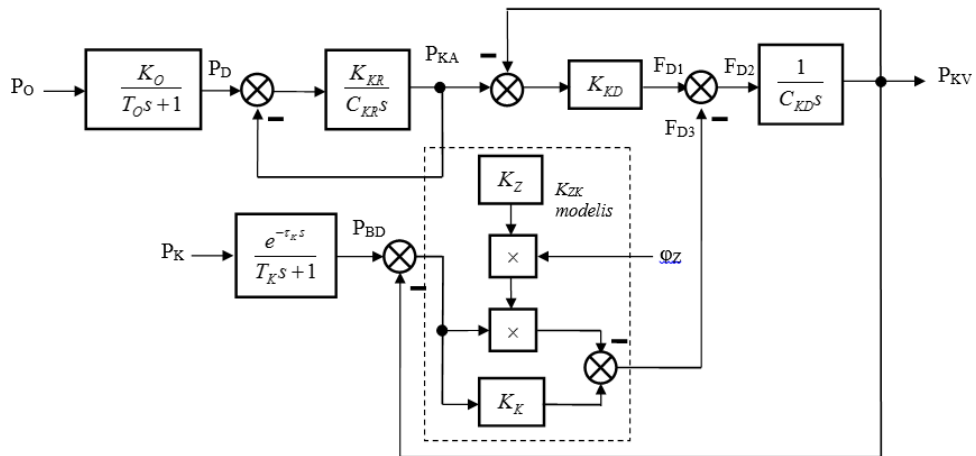
čia: V_K – kamino ir bendro dūmtraukio tūris (m^3); $\rho_D = 0,747 \text{ kg/m}^3$ – ten esančių dūmų tankis.

Pagal išraiškas (4.11) ir (4.12) apskaičiuotos laiko t_K ir laiko pastoviosios T_K vertės pateiktos 4.4 lentelėje.

4.4 lentelė

Dūmų srautas F_D , kg/s	17,7	26,0	34,8	43,5	52,0	58,0
Laikas t_K , s	10,0	7,0	5,0	4,0	3,5	3,0
T_K , s	8,0	5,4	4,0	3,6	2,6	2,4
$\tau_K=0,1 T_K$, s	0,8	0,54	0,4	0,36	0,26	0,24

Įverinus kamino ir bendro dūmtraukio inertiškumą traukos pokyčiui ir baigtinį degimui tiekiamo oro slėgio kitimo laiką sudarytas traukos sistemos galutinis modelis pateiktas 4.5 paveiksle.



4.5 pav. Traukos sistemos modelis

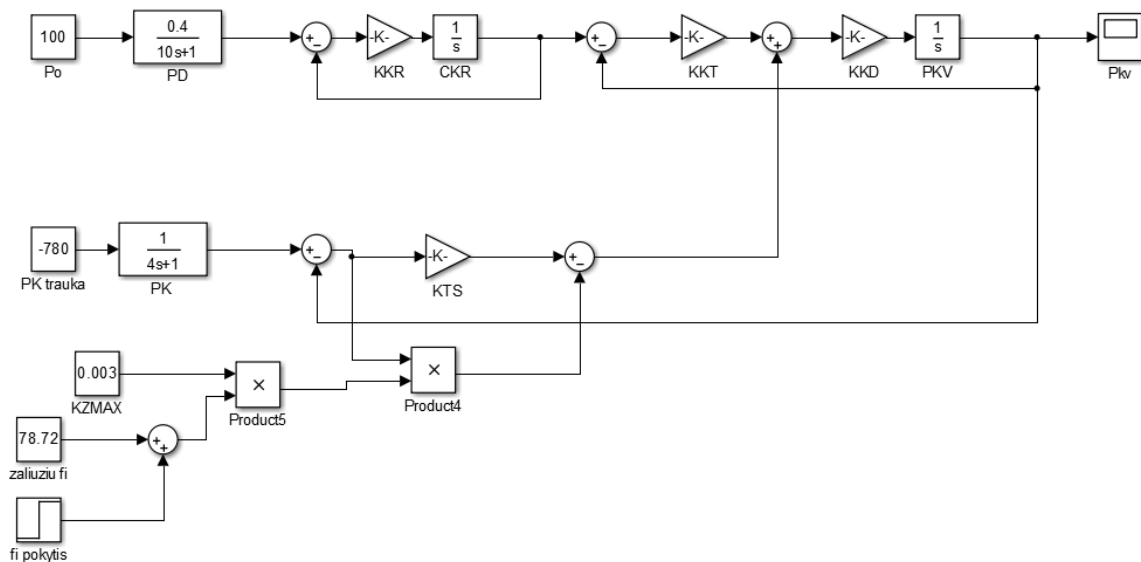
5. Traukos proceso modeliavimas

Katilo PTVM-100 traukos sistemos bendra modelių struktūra pateikta 4.5 paveiksle. Nuo įjungtų degiklių skaičiaus priklausantys modelių parametrai surašyti 4.3 ir 4.4 lentelėse. Modeliuojant priimti vidutiniai kitų modelio dalių (4.5 pav.) parametrai: $K_O = 0,4$; $T_O = 10$ s; $T_K = 4$ s; $\tau_K = 0,0$ s.

MATLAB/Simulink aplinkoje sudarytuose traukos sistemos modeliuose įvertinti: žaliuzių laidumo (atsivėrimo/užsivėrimo) greitis, degimui tiekiamo oro slėgio P_O kitimo įtaka dūmų slėgiui P_D degimo zonoje.

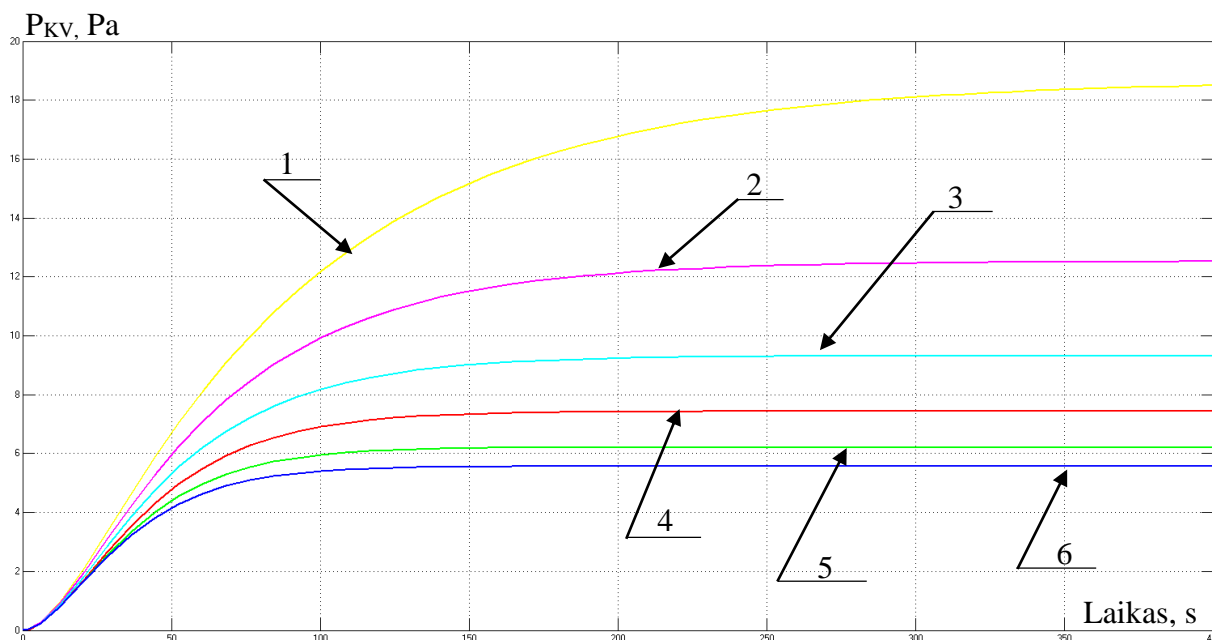
Modeliuojamas traukos sistemos darbas šešiuose skirtinguose sistemos darbo taškuose, kai aplinkos temperatūra $+27$ °C, tai atitinka minimalią kamino trauką (-780 Pa).

Traukos sistemos modelis valdymo poveikiui viename darbo taške MATLAB/Simulink aplinkoje modelis pateiktas 5.1 paveiksle. Traukos sistemos modeliavimui visoms galimoms degiklių kombinacijoms sudaryti šeši 5.1 paveiksle parodyti modeliai su apskaičiuotais parametrais.



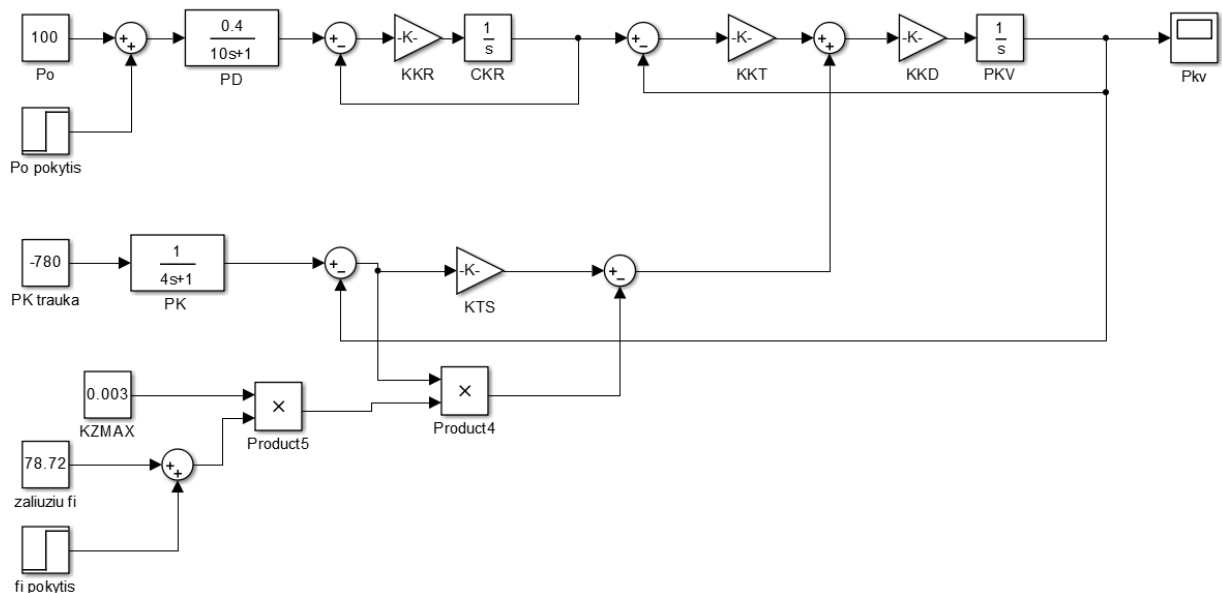
5.1 pav. Traukos sistemos modelis valdymo poveikiui

Modeliuojant gautos reguliavimo parametro – slėgio P_{KV} kitimo kreivės, šuoliškai 2 % padidinus regulatoriaus išėjimo (žaliuzių variklio valdymo) signalą, šešiuose skirtinguose sistemos darbo taškuose (5.2 pav.). Šiame paveiksle parodytos slėgio P_{KV} kitimo kreivės: 1 – kai dujų srautas $1,07 \text{ m}^3/\text{s}$ (minimali katilo galia), 2 – dujų srautas $1,57 \text{ m}^3/\text{s}$, 3 – dujų srautas $2,12 \text{ m}^3/\text{s}$, 4 – dujų srautas $2,65 \text{ m}^3/\text{s}$, 5 – dujų srautas $3,18 \text{ m}^3/\text{s}$, 6 – dujų srautas $3,55 \text{ m}^3/\text{s}$ (maksimali katilo galia). Modeliavimo metu sistemą veikiantys trikdžiai išlieka pastovūs ir nominalių verčių ($P_D = 40 \text{ Pa}$, $P_K = -780 \text{ Pa}$).



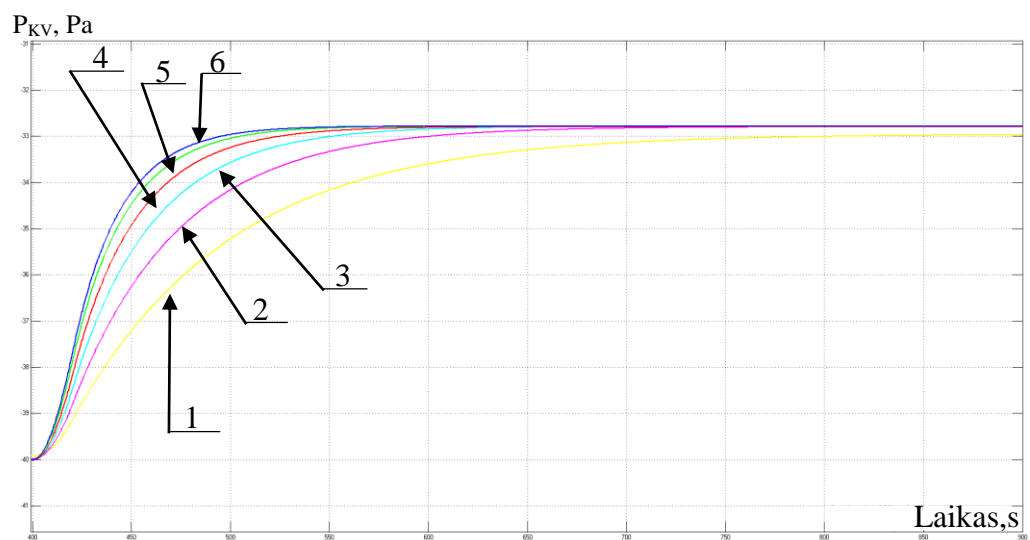
5.2 pav. Reakcijos į 2% šuolinį valdymo signalo pokytį

Traukos sistemos modelis viename darbo taške MATLAB/Simulink aplinkoje, sistemos reakcijai į degimui tiekiamo oro slėgio P_0 pokytį, pateiktas 5.3 paveiksle.



5.3 pav. Traukos sistemos modelis oro slėgio pokyčiui

Paveiksle 5.4 pateiktos reakcijos kreivės gautos šuoliškai 10 % (10 Pa) pakeitus degimui tiekiamo oro slėgį (P_o), dirbant skirtingam degiklių skaičiui, esant minimaliai kamino traukai ir atvertoms žaliuzėms.



5.4 pav. Reakcijos į šulininį oro slėgio pokytį

Traukos sistemos modelis vienam darbo taškui, kuomet sistemą paveikia kamino traukos pokytis (P_K), pateiktas 5.5 paveiksle.

$$W_{obj}(s) = \frac{K_{obj}}{T_{obj}s + 1} e^{-\tau_{obj}s}. \quad (6.1)$$

Suderintų traukos valdymo sistemų tyrimui, traukos sistema valdymo poveikiui ar bet kuriam trikdžiui, turi būti aprašyta perdavimo funkcija:

$$W_{obj}(s) = \frac{K_{obji}}{(T_{obji}s + 1)^n} e^{-\tau_{obji}s}. \quad (6.2)$$

čia: K_{obji} ; T_{obji} ir τ_{obji} yra n eilės perdavimo funkcijos parametrai.

Perdavimo funkcijų (6.1) ir (6.2) parametrai identifikuojami skaitmeniniu būdu pasinaudojus MATLAB pakete parašytomis programomis. Progamos kodas vientalpio objekto parametrų radimui pateiktas priede Nr1, dvitalpio objekto indentifikavimui programos kodas pateiktas priede Nr2.

6.1 Reakcijos kreivių pakitus nuostatui aproksimavimas pirmos eilės perdavimo funkcijomis

Reguliatorių parametrams apskaičiuoti aproksimuojamos 5.2 paveiksle pateiktos reakcijos kreivės, tam naudojama MATLAB pakete esanti tiesinio modelio parametrų apskaičiavimo programa. Gauti pirmos eilės perdavimo funkcijų parametrai, esant skirtingiems dujų srautams, pateikti 6.1 lentelėje.

6.1 lentelė. Pirmos eilės perdavimo funkcijų parametrai.

Sistemos darbo taškas	Dujų srautas, $F_K, m^3/s$	$K_{obj}, Pa/\%$	T_{obj}, s	τ_{obj}, s
1	1,07	9,3	76,42	25,1
2	1,57	6,3	58,05	22,0
3	2,12	4,7	43,65	20,0
4	2,65	3,73	33,0	18,0
5	3,18	3,13	29,5	17,5
6	3,55	2,8	28,87	16,0

6.2 Traukos sistemos antros eilės perdavimo funkcijų parametrai

Suderintų ARS dinaminių savybių analizei pakanka turėti antros eilės perdavimo funkcijas visų trijų sistemą veikiančių išorinių kintamųjų (u , P_O ir P_K) atžvilgiu:

$$W_{obj}(s) = \frac{K_i}{(T_{1i}s + 1)(T_{2i}s + 1)} e^{-\tau_{0i}s}. \quad (6.3)$$

Visoms įjungtų degiklių kombinacijoms perdavimo funkcijos parametrai gaunami aproksimuojant 5.2, 5.3 ir 5.4 paveiksluose parodytas reakcijos kreives. Tam naudojama MATLAB pakete parašyta modelio parametrų apskaičiavimo programa.

Aproksimuojant 5.2 paveiksle esančias reakcijos kreives gauti (6.3) pavidalo perdavimo funkcijų pagal valdymo signalą parametrai skirtingiems dujų srautams, pateikti 6.2 lentelėje.

6.2 lentelė.

Dujų srautas, m ³ /s	K ₁ , Pa/%	T ₁₁ , s	T ₂₁ , s	τ ₀₁ , s
1,07	9,3	80,47	13,62	5,87
1,57	6,3	53,03	14,55	6,92
2,12	4,7	37,88	15,95	6,97
2,65	3,73	27,25	18,6	6,34
3,18	3,13	20,17	20,17	6,77
3,55	2,8	18,69	22,2	7,15

Aproksimuojant 5.4 ir 5.6 paveiksluose esančias reakcijos kreives gauti (6.3) pavidalo perdavimo funkcijų pagal degimui tiekiamo oro slėgį (P_O) ir pagal kamino trauką (P_K) parametrai skirtingiems dujų srautams, pateikiami 6.3 ir 6.4 lentelėse.

6.3 lentelė.

Dujų srautas, m ³ /s	K ₂ , Pa/Pa	T ₁₂ , s	T ₂₂ , s	τ ₀₂ , s
1,07	0,9	78,9	1,0	4,7
1,57	0,9	53,7	2,16	1,13
2,12	0,9	40,14	3,2	1,1
2,65	0,9	32,0	4,2	1,1
3,18	0,9	26,4	4,8	1,0
3,55	0,9	23,45	5,66	1,0

6.4 lentelė.

Dujų srautas, m ³ /s	K ₃ , Pa/Pa	T ₁₃ , s	T ₂₃ , s	τ ₀₃ , s
1,07	0,1	79,5	5,1	0,1
1,57	0,1	52,65	8,7	0,1
2,12	0,1	38,41	9,1	0,1
2,65	0,1	30,4	9,5	0,1
3,18	0,1	26,7	10,4	0,1
3,55	0,1	22,6	11,95	0,1

7. Modelio su kintamais parametrais sudarymas

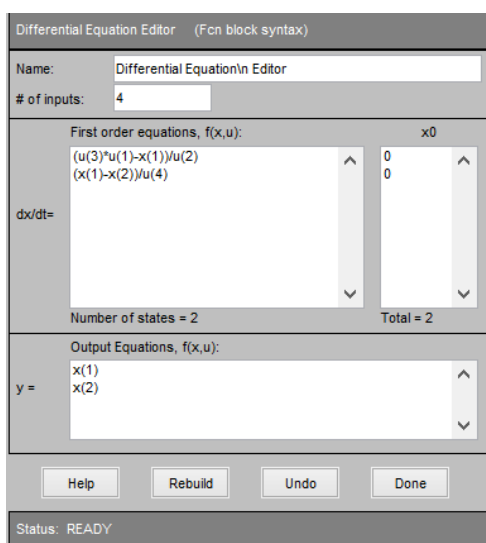
Keičiantis į katilą tiekiamų dujų srautui keičiasi ir traukos sistemos dinaminės savybės. Suprojektuotų automatinio reguliavimo sistemų dinamikos modeliavimui sudaromas traukos sistemos modelis su parametrais besikeičiančiais priklausomai nuo dujų srauto vertės.

Sudarant modelį naudojamos diferencialinės lygtis aprašančios antros eilės objekto reakciją. Antros eilės perdavimo funkcija laikoma kaip nuosekliai sujungtos dvi pirmos eilės aperiodinės grandys. Pirmos eilės aperiodinė grandis aprašoma tokia diferencialine lygtimi:

$$T \frac{dy}{dt} + y = kx \quad (7.1)$$

čia T – grandies laiko pastovioji, k – grandies perdavimo koeficientas.

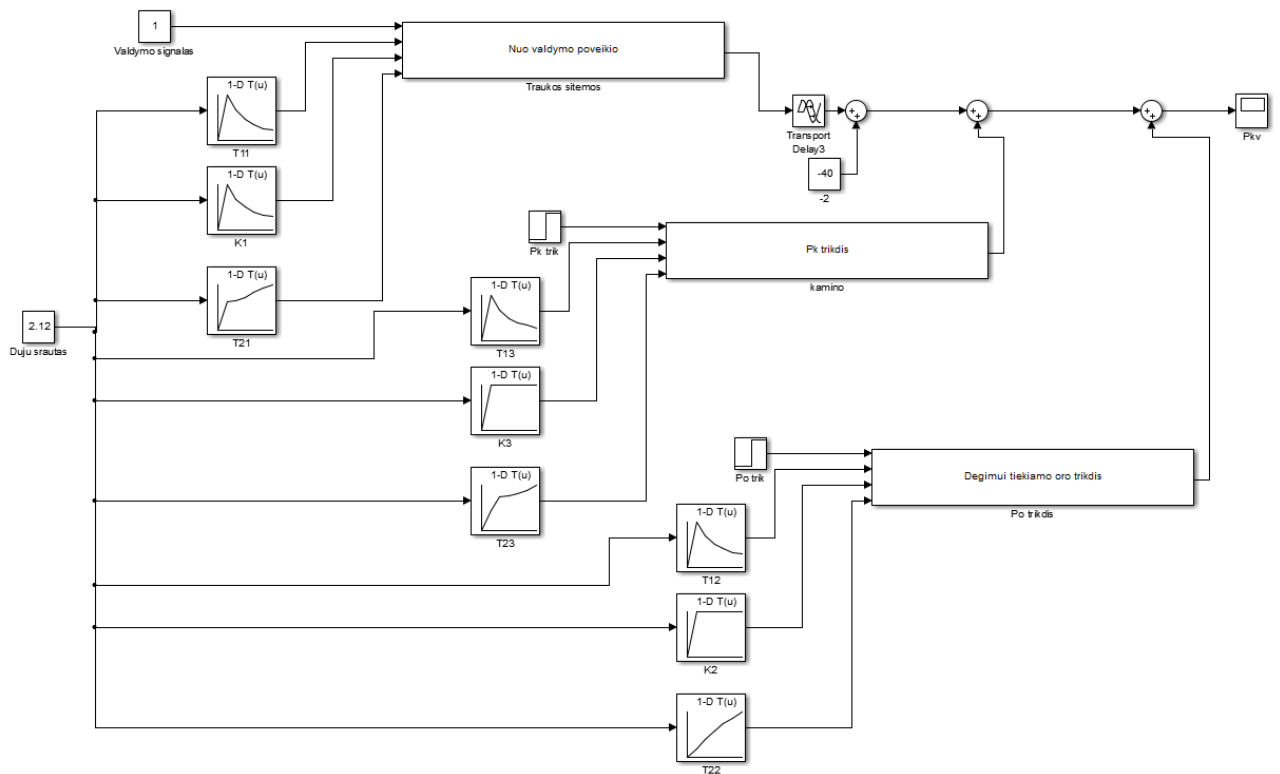
Modeliui sudaryti panaudoatas DDE („Differential Equation Editor,“) blokas, kuriame surašytos (7.2) ir (7.3) lygtys. Lygčių pavidalas DEE bloke parodytas 7.1 paveiksle. Lygčių kintamieji $u(1)$ – valdymo signalas; $u(2)$ – T_2 laiko pastovioji; $u(3)$ – stiprinimo koeficientas k ; $u(4)$ – T_1 laiko pastovioji; $x(1)$ – pirmosios lygties sprendinys; $x(2)$ – antrosios lygties sprendinys;



7.1 pav. Diferencialinėmis lygtimis aprašyta antros eilės perdavimo funkcija DEE bloke

Modelyje panaudoti MATLAB/Simulink pakete esantis „Lookup table“ blokas, kuris priklausomai nuo tiekiamo dujų srauto, keičia lygtyse esančių parametų vertes. Modelyje panaudoti 6.2 lentelėje surašyti traukos sistemos parametrai. Naudojant 6.3 ir 6.4 lentelėse esančiomis parametų vertėmis gauti traukos sistemos skaitmeniniai modeliai nuo pagrindinių trikdžių – degimui tiekiamo oro ir kamino traukos pokyčių.

Pilnas, patikslintas traukos sistemos modelis MATLAB/Simulink aplinkoje parodytas 7.2 paveiksle.



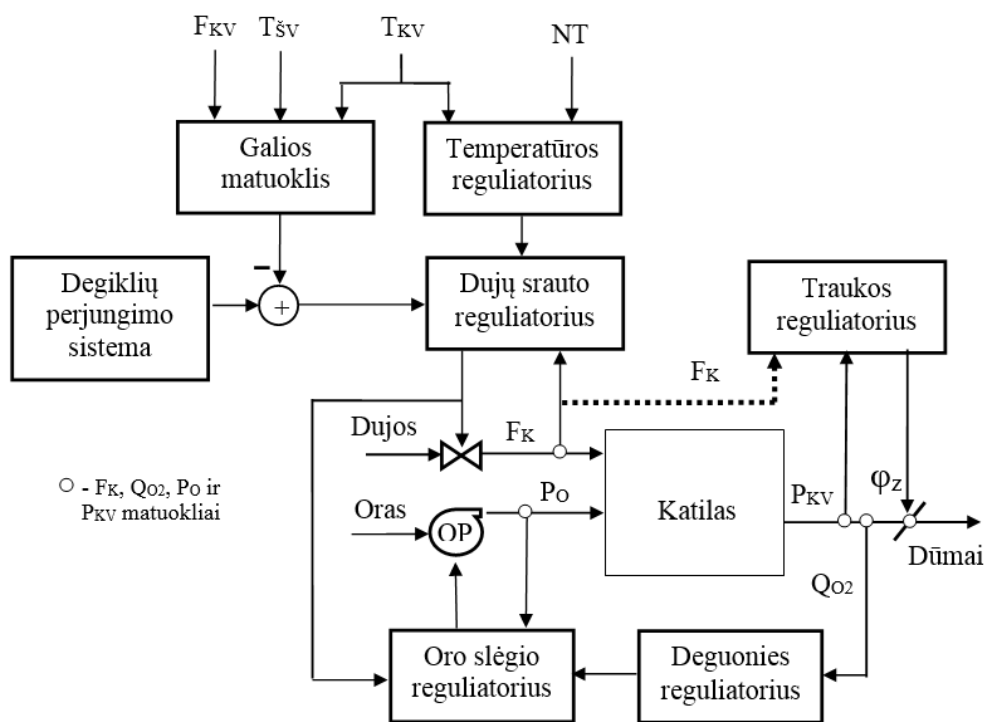
7.2 pav. Traukos sistemos modelis su kintamais parametrais

8. Katilo galios valdymo sistemos schema

Termofikacinio vandens katilo galia valdoma susietai keičiant degimo proceso parametrus: degimui reikalingus dujų ir oro srautus bei kūrykloje susidariusių dūmų trauką.

Modernizuota katilo PTVM-100 degimo ir dūmų traukos valdymo sistemos schema pateikta 8.1 paveiksle.

Pakopinio valdymo sistemoje esantys temperatūros ir dujų srauto reguliatoriai valdo degikliams tiekiamų dujų srautą pagal nustatytosios ir vartotojui tiekiamo termofikacinio vandens temperatūrų skirtumą: $\Delta T_{KV} = T_N - T_{KV}$. Pakopinio valdymo sistemos deguonies ir oro slėgio reguliatoriai, keisdami degimo procesui tiekiamo oro srautą, stabilizuoja deguonies koncentraciją dūmuose ir tuo pačiu minimizuoja iš kūryklos išmetamų teršalų (NO_x , CO ir kt.) kiekius. Tai pasiekama palaikant optimalų degimui tiekiamų dujų ir oro srautų santykį ($0,1 \pm 0,02$). Šiam santykiui palaikyti dujų srauto reguliatoriaus išėjimo signalas U_K arba dujų srautas F_K tampa nuostatu oro slėgio reguliatoriui. Sudėtingesnės struktūros santykio palaikymo schemose ryšiai tarp dujų srauto ir oro slėgio (ar srauto) reguliatorių būna dvikrypčiai: didėjant katilo apkrovai ir tuo pačiu temperatūrų skirtumui ΔT_{KV} , augantį oro srautą seka didėjantis dujų srautas, mažėjant apkrovai – dujų srauto mažėjimą seka oro srauto mažėjimas.



8.1 pav. Degimo ir dūmų traukos valdymo sistemos blokinė schema

Katilo galios perjungimo schema įjungia ar išjungia degiklių grupes keičiantis katilo apkrovai, kurią matuoja katilo galios matuoklis, pagal karšto ir grįžtančio vandens temperatūrų T_{KV} ir $T_{šv}$ skirtumą, ir vartotojui tiekiamo vandens srautą F_{KV} . Katilo galia gali būti keičiama dviem būdais pakopiniu ir nuosekliaju.

Valdant pakopiniu būdu nauja degiklių grupė (paprastai du degikliai) įjungiamas ar išjungiamas prieš tai nepakeičiant dirbusių degiklių darbo režimo – galios.

Valdant degimo procesą nuosekliaju (švelniauju) būdu, eilinės degiklių grupės įjungimo ar išjungimo metu švelniai keičiama visų dirbančių degiklių galia. Valdant šiuo būdu išvengiama degaus mišinio kūrykloje ir katilo galios staigių pokyčių. Dėl degiklių švelnaus perjungimo sudėtingumo perjungimo eigoje aktyviai dalyvauja ar net jį vykdo katilo operatorius. Lygiagrečiai dirbant keliems katilams degiklių perjungimą vykdo bendras galios reguliatorius. Nuo degiklių perjungimo būdo priklauso dūmų srauto ir slėgio visoje traukos sistemoje kitimo pobūdis: švelnus ar šuolinis.

Dūmų traukos reguliatorius stabilizuoja praretinimą P_{KV} katilo dūmtraukio pradžioje, taip garantuojamas patikimas kūrykloje susidariusių dūmų ištraukimas į aplinką. Katilo traukos valdymo sistema turi stabilizuoti praretinimą P_{KV} degiklių perjungimo metu, keičiantis įjungtų degiklių galiai, keičiantis susidariusių dūmų srautui arba keičiantis kamino traukai.

Kai traukos sistemos dinaminiai parametrai keičiasi nežymiai, praretinimui P_{KV} stabilizuoti pakaktų standartinio PID reguliatoriaus. Keičiantis traukos sistemos dinaminėms savybėms platesnėse ribose, praretinimo P_{KV} stabilizavimą turėtų vykdyti adaptyvus PID

regulatorius. Iš pirmoje darbo dalyje atliktos katilo PTVM-100 dinaminų savybių analizės matyti, kad katilo traukos sistema yra pakankamai plačiose ribose kintančius parametrus turintis reguliavimo objektas. Šio objekto dinaminiai parametrai vienareikšmiškai priklauso nuo degikliams tiekiamų dujų srauto. Todėl adaptyvaus regulatoriaus parametrus gali keisti dujų srautui (F_K) proporcingas signalas (8.1 pav.). Kitų struktūrų valdymo schemose į adaptyvų traukos regulatorių gali būti paduodamas katilo išvystomai galiai arba dujų slėgiui prieš degiklius proporcingas signalas ar kitas vienareikšmiškai su dūmų srautu susijęs kintamasis.

Pagal gamintojo reglamentą katilo PTVM-100 galia valdoma pakopiniu būdu – keičiant įjungtų degiklių skaičių (4, 6, 8, 10, 12 ar 14). Katilo įjungimo metu nuosekliai įkuriami 4, po to 6 ir t. t. degiklių.

Pakopinio galios keitimo būdo trūkumai: įjungus darbui eilinę degiklių grupę krenta slėgis katilo ir net katilinės dujų tiekimo magistralėje, susidaro degiklių liepsnos pliūpsniai, o uždelsus oro tiekimą gali įvykti laiku nesudegusių dujų ir oro mišinio sproginimas, staiga pasikeičia susidariusių degimo produktų masė ir, kas labai svarbu, išaugusi katilo generuojama šiluminė galia viršija vartotojui reikalingą vertę.

Dėl šių trūkumų katilai su daugeliu degiklių pritaikomi dirbti švelniu – nuosekliu galios keitimo režimu. Pagrindinis reikalavimas tokiu režimu dirbančiai sistemai – perjungiant (įjungiant arba išjungiant) dirbančių degiklių grupes katilo galia turi nesikeisti, taigi ir bendri katilui tiekiamų dujų ir oro srautai bei susidariusių dūmų srautai šuoliškai nesikeičia. Įjungdama dirbti sekančią dviejų degiklių grupę valdymo sistema turi tuo pat metu švelniai mažinti iki tol dirbusių degiklių sklendžių laidumus ir proporcingai atvėrinėti įjungiamų degiklių sklendes. Išjungdama „eilinę“ dviejų degiklių grupę valdymo sistema turi tuo pat metu švelniai didinti dirbti liekančių degiklių sklendžių laidumus ir užvėrinėti išjungiamų degiklių sklendes. Pasibaigus degiklių perjungimo procesui visų dirbančių sklendžių pasisukimo kampai turi tapti vienodi ir tokio dydžio, kad nepasikeistų katilo galia. Degiklių perjungimo metu prie katilo galios regulatoriaus išėjimo prijungiamos darbui paruoštų degiklių sklendės. Toliau keičiantis katilo apkrovai valdymo sistema švelniai ir vienodai keičia visų dirbančių sklendžių padėtis. Toliau keičiantis apkrovai vykdomas sekantis degiklių poros perjungimas.

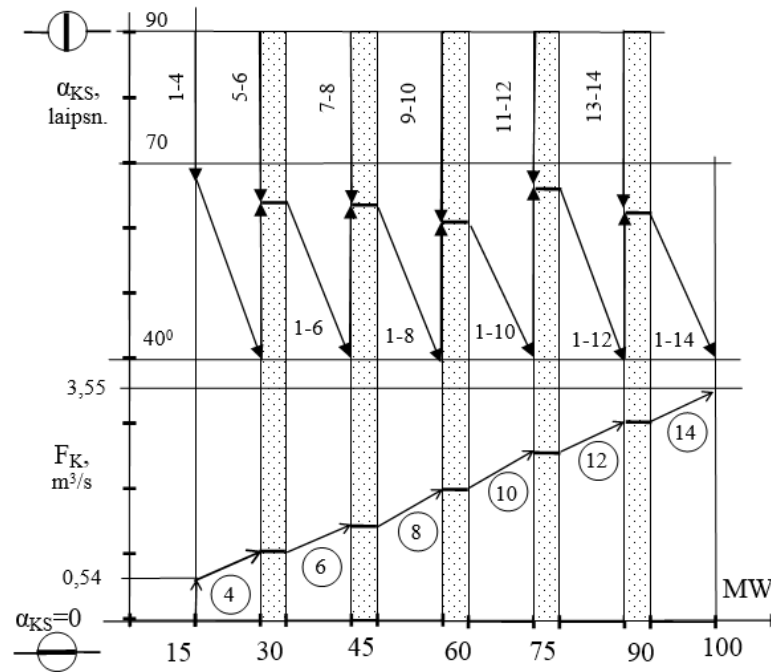
Pagal aprašytą reglamentą dirbančios valdymo sistemos funkcijos: vykdyti degiklių skaičiaus perjungimą ir reguliuoti katilo galią dirbant pastoviam degiklių skaičiui.

Šiuo metu dirbančiame katile degiklių skaičiaus perjungimą vykdo operatorius, nuo kurio kvalifikacijos priklauso perjungimo kokybė: katilo galios, dujų, oro ir susidariusių dūmų srautų svyravimai. Švelnus degiklių perjungimas užtrunka 6–10 min. Diegiamoje valdymo sistemoje degiklių perjungimo funkciją vykdo diskretaus – laikinio valdymo sistema.

Degiklių švelnaus perjungimo metu katilui tiekiamų susidariusių dūmų srautas ir slėgis katilo viršuje (P_{KV}) turi nesikeisti. Realioje traukos valdymo sistemoje įvesti apribojimai, kurie riboja prijungto reguliatoriaus formuojamo valdymo signalo kitimą. Dūmų srauto reguliatoriaus derinimo parametrai turi būti pakeisti dujų srautui (F_K) pasiekus nustatytas vertes arba degiklių perjungimo schemai suformavus atitinkamus signalus. Projektuojamoje traukos adaptyvioje valdymo sistemoje reguliatoriaus derinimo parametrai pasikeičia tiekiamų dujų srautui pasiekus nustatytas vertes. Patvirtinimo signalą perjungimui formuoja degiklių perjungimo sistema.

Degiklių įjungimo ir jų galios švelnų keitimo procesą paaiškina 8.2 paveiksle pateiktos katilui tiekiamų dujų (F_K) ir kuro sklendžių atvėrimo kampų (α_{KS}) kitimo grafines priklausomybės didėjant katilo apkrovai. Katilo paleidimo metu atveriamos 1–4 degiklių kuro sklendės, kol bendra katilo šiluminė galia pasiekia 15 MW. Toliau degiklių valdymo sistema persijungia į katilo galios reguliavimo režimą. Didėjant apkrovai reguliavimo sistema švelniai didina dirbančių degiklių galią, kol maksimaliai atsiveria kūrą reguliuojančias sklendes. Apkrovai viršijus 30 MW, valdymo sistema įjungia ir švelniai atveria 5 ir 6 degiklių ir tuo pačiu laiku priveria 1–4 degiklių sklendes. Sklendžių atvėrimo ir privėrimo greičiai parinkti tokie, kad nesikeistų bendra degiklių sukuriama galia ir išliktų lygi 30 MW. Pasibaigus perjungimo procesui visų degiklių (1–6) sklendės užima tas pačias padėtis. Vėl įjungta degiklių galios reguliavimo sistema sinchroniškai keičia visų dirbančių sklendžių padėtis, kol katilo galia pasiekia reikalingą dydį. Jeigu nepakanka 1–6 degiklių maksimalios galios, valdymo sistema prijungia 7 ir 8 degiklius ir t.t. Katilo galios mažinimo procesas vyksta atvirkščia aprašytai tvarka.

Katilo kūrykloje susidariusių dūmų srauto kitimo pobūdis yra artimas kuro kitimo grafikui. Degiklių perjungimo pradžioje sistema pakeičia traukos reguliatoriaus parametrus, kad per perjungimo laikotarpį nusistovėtų pastovus žaliuzių valdymo signalas. Kadangi perjungimo metu dūmų srautas išlieka pastovus, tikėtina, kad ir „naujo“ reguliatoriaus išėjimo signalas bus lygus prieš jį buvusio reguliatoriaus išėjimo signalui. Remiantis tuo darau išvadą, kad traukos reguliatoriaus derinimo parametrų pokytis nesukels slėgio katilo viršuje (P_{KV}) taigi ir dūmų srauto svyravimų.



8.2 pav. Katilo degiklių galios didinimo proceso iliustracija

9. Reikalavimai traukos valdymo sistemai

Katilo PTVM-100 traukos sistema turi ištraukti visą kūrykloje susidariusių dūmų masės srautą, kuris, priklausomai nuo įjungtų degiklių skaičiaus ir galios, keičiasi nuo 4 iki 58 kg/s. Esant nepakankamai traukai mažėja katilo galia, uždūminamos katilinės patalpos, susikaupusios nesudegusios dujos gali sukelti sprogimą ir t. t. Per didelė trauka mažina kūryklos galią, o atitrūkus fakelui nuo degiklio kyla grėsmė saugiam katilo darbui. Katilo traukos sistemą veikiantys išoriniai trikdžiai: kintantis, degimo metu susidariusių, dūmų srautas, temperatūra kūrykloje, kintanti kamino trauka. Sistemą veikiantys vidiniai trikdžiai būtų į tą patį katilinės kaminą dūmus išmetantys kiti termofikacinio vandens bei garo katilai. Dėl to keičiasi bendros traukos sistemos laidumas. Keičiantis degikliams tiekiamo degaus mišinio srautui, keičiasi susidariusių dūmų kiekis ir temperatūra kūrykloje. Dėl to keičiasi dūmų slėgis P_D liepsnos zonoje. Kamino sukurta trauka, priklauso nuo dūmų kamine ir aplinkos temperatūros bei aplinkos slėgio pokyčio. Kamino trauka gali šuoliškai pasikeisti iki 20–30 % vien tik nuo vėjo gūσιο. Kamino sukurtą trauką modeliuoja minusinis slėgis (praretinimas) P_K (4.4 pav.). Slėgiai P_D ir P_K , o taip pat dūmų srautas traukos sistemoje nematuojami. Vidinių trikdžių matavimas taip pat praktiškai neįmanomas.

Veikiant visiems šiems trikdžiams traukos valdymo sistema turi valdyti trauką taip, kad iš kūryklos būtų ištraukti tuo momentu susidarę degimo produktai. Optimaliai valdant trauką galima padidinti katilo naudingumą 2–4 %, o tai pat užtikrinti nepertraukiamą katilo darbą.

Dūmų trauka išmatuojama netiesioginiu būdu matuojant dūmų slėgio sumažėjimą (praretinimą) katilo dūmtraukio pradžioje – prieš trauką reguliuojančias žaliuzes. KTE esančiuose termofikaciniuose katiluose trauka gali būti mažinama tik droseliuojant dūmų srautą keičiant žaliuzių laidumą. Aukštas KTE kaminas užtikrina pakankamą trauką kiekvienam dirbančiam katilui nepriklausomai nuo išorės parametrų ir dirbančių katilų galios.

Pagal technines sąlygas katilo PKVT-100 traukos valdymo sistema turi tenkinti tokius reikalavimus:

- dirbant pastoviam degiklių skaičiui reguliuojamo parametro – slėgio katilo viršuje statinis nuokrypis turi būti lygus nuliui, t.y. $P_{KV} = -40$ Pa;
- degiklių perjungimo metu reguliuojamo parametro dinaminis nuokrypis neturi viršyti ± 25 % (10 Pa);
- bet kurio maksimalaus trikdžio sukeltas reguliavimo parametro santykinis dinaminis nuokrypis neturi viršyti ± 20 % (8 Pa);
- maksimalaus trikdžio sukeltas reguliavimo parametro pereinamasis procesas turi baigtis – grįžti į ± 5 % zoną per mažiau nei 90 s ir anksčiau nei įsijungia katilo apsaugos sistema;
- trauka gali būti valdoma tik žaliuzėmis valdant dūmų srautą.

10. Standartinio PI regulatoriaus derinimo parametrų skaičiavimas

Traukos sistemoje paveikus išoriniam arba vidiniam trikdžiui svarbu, kad valdymo sistema užtikrintų mažesnę už leistiną parametro (P_{KV}) nuokrypį ir turėtų maksimalią greitaveiką. Tai pasiekama parenkant regulatoriaus struktūrą (P, PI ar PID) ir derinimo parametrus. Traukos valdymui pasirinkta PI regulatoriaus struktūra, nes P regulatorius neužtikrina nulinės statinės reguliavimo parametro paklaidos, o PID regulatorius jautriai reaguoja į liepsnos fakelų pulsacijų sukeltus reguliuojamo parametro (slėgio P_{KV}) virpesius.

Pasirinktas PI regulatorius derinimas naudojant minimalios integruotos absoliučiosios paklaidos su laiko svoriniu koeficientu (ITAE) kriterijų, kuris užtikrina reguliavimo parametro minimalų dinaminį nuokrypį ir maksimalią greitaveiką. Kadangi praktiškai visą laiką ARS dirba parametro stabilizavimo režime pasirenkamos regulatoriaus derinimo formulės efektyviai kompensuojančios traukos sistemą trikdančius poveikius.

Regulatoriaus stiprinimo koeficientą K_r skaičiuoju pagal formulę [3, 63 psl]:

$$K_r = \frac{0,859}{K_{pr}} \left(\frac{T_{pr}}{\tau_{pr}} \right)^{0,977}, \quad (10.1)$$

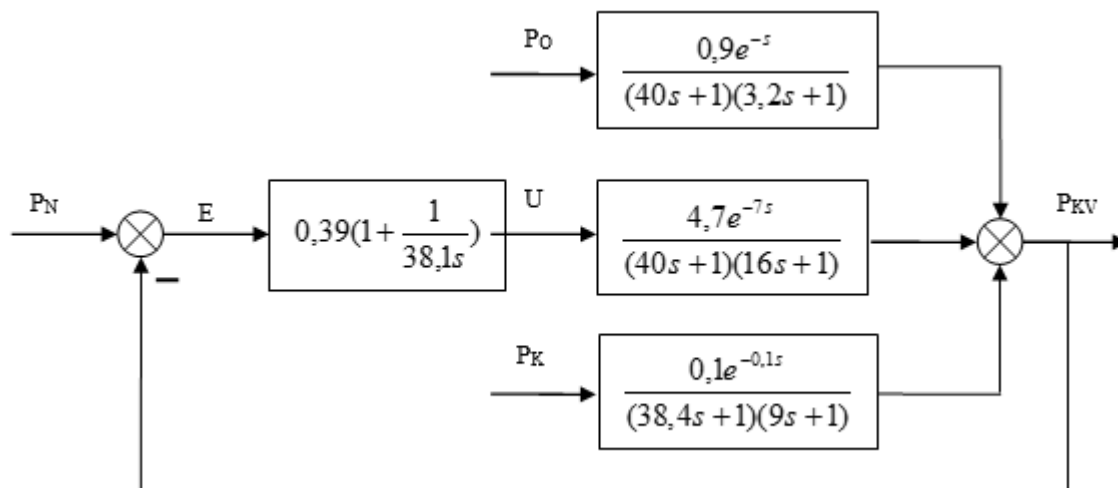
Regulatoriaus integralinę dedamąją T_i skaičiuojama pagal formulę [3, 63 psl] :

$$T_i = \frac{T_{pr}}{0,674} \left(\frac{\tau_{pr}}{T_{pr}} \right)^{0,680}, \quad (10.2)$$

Čia K_{pr} T_{pr} ir τ_{pr} – traukos sistemos parametrai iš 6.1 lentelės.

Pagal formules (10.1 ir 10.2) apskaičiuoti regulatoriaus derinimo parametrai, katilui dirbant nominalia galia – tiekiamų dujų srautui $2,12 \text{ m}^3/\text{s}$; $K_r = 0,39 \text{ \%}/\text{Pa}$ ir $T_i = 38,1 \text{ s}$.

Dinaminių savybių analizei sudaryta traukos ARS struktūrinės schemos su 6.2–6.4 lentelėse esančiais reguliavimo objekto parametrais. Traukos ARS struktūrinė schema su apskaičiuotais parametrais katilui dirbant nominalia galia pateikta 10.1 paveiksle.



10.1 pav. Traukos ARS struktūrinė schema nominaliam katilo darbo režimui

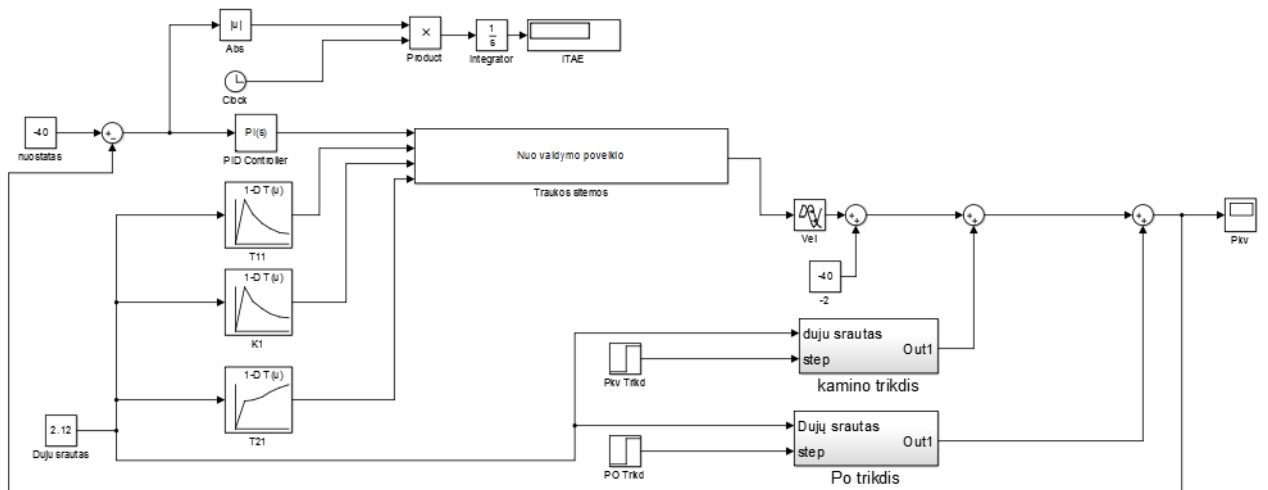
11. Sistemos su standartiniu PI regulatoriumi tyrimas

Tyrimo tikslas patikrinti ARS kokybę, kai pastovius parametrus turintis PI regulatorius valdo kintančius parametrus turinčią traukos sistemą. Objektyviam ARS kokybės įvertinimui pakanka nominaliniam režimui (darbo taškui Nr3) suderintu regulatoriumi valdyti traukos sistemą su ribinėmis parametru vertėmis (taškai Nr1 ir Nr6). Stabilizavimo režimu dirbančios ARS kokybė įvertinamos pagal pagrindinių trikdžių – oro slėgio P_O ir kamino traukos P_K sukeltų praretinimo P_{KV} reakcijos kreivių parametrus.

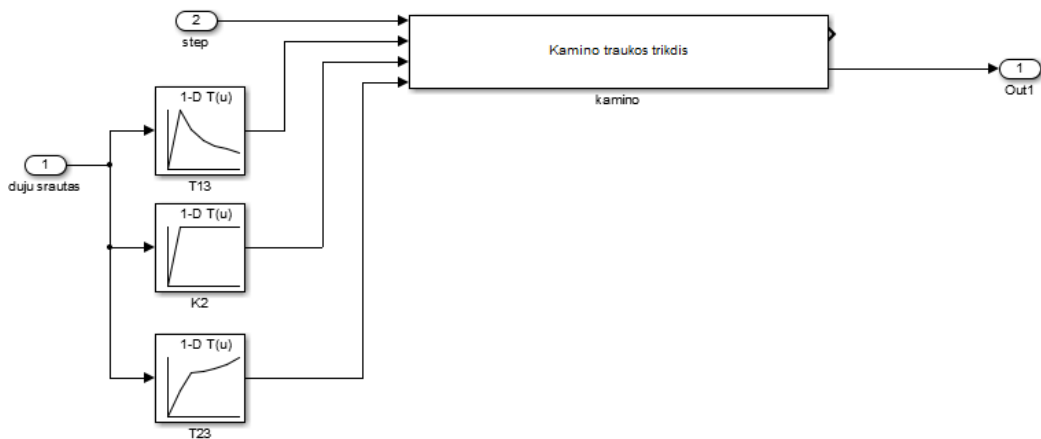
Analizės metu dujų srautai: 1 – $1,07 \text{ m}^3/\text{s}$ (minimali galia); 2 – $2,12 \text{ m}^3/\text{s}$ (nominali galia); 3 – $3,55 \text{ m}^3/\text{s}$ (maksimali galia).

Pagal 10.1 paveiksle pateiktą struktūrinę schemą sudarytas traukos ARS modelis MATLAB/Simulink aplinkoje parodytas 11.1 paveiksle. Modelyje naudotų kamino traukos ir tiekiamo oro slėgio trikdžius imituojančios posistemių struktūros parodytos 11.2 ir 11.3 paveiksluose. Trikdžiams imituoti keičiantis dujų srautams panaudoti DEE („Differential Equation Editor,“) blokai sudaryti pagal 7 skyriuje pateiktą medžiagą.

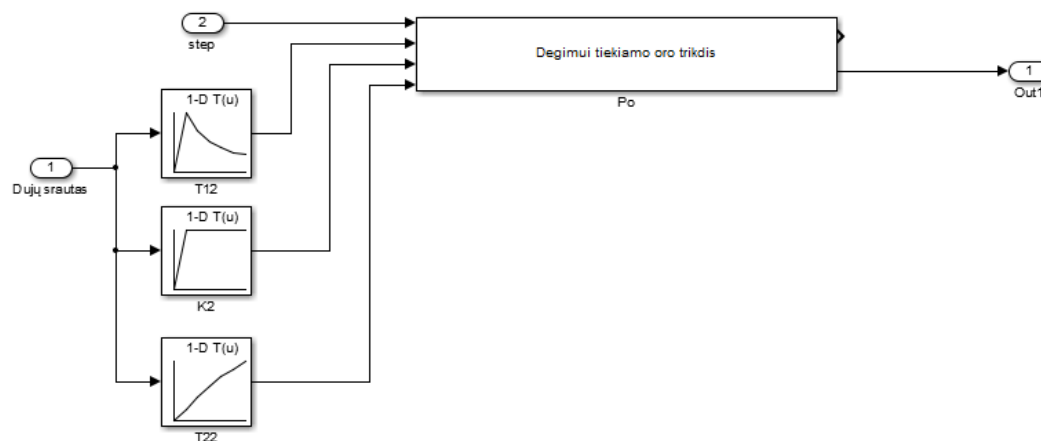
Tiriamos valdymo sistemos kokybės rodikliai šuoliškai pasikeitus kūryklai tiekiamo oro slėgiui 30 %, t.y. (30 Pa). apskaičiuojami iš reakcijos kreivių, parodytų 11.4 paveiksle.



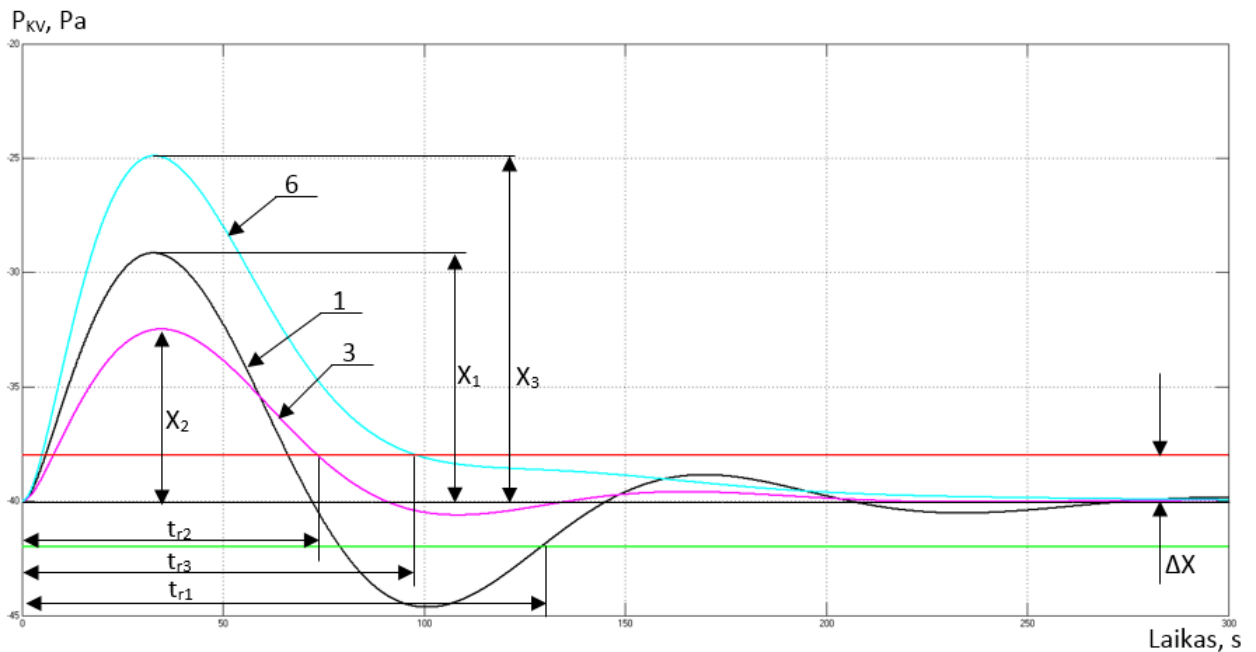
11.1 pav. Analizei naudotas modelis MATLAB/Simulink aplinkoje



11.2 pav. Kamino traukos trikdžiui imituoti naudojamos posistemės struktūra.



11.3 pav. Tiekiamo oro P₀ trikdžiui imituoti naudojamos posistemės struktūra.



11.4 pav. Reakcijos kreivės paveikus 30 % P_0 trikdžiu.

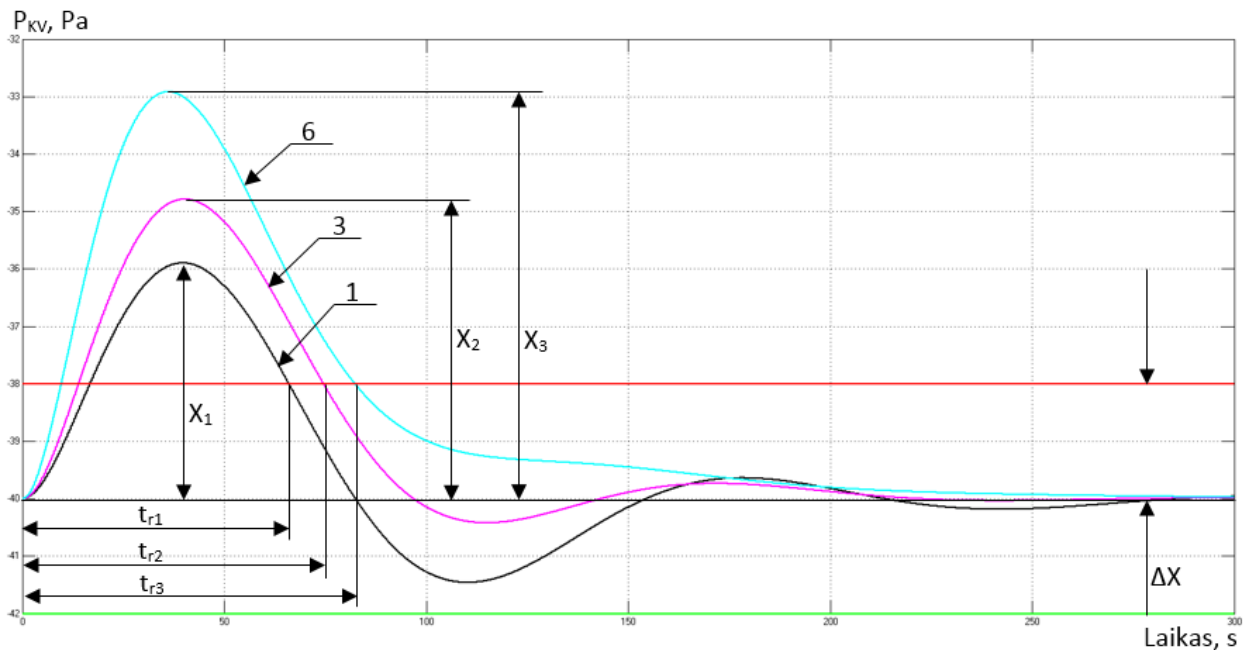
Pateiktos 11.4 paveiksle ARS reakcijos kreivės dujų srautams: 1 – 1,07 m³/s; 3 – 2,12 m³/s; 6 – 3,55 m³/s.

Reakcijos kreivių parametrai: X_1 ; X_2 ir X_3 – maksimalūs dinaminiai nuokrypiai; t_{r1} ; t_{r2} ; t_{r3} – reguliavimo trukmės, lygios laiko trukmei nuo proceso pradžios iki to momento kol P_{KV} įeina į 5 % nustatytojo slėgio (–40 Pa) zoną. Gauti traukos ARS kokybės rodikliai nuo oro slėgio surašyti 11.1 lentelėje.

11.1 lentelė Reguliavimo kokybės rodikliai paveikus P_0 trikdžiu

Sistemos darbo taškas	Dujų srautas, m ³ /s	Maksimalus dinaminis nuokrypis, X_i , Pa	Statinė paklaida, Pa	Reguliavimo trukmė, t_r , s	ITAE kriterijus, *10 ⁴
1	1,07	10,85	0	129,1	5,39
3	2,12	7,4	0	73,7	2,095
6	3,55	15,1	0	98,3	5,50

Naudojantis 11.1 paveiksle esančiu modeliu gautos praretinimo P_{KV} reakcijos kreivės 20 % pasikeitus kamino traukai, parodytos 11.5 paveiksle.



11.5 pav. Reakcijos kreivės paveikus 20 % P_{KV} trikdžiu.

Pavaizduotų 11.5 paveiksle reakcijos kreivių kokybės parametrai: X_1 ; X_2 ; X_3 – maksimalūs dinaminiai nuokrypiai; t_{r1} ; t_{r2} ; t_{r3} – reguliavimo trukmės. Reakcijos kreivės: 1 – 1,07 m^3/s ; 3 – 2,12 m^3/s ; 6 – 3,55 m^3/s .

Apskaičiuoti iš 11.5 paveikslo ARS kokybės rodikliai nuo kamino traukos surašyti 11.2 lentelėje.

11.2 lentelė Reguliavimo kokybes rodikliai paveikus P_K trikdžiu

Dujų srautas, m^3/s	Maksimalus dinaminis nuokrypis, X_i Pa	Statinė paklaida, Pa	Reguliavimo trukmė, s	ITAE kriterijus, $*10^4$
1,07	4,1	0	66,0	2,073
2,12	5,2	0	74,6	1,632
3,55	7,1	0	82,4	2,754

Valdymo sistema su standartiniu PI reguliatoriumi yra stabili visoms katilo apkrovoms, tačiau reguliavimo kokybė keičiasi priklausomai nuo darbo taško ir netenkina didelės galios katilų traukos sistemoms keliamų reikalavimų. Valdymo kokybė pastebimai pablogėja didėjant katilo kūrykloje susidariusių dūmų srautui, t. y., katilui dirbant didesne apkrova. Didėjant traukos sistemos apkrovai labai išauga nepageidautini slėgio P_{KV} svyravimai.

Tuo remiantis daroma išvada, kad katilo traukos sistemai valdyti pritaikius standartinį PI reguliatorių ARS kokybė gali netenkinti jai keliamų reikalavimų.

Traukos proceso valdymo kokybę galima pagerinti valdymui pritaikius adaptyvų PI reguliatorių, kurio derinimo parametrai keistųsi keičiantis katilo galiai taigi ir tiekiamų dujų srautui.

12. Adaptyvaus valdymo sistemos struktūra

Remiantis pirmoje darbo dalyje atliktais skaičiavimais ir modeliavimu pagrįstomis išvadomis, katilo traukos sistema priklauso kintančias dinamines savybes turinčių reguliavimo objektų grupei. Tokias savybes turinčiam objektui valdyti pritaikius įprastinį PID reguliatorių, reguliavimo kokybė ar net stabilumas priklausytų nuo darbo taško – pasikeitusios objekto perdavimo funkcijos.

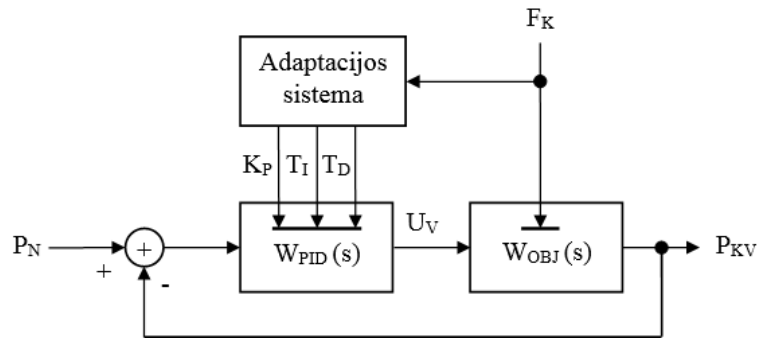
Siekiant garantuoti pastovią reguliavimo kokybę katilo trauką valdančio reguliatoriaus parametrai turi būti keičiami adaptuojant juos prie kintančių traukos proceso dinaminių savybių arba keistis priklausomai nuo objekto funkcionavimo sąlygų realiuoju laiku.

Valdymo sistemoje gali būti realizuota šuolinė arba nepertraukiama reguliatoriaus parametrų adaptacija. Pirmuoju atveju proceso parametrus identifikuojančio parametro kitimo diapazonas padalijamas į diskrečius intervalus. Kiekviename intervale reguliatorius derinamas kaip standartinis P, PI ar PID reguliatorius priėmus, kad objekto parametrai šiame intervale nesikeičia. Vienas iš sudėtingesnių uždavinių yra rasti vidinį ar išorinį objektą veikiantį parametą vienareikšmiškai susietą su objekto parametrų vertėmis.

Projektuojamoje katilo PTVM-100 traukos adaptyvaus valdymo sistemoje identifikuojančiu parametru yra degimo procesui tiekiamų dujų srautas F_K . Projektuojamoje valdymo sistemoje reguliatoriaus parametrai adaptuojami visą dujų srauto kitimo diapazoną suskaidant į šešis intervalus: $0,57 \text{ m}^3/\text{s} - 1,07 \text{ m}^3/\text{s} - 1,57 \text{ m}^3/\text{s} - 2,12 \text{ m}^3/\text{s} - 2,65 \text{ m}^3/\text{s} - 3,18 \text{ m}^3/\text{s} - 3,55 \text{ m}^3/\text{s}$.

Aprašytu principu veikiančios adaptyvaus valdymo sistemos struktūrinė schema pateikta 12.1 paveiksle.

Projektuojamą adaptyvų traukos reguliatorių sudaro šeši standartiniai PI reguliatoriai, kiekvienas jų optimaliai suderintas darbui užduotame intervalo taške. Tokiu būdu gaunamas globalus adaptyvusis reguliatorius, kurio derinimo parametrai darbo metu keičiasi automatiškai, pagal proceso būseną – degimui tiekiamų dujų srautą.



12.1 pav. Adaptyvios valdymo sistemos struktūra

13. Adaptyvaus PI reguliatoriaus derinimas

Nepriklausomai nuo susidariusio dūmų kiekio patikimai traukai užtikrinti turi būti palaikomas pastovus praretinimas (–40 Pa) katilo dūmtraukio pradžioje, t. y., traukos valdymo sistemos nuostatas yra nekeičiamas arba keičiamas labai retai. Tokiu būdu praretinimo (P_{KV}) taigi ir dūmų traukos pokyčius lemia į kūryklą tiekiamo oro slėgio trikdys ir kamino traukos pokyčiai. Todėl adaptyvaus PI reguliatoriaus derinimo parametrai skaičiuojami naudojant formules kompensuoti trikdančių poveikių įtaką reguliavimo parametrai.

Adaptyvaus reguliatoriaus derinimo procedūrą sudaro du etapai. Pirmajame derinimo etape apskaičiuojami reguliatorių parametrai, kurie yra optimalūs lokalinuose sistemos darbo taškuose. Antrajame etape interpoliuojami lokaliųjų reguliatorių parametrai ir tokiu būdu suformuojamas globalinis reguliatorius, kurio parametrai keičiasi priklausomai nuo sistemos būseną keičiančio poveikio – katilui tiekiamų dujų srauto.

Kiekvienam dujų srauto kitimo intervalui adaptyvaus reguliatoriaus derinimo parametrai skaičiuojami pagal ITAE kriterijaus formules.

perdavimo koeficientai:

$$K_{ri} = \frac{0.859}{K_{obji}} \left(\frac{T_{obji}}{\tau_{obji}} \right)^{0.977} . \quad (13.1)$$

integravimo pastoviosios:

$$T_{fi} = \frac{T_{obji}}{0.674} \left(\frac{\tau_{obji}}{T_{obji}} \right)^{0.680} . \quad (13.2)$$

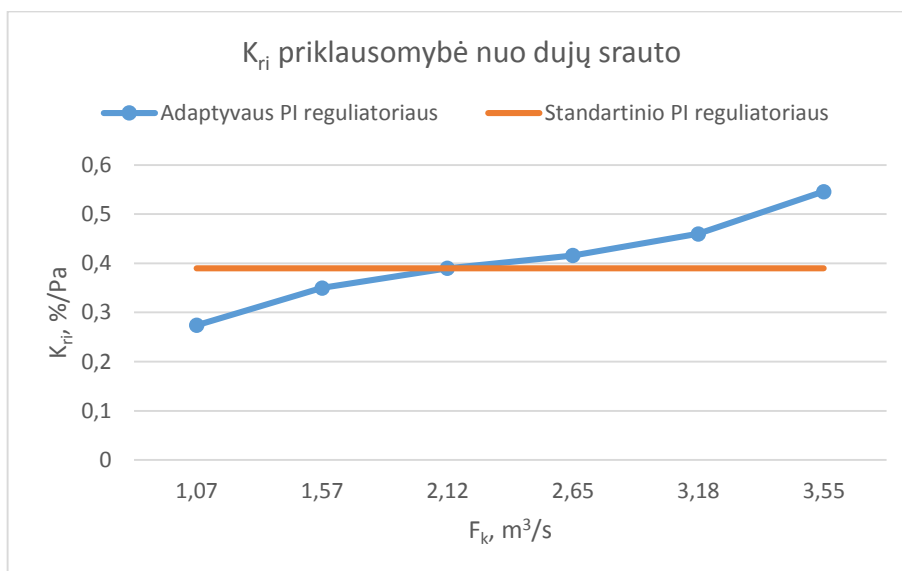
čia: K_{ri} ir T_{fi} – adaptyvaus reguliatoriaus derinimo parametrai i -tajame dujų srauto kitimo taške; i – intervalo numeris (1–6); K_{obji} , T_{obji} ir τ_{obji} – traukos sistemą aprašančios pirmos eilės perdavimo funkcijos parametrai i -tajame dujų srauto kitimo intervale.

Pagal (13.1 ir 13.2) išraiškas apskaičiuoti reguliatorių derinimo parametrai 6.1 lentelėje duotoms traukos sistemos perdavimo funkcijos parametų vertėms pateiktos 13.1 lentelėje.

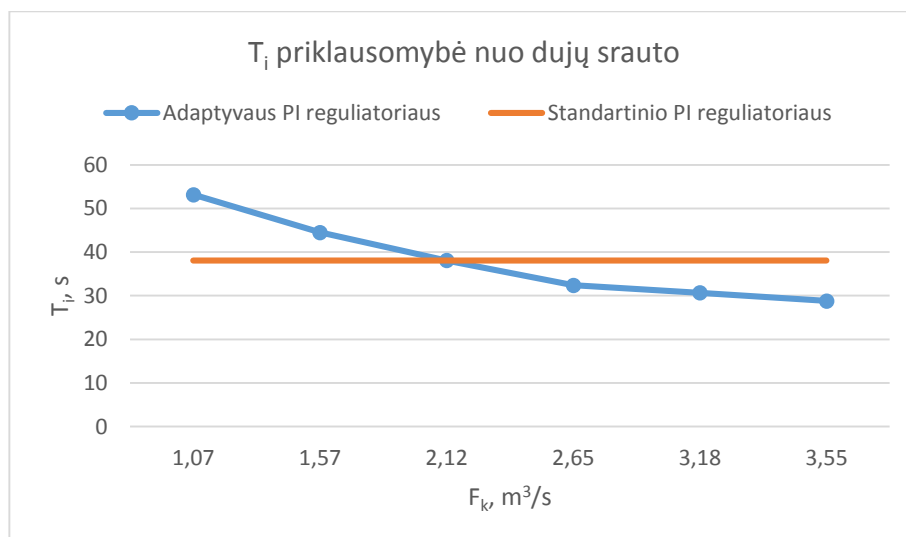
13.1 lentelė

Dujų srautas, m ³ /s	K _{ri} , %/Pa	T _i , s
1,07	0,274	53,18
1,57	0,35	44,5
2,12	0,39	38,1
2,65	0,416	32,42
3,18	0,457	30,67
3,55	0,546	28,8

Priklausomybė tarp reguliatoriaus parametų (stiprinimo koeficiento K_{ri} ir integravimo pastoviosios T_i) ir dujų srauto grafiškai pavaizduoti atitinkamai 13.1 ir 13.2 paveiksluose.



13.1 pav. K_r priklausomybė nuo dujų srauto.



13.2 pav. T_i priklausomybė nuo dujų srauto.

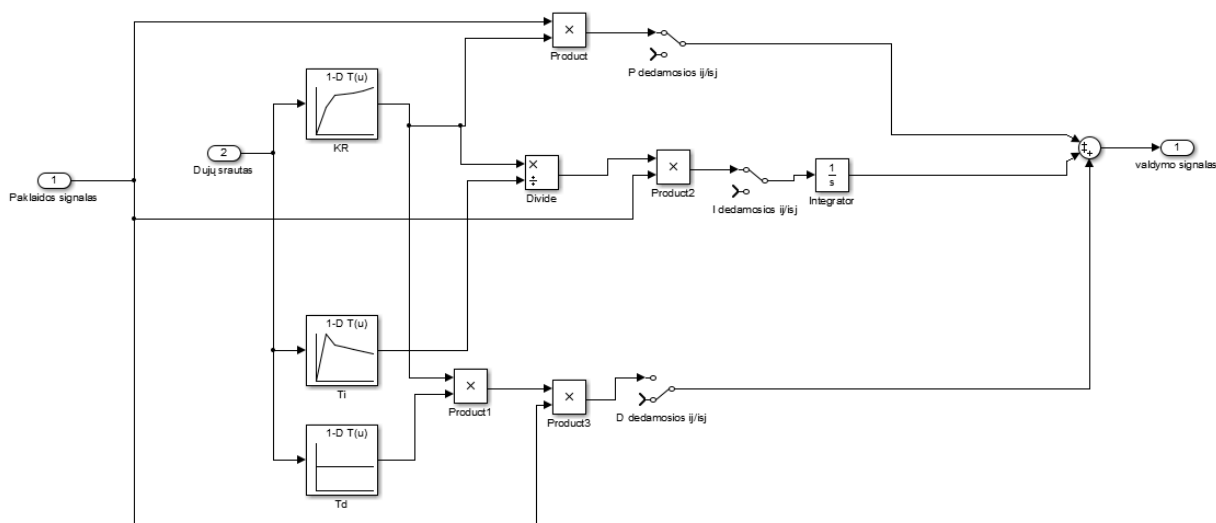
Pagal pavaizduotus priklausomybių grafikus adaptyvaus PI regulatoriaus perdavimo koeficientas turi būti proporcingas, o integravimo pastovioji atvirkščiai proporcinga tiekiamų dujų srautui.

14. Adaptyvaus PID regulatoriaus skaitmeninis modelis

Siekiant pagerinti dūmų traukos valdymo sistemos kokybę panaudotas adaptyvus reguliatorius, kurio derinimo parametrai keičiasi priklausomai nuo katilui tiekiamų dujų srauto, o jo parametrai turi keisti savo vertes degiklių perjungimo metu.

Regulatoriaus skaitmeninis modelis sudaromas tokiu pačiu principu kaip ir standartinio PID regulatoriaus Simulink pakete .

Sudarant reguliatorių naudojamas “Lookup table” blokas, kuris priklausomai nuo paduodamų į katilą dujų srauto, keičia regulatoriaus derinimo parametrus. Į “Lookup table” bloką įvesti 6 derinimo parametrų rinkiniai (13.1 lentelė). “Lookup table” bloke taškai interpoliuojami tiesiškai. Sudarytas adaptyvaus PI regulatoriaus modelis MATLAB/Simulink aplinkoje parodytas 14.1 paveiksle.



14.1 pav. Adaptyvus PID reguliatorius

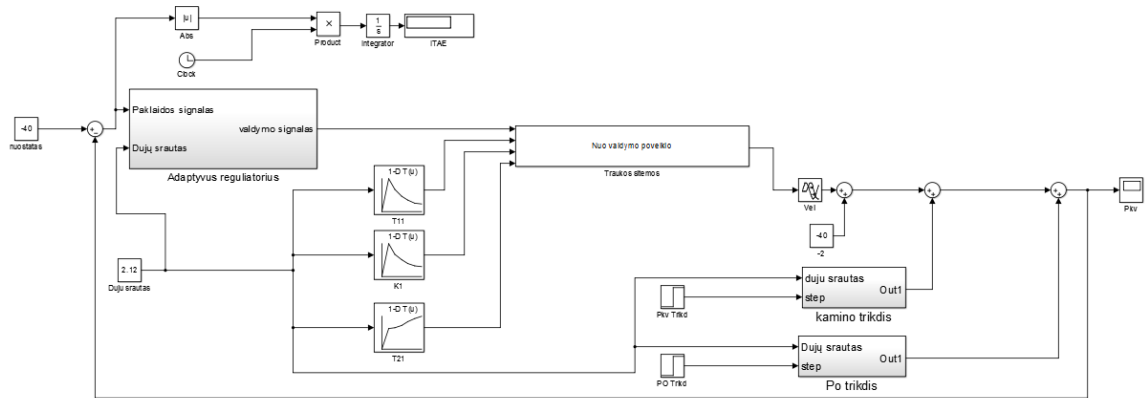
15. Adaptyvios ARS valdymo kokybės tyrimas

Traukos valdymo sistemos reguliavimo kokybės patikrai sudarytas adaptyvios ARS modelis MATLAB/Simulink aplinkoje parodytas 15.1 paveiksle. Valdymo schemas modeliui suprastinti reguliatoriaus modelis (14.1 pav.) įkeltas į posistemę. Kamino traukos ir tiekiamo oro trikdžiams imituoti naudojamų posistemų struktūros parodytos 11.2 ir 11.3 paveiksluose.

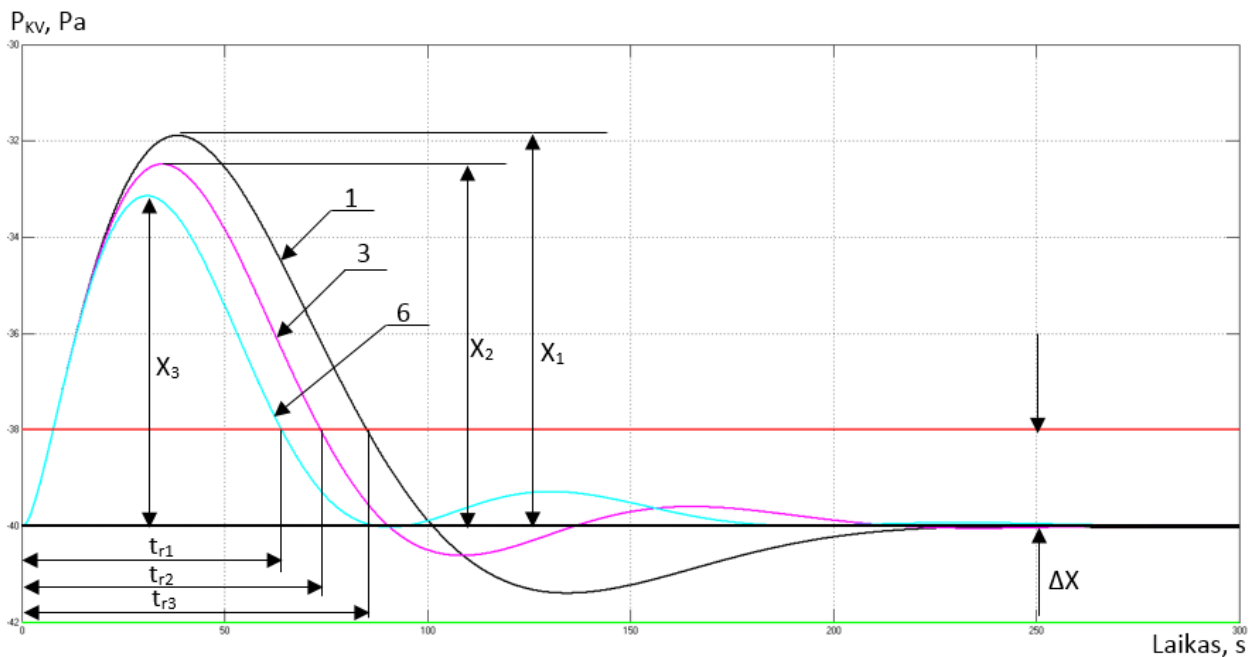
Sudaryto adaptyvaus reguliatoriaus valdymo kokybę patikrinama tokiomis pat sąlygomis kaip ir ARS su standartiniu PI reguliatoriumi (11 skyrius), kai dujų srautai: 1 – 1,07

m^3/s (minimalus dujų srautas); 2 – 2,12 m^3/s (darbo taškas, kuriame skaičiuoti standartinio PI reguliatoriaus parametrai); 3 – 3,55 m^3/s (maksimalus dujų srautas).

Valdymo sistemų reakcijos – slėgio P_{KV} kitimo procesai 30 % pakeitus degimui tiekiamo oro slėgį pokytį, parodyti 15.3 paveiksle, gauti valdymo kokybės rodikliai nurodyti 15.1 lentelėje.



15.2 pav. Sistemos su adaptiviu reguliatoriumi modelis



15.3 pav. Reakcijos kreivės 30 % šuoliškai pasikeitus oro slėgiui

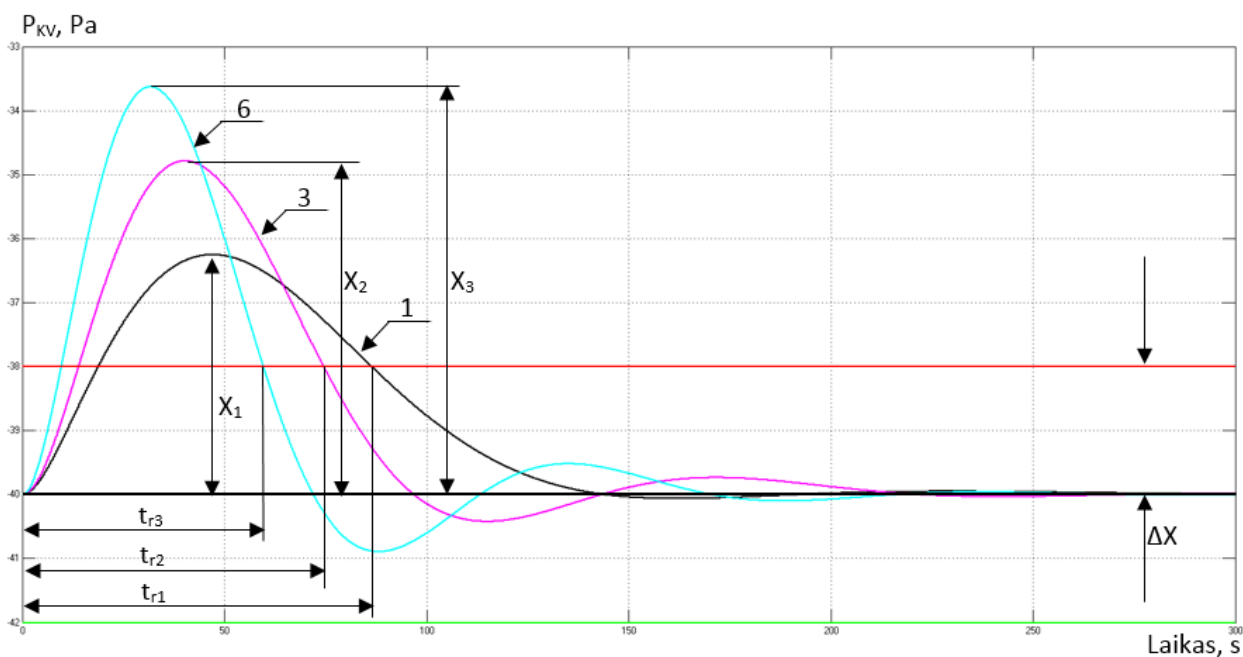
Naudojantis 15.2 paveiksle esančiu modeliu gautos ir 15.3 paveiksle pateiktos reakcijos kreivės, skirtingiems darbo taškams – dujų srautams: 1 – 1,07 m^3/s ; 3 – 2,12 m^3/s ; 6 – 3,55 m^3/s .

Reakcijos kreivių parametrai: X_1 ; X_2 ir X_3 – maksimalūs dinaminiai nuokrypiai; t_{r1} ; t_{r2} ; t_{r3} – reguliavimo trukmės, lygios laiko trukmei nuo proceso pradžios iki to momento kol P_{KV} įeina į 5 % nustatytojo slėgio (–40 Pa) zoną. Reguliavimo kokybės rodikliai pateikti 15.1 lentelėje.

15.1 lentelė Reguliavimo kokybės rodikliai paveikus P_0 trikdžiui

Dujų srautas, m^3/s	Maksimalus dinaminis nuokrypis, Pa	Statinė paklaida, Pa	Reguliavimo trukmė, s	ITAE kriterijus, $*10^4$
1,07	8,0	0	85,1	3,56
2,12	7,4	0	73,7	2,095
3,55	6,9	0	64,0	1,635

Rekcijos kreivės paveikus objektą 20 % kamino traukos trikdžiui P_K parodyta 15.4 paveiksle.



15.4 pav. Rekcijos kreivės 20 % pasikeitus kamino traukai

Pavaizduotų 15.4 paveiksle reakcijos kreivių kokybės parametrai: X_1 ; X_2 ; X_3 – maksimalūs dinaminiai nuokrypiai; t_{r1} ; t_{r2} ; t_{r3} – reguliavimo trukmės. Rekcijos kreivės: 1 – 1,07 m^3/s ; 3 – 2,12 m^3/s ; 6 – 3,55 m^3/s .

Apskaičiuoti iš 15.4 paveikslo ARS kokybės kokybės rodikliai surašyti 15.2 lentelėje.

15.2 lentelė Reguliavimo kokybės rodikliai paveikus P_K trikdžiui

Dujų srautas, m^3/s	Maksimalus dinaminis nuokrypis, Pa	Statinė paklaida, Pa	Reguliavimo trukmė, s	ITAE kriterijus, $*10^4$
1,07	3,75	0	86,5	1,65
2,12	5,2	0	74,6	1,63
3,55	6,4	0	59,7	1,42

16. Tiesinės ir adaptyvių valdymo sistemų kokybės palyginimas

Palyginimo tikslai: palyginti adaptyvios ir tiesinės ARS su PI reguliatoriais, suderintais pagal tą patį ITAE kriterijų, kokybės rodiklius abiejų pagrindinių trikdžių – degimui tiekiamo oro ir kamino traukos atžvilgiu visame katilo galios kitimo diapazone.

Valdymo kokybės palyginimui panaudoti 11.1 ir 11.2 lentelėse pateikti ARS su pastoviais reguliatoriaus parametrais kokybės rodikliai, 15.1 ir 15.2 lentelėse – valdymo sistemos su adaptyviu PI reguliatoriumi kokybės rodikliai veikiant svarbiausiems trikdžiams.

Pagal ITAE kriterijų nominaliai katilo galiai suderintų valdymo sistemų kokybės rodikliai:

- nuo 20 % degimui tiekiamo oro slėgio šuolio:

maksimalus dinaminis nuokrypis 7,4 Pa;

reguliavimo trukmė 73,7s;

ITEA kriterijus $2,095 \cdot 10^4$,

- nuo 30% kamino traukos šuolio:

maksimalus dinaminis nuokrypis 5,2 Pa;

reguliavimo trukmė 74,6s;

ITEA kriterijus $1,63 \cdot 10^4$,

Abiems tiriamoms valdymo sistemoms kokybės rodiklių pokyčiai apskaičiuoti nominalia galia dirbančio katilo kokybės rodiklių atžvilgiu.

Procentine išraiška valdymo kokybės rodiklių pokyčiai, stabilizuojant praretinimą katilo viršuje (P_{KV}) standartiniu PI reguliatoriumi, ribinėms dujų srauto vertėms (1,07 ir 3,55 m³/s) nominalios (2,12 m³/s) atžvilgiu pateikti 16.1 lentelėje.

16.1 lentelė

	Nuo 30% oro slėgio šuolio			Nuo 20% kamino traukos šuolio		
Dujų srautas, m ³ /s	Dinaminių nuokrypių (ΔP_{KV}) pokytis, %.	Reguliavimo trukmių (t_r) pokytis, %.	ITAE kriterijų pokytis, %.	Dinaminių nuokrypių (ΔP_{KV}) pokytis, %.	Reguliavimo trukmių (t_r) pokytis, %.	ITAE kriterijų pokytis, %.
1,07	+46,62	+75,16	+157,28	-21,15	-11,53	+27,02
3,55	+104,05	+33,38	+162,53	+36,54	+10,46	+68,75

Paveikus degimui tiekiamo oro trikdžiui reguliavimo kokybės kriterijai, tiek didėjant tiek ir mažėjant dujų srautui, blogėja.

Dėl tiekiamo oro slėgio 30% pokyčio: reguliavimo parametro dinaminis nuokrypis išauga nuo 7,4 Pa iki 15,1 Pa – pasikeičia 104,05 % (tšk. 6), reguliavimo trukmė – nuo 73,7 s padidėja iki 129,1 s – pasikeičia 75,16 % (tšk. 1), ITAE kriterijus pablogėja 162,53 % (tšk. 1).

Dėl kamino traukos 20 % pokyčio: reguliavimo parametro dinaminis nuokrypis išauga nuo 5,2 iki 7,1 Pa – pasikeičia 36,54 %, reguliavimo trukmė išauga nežymiai 10,46 %, kokybės kriterijus pasikeičia nuo 1,632 iki 2,754 – pablogėja 68,75 %;

Valdymo kokybės rodiklių pokyčiai procentine išraiška, stabilizuojant praretinimą katilo viršuje adaptyviu PI reguliatoriumi ir ribinėms dujų srauto vertėms nominalios atžvilgiu pateikti 16.2 lentelėje.

16.2 lentelė

Dujų srautas, m ³ /s	Nuo 30% oro slėgio šuolio			Nuo 20% kamino traukos šuolio		
	Dinaminių nuokrypių (ΔP_{KV}) pokytis, %.	Reguliavimo trukmių (t_r) pokytis, %.	ITAE kriterijų pokytis, %.	Dinaminių nuokrypių (ΔP_{KV}) pokytis, %.	Reguliavimo trukmių (t_r) pokytis, %.	ITAE kriterijų pokytis, %.
1,07	+8,1	+15,47	+69,92	-27,88	+15,95	+1,22
3,55	-6,76	-13,16	-21,95	+23,07	-19,97	-12,88

Adaptyvios sistemos kokybės rezultatai:

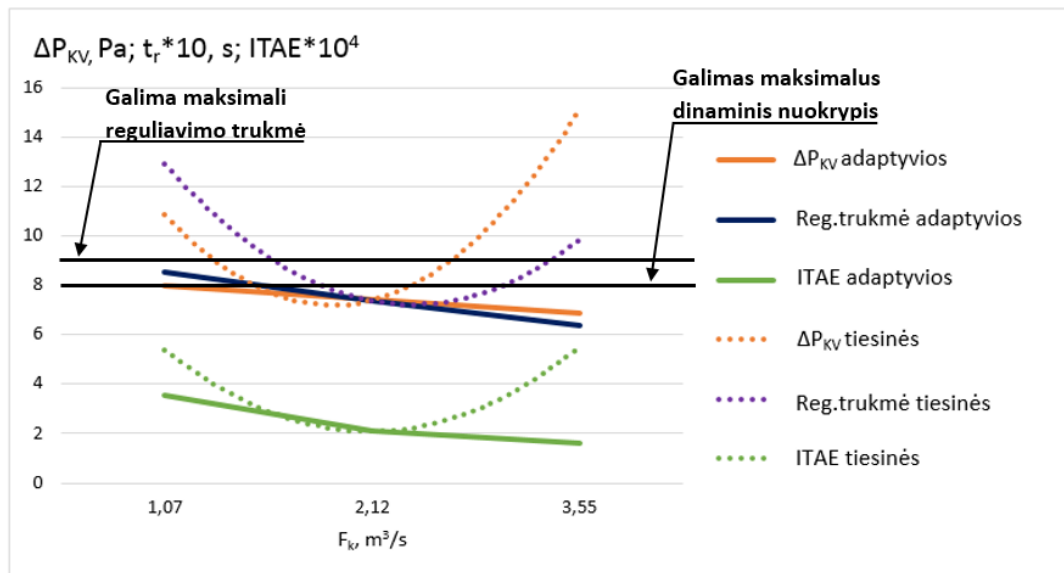
- nuo tiekiamo oro slėgio 30 % pokyčio: reguliavimo parametro dinaminis nuokrypis maksimaliai išauga nuo 7,4 Pa iki 8,0 Pa – pasikeičia 8,1 %, reguliavimo trukmė išauga nuo 73,7 s iki 85,1s – išauga 15,47 %, kokybės kriterijus pasikeičia 69,92 %;
- nuo kamino traukos 20 % pokyčio: reguliavimo parametro dinaminis nuokrypis išauga nuo 5,2 Pa iki 6,4 Pa – pasikeičia iki 23,1 %, reguliavimo trukmė gali padidėti nuo 74,6 s iki 86,5 s – pasikeisti 15,95 %, kokybės kriterijus maksimaliai pasikeičia 12,88 %;

Procentine išraiška palyginamas reguliavimo kriterijų pokytis ribiniuose taškuose (1,07 m³/s ir 3,55 m³/s) P_{KV} valdant su standartiniu ir adaptyviu PI reguliatoriumi. Palyginimo rezultatai veikiant degimui tiekiamo oro slėgio trikdžiui ir keičiantis kamino traukai pateikti 16.3 lentelėje.

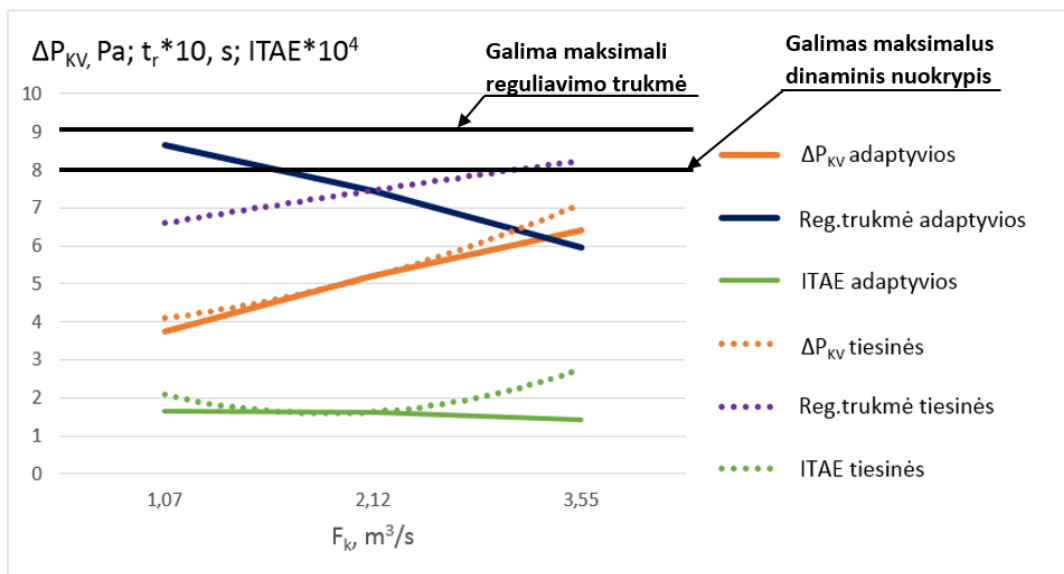
16.3 lentelė

Dujų srautas, m ³ /s	Nuo 30% oro slėgio šuolio			Nuo 20% kamino traukos šuolio		
	Dinaminių nuokrypių (ΔP_{KV}) pokytis, %	Reguliavimo trukmių (t_r) pokytis, %	ITAE kriterijų pokytis, %	Dinaminių nuokrypių (ΔP_{KV}) pokytis, %	Reguliavimo trukmių (t_r) pokytis, %	ITAE kriterijų pokytis, %
1,07	-25,35	-34,08	-33,95	-8,54	+31,0	-20,4
3,55	-54,30	-34,89	-70,28	-9,86	-27,55	-48,44

Tiesinės ARS ir adaptyvios valdymo sistemos kokybės rodiklių kitimo grafikai visame katilo galios (dujų srauto) kitimo diapazone nuo 30 % oro slėgio šuolio pateikti 16.1 paveiksle.



16.1 pav. Valdymo sistemų kokybės grafikai nuo oro slėgio šuolio



16.2 pav. Valdymo sistemų kokybės grafikai nuo oro kamino traukos šuolio

Trauką valdant adaptyviu PI reguliatoriumi kokybės rodikliai labai mažia keičiasi. Mažiau išsiskleidę rodikliai rodo, kad reguliavimo parametro kitimo pobūdis nesikeičia keičiantis katilo apkrovai visame galios diapazone.

Adaptyviu PI reguliatoriumi ITAE kriterijus visais atvejais gaunamas mažesnis lyginant su pastovius parametrus turinčiu reguliatoriumi, o maksimalūs dinaminiai nuokrypiai ir leistina reguliavimo trukmė neviršija leistinų (8,5 Pa ir 90 s) verčių.

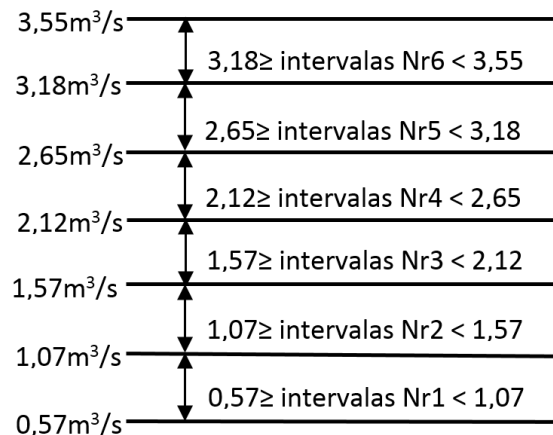
Tokiu būdu ir esant galimybei katilo PKVM-100 traukos valdymui reikia taikyti adaptyvią valdymo sistemą su nepertraukiamu PI reguliatoriaus derinimo parametru kitimu.

17. Adaptyvaus PID reguliatoriaus realizacija SIEMENS valdikliuose

Adaptyvaus PID reguliatoriaus realizacija Siemens valdikliuose pasirinkta dėl galimybės naudotis šių valdiklių programavimo paketu STEP7. STEP7 V5.5 paketo licenzija turi KTU Automatikos katedra.

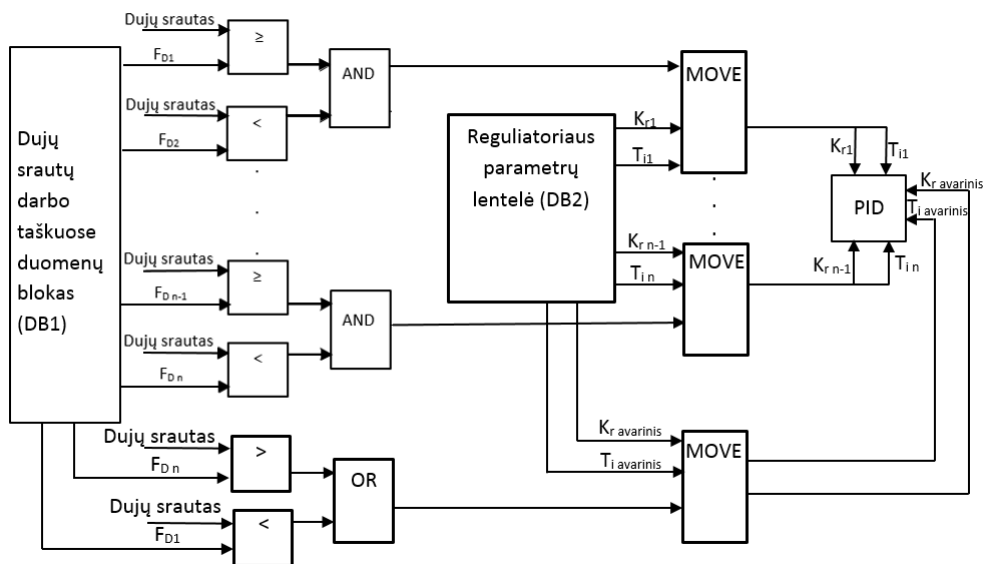
STEP7 V5.5 SP4 paketo standartinėje bibliotekoje nėra reguliatoriaus, kurio parametrai keistūsi keičiantis objekto charakteristikoms. Siemens valdiklių programavimo pakete adaptyvų PID reguliatorių, kurio parametrai pasikesitu šuoliškai galima realizuoti naudojant standartines funkcijas ir standartinį PID reguliatorių.

Projektuojamoje adaptyvaus valdymo sistemoje identifikuojančiu parametru yra degimo procesui tiekiamų dujų srautas F_K . Valdymo sistemoje reguliatoriaus parametrai adaptuojami visą tiekiamų dujų srauto kitimo diapazoną suskaidant į šešis intervalus: $0,57 \text{ m}^3/\text{s} - 1,07 \text{ m}^3/\text{s}$; $1,07 \text{ m}^3/\text{s} - 1,57 \text{ m}^3/\text{s}$; $1,57 \text{ m}^3/\text{s} - 2,12 \text{ m}^3/\text{s}$; $2,12 \text{ m}^3/\text{s} - 2,65 \text{ m}^3/\text{s}$; $2,65 \text{ m}^3/\text{s} - 3,18 \text{ m}^3/\text{s}$; $3,18 \text{ m}^3/\text{s} - 3,55 \text{ m}^3/\text{s}$. Dujų srautui patekus į nustatytą intervalą reguliatoriaus parametrai pakeičiami – perrašomi, darbui kitame intervale (17.1 pav.). Pavyzdžiui: jei degimui tiekiamas dujų srautas patenka į intervalą Nr1 reguliatoriaus parametrai priskiriami $K_r = 0,274 \text{ \%}/\text{Pa}$; $T_i = 53,18 \text{ s}$, jei dujų srautas patenka į intervalą Nr2 tuomet $K_r = 0,35 \text{ \%}/\text{Pa}$; $T_i = 44,5 \text{ s}$ ir t.t. reguliatoriaus parametrai pateikti 13.1 lentelėje.



17.1 pav. Dujų srauto intervalai

Naudojant standartines funkcijas tokias kaip palyginimo (mažiau, daugiau arba lygu) sudaroma sistema, kuri keičiantis dujų srautui keičia reguliatoriaus parametrus, sistemos struktūra parodyta 17.2 paveiksle.



17.2 pav. Adaptyvaus PID regulatoriaus realizavimo schema

Intervalų vertės surašomos duomenų bloke DB1, iš kurio programa nusiskaito reikšmes (duomenų bloko struktūra pateikta priede Nr4a). Schemoje atskirų komparatorių grupėmis lyginamas tiekiamų dujų srautas su visų šešių intervalų ribinėmis vertėmis ir taip nustatomas darbo taško intervalo numeris. Priklausomai nuo to, į kurį intervalą patenka tiekiamas dujų srautas, reguliatoriui nusiunčiami derinimo parametrai iš duomenų bloko DB2 (priedas Nr4 b). Parametrai persiunčiami į PID regulatoriaus duomenų bloką DB58 (priedas Nr4 c) naudojant standartine funkciją „MOVE“. Pasikeitus dujų srautui, tuo pačiu pasikeitus intervalui suaktyvinama kita intervalo nustatymo (komparatorių) grupė ir į reguliatorių nusiunčiami nauji derinimo parametrai. Adaptyvioje valdymo sistemoje sugedus dujų srauto matuokliui ar jei dėl kitų priežasčių dujų srautas būtų mažesnis ar didesnis už ribines vertes reguliatoriui įrašomi numatyti avariniai derinimo parametrai $K_{r \text{ avarinis}} = 0,4 \text{ \%}/\text{Pa}$; $T_{i \text{ avarinis}} = 35,68\text{s}$. Visos programos fragmentai pateikti priede Nr3.

18. Adaptyvaus PI regulatoriaus reguliavimo kokybės tyrimas tarpiniuose taškuose

STEP7 V5.5 SP4 pakete yra galimybė sudaryti PID reguliatorių, kurio parametrai keistųsi pakopomis – katilui tiekiamų dujų srautui pasiekus vieną iš intervalo ribų, pavyzdžiui $1,57 \text{ m}^3/\text{s}$ arba $2,12 \text{ m}^3/\text{s}$ (18.1pav.). Keičiantis dujų srautui traukos sistemos antros eilės perdavimo funkcijos (6.3) parametrai: stiprinimo koeficientas ir laiko pastoviosios keičiasi, o adaptyvaus PI regulatoriaus parametrai visame šiame intervale lieka pastovūs.

Šio tyrimo tikslas ištirti ar visame dujų kitimo intervale adaptyvus reguliatorius su tais pačiais parametrais tenkina reguliavimo kokybės reikalavimus ir kiek keičiasi kokybės rodikliai. Šiame tyrime naudojamas MATLAB/Simulink aplinkoje sudarytas modelis (15.2 pav.).

Modelyje objekto ir trikdžių parametrai keičiami naudojant „Lookup Table“ bloką, kuriame parametų vertės tarpiniame taške, kai dujų srautas lygus 1,85 m³/s randami tiesinės interpoliacijos būdu. Šiuo modeliu galima ištirti ARS valdymo kokybę ne tik apskaičiuotuose darbo taškuose bet ir bet kurioms tarpinėms dujų srautų vertėms.

Tyrimo metu ištiriama situacija kuomet dujų srautas yra intervalo Nr3 (18.1 pav.) taškuose (1,57 m³/s, 1,85 m³/s ir 2,12 m³/s), o adaptyvaus PI reguliatoriaus parametrai lieka tokie kokie buvo paskaičiuoti nominaliame katilo darbo režime (2,12 m³/s): $K_r = 0,41 \text{ \%}/\text{Pa}$ ir $T_i = 37 \text{ s}$. Traukos sistemos parametrai valdymo poveikio atžvilgiu dujų srautas 1,57 m³/s, 2,12 m³/s ir 1,85 m³/s surašyti 18.1 lentelėje, veikiančių pagrindinių trikdžių atžvilgiu 18.2 lentelėje.

18.1 lentelė

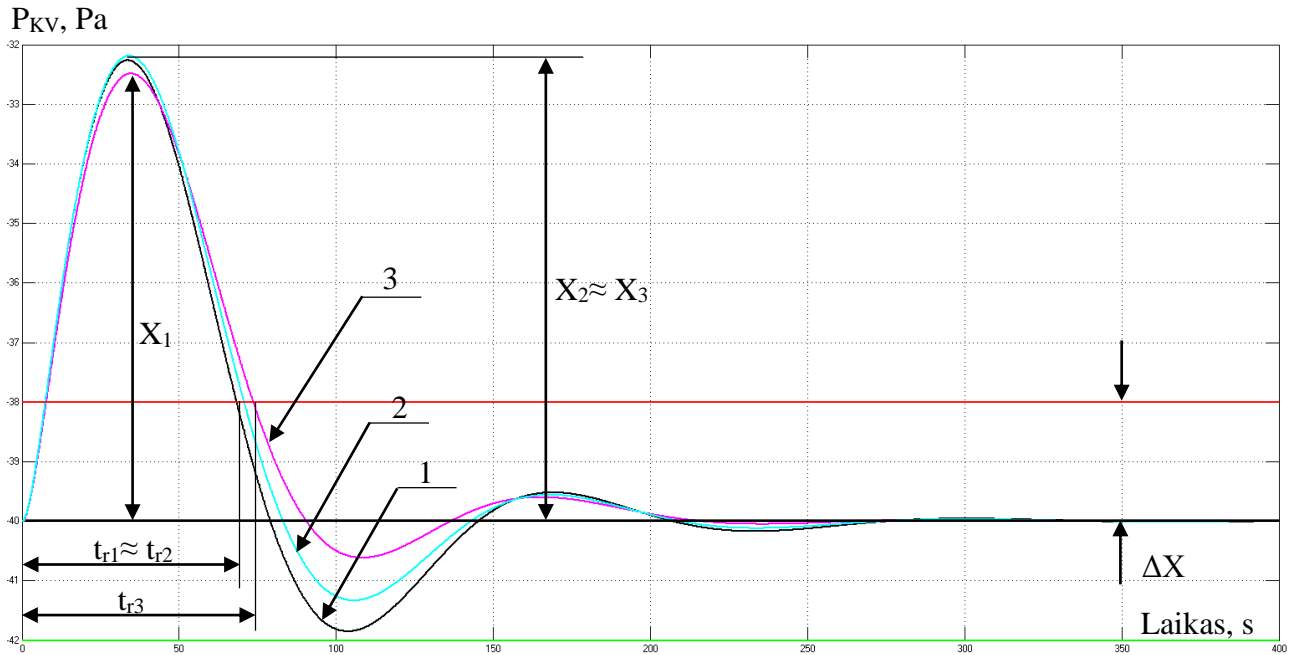
Dujų srautas, m ³ /s	K ₁ , Pa/%	T ₁₁ , s	T ₂₁ , s
1,57	6,30	53,03	14,55
1,85	5,46	45,46	15,25
2,12	4,70	37,88	15,95

18.2 lentelė

Dujų srautas, m ³ /s	Oro slėgio trikdis			Kamino traukos trikdis		
	K ₂ , Pa/Pa	T ₁₂ , s	T ₂₂ , s	K ₃ , Pa/Pa	T ₁₃ , s	T ₂₃ , s
1,57	0,9	53,7	2,16	0,1	52,65	8,7
1,85	0,9	46,92	2,68	0,1	45,53	8,9
2,12	0,9	40,14	3,2	0,1	38,41	9,1

Valdymo sistemos pereinamieji procesai gauti: pasikeitus 30 % degimui tiekiamo oro slėgiui ir 20 % kamino traukai.

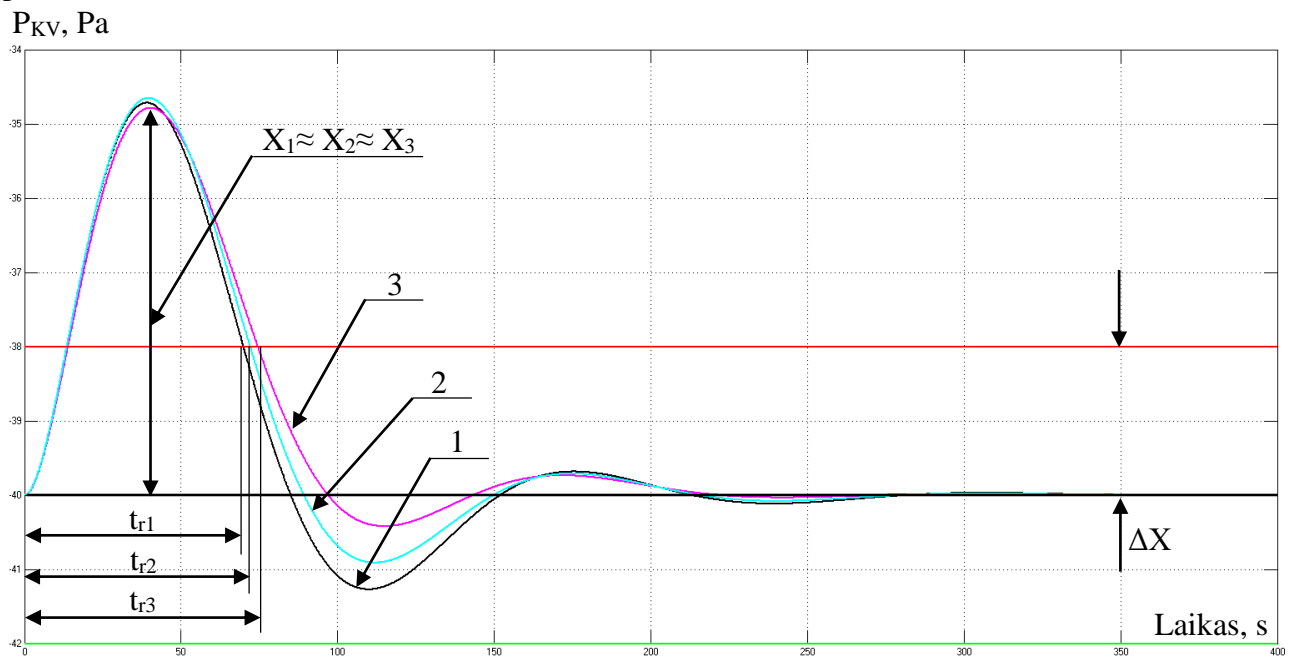
Valdymo sistemų reakcijos – praretinimo katilo viršuje kitimo procesai 30 % pakeitus degimui tiekiamo oro slėgį pokytį, parodyti 18.1 paveiksle.



18.1 pav. Reakcijos kreivės 30 % šuoliškai pasikeitus oro slėgiui

Pavaizduotų 18.1 paveiksle reakcijos kreivių kokybės parametrai: X_1 ; X_2 ; X_3 – maksimalūs dinaminiai nuokrypiai; t_{r1} ; t_{r2} ; t_{r3} – reguliavimo trukmės. Reakcijos kreivės: 1 – $1,57 \text{ m}^3/\text{s}$; 2 – $1,845 \text{ m}^3/\text{s}$; 3 – $2,12 \text{ m}^3/\text{s}$.

Rekijos kreivės paveikus objektą 20 % kamino traukos trikdžiui P_{VK} parodyta 18.2 paveiksle.



18.2 pav. Reakcijos kreivės 20 % pasikeitus kamino traukai

Pavaizduotų 18.2 paveiksle reakcijos kreivių kokybės parametrai: X_1 ; X_2 ; X_3 – maksimalūs dinaminiai nuokrypiai; t_{r1} ; t_{r2} ; t_{r3} – reguliavimo trukmės. Reakcijos kreivės: 1 – $1,57 \text{ m}^3/\text{s}$; 2 – $1,845 \text{ m}^3/\text{s}$; 3 – $2,12 \text{ m}^3/\text{s}$.

Procesų dinaminės nuokrypos ir reguliavimo laikas, keičiantis dujų srautui intervale Nr3, veikiant bet kuriam iš trikdžių keičiasi labai nežymiai: maksimalūs dinaminiai nuokrypiai ir reguliavimo trukmės mažiau nei 5 %.

Dūmų traukos adaptyvi valdymo sistema su pakopomis kintančiais regulatoriaus derinimo parametrais savo kokybės rodikliais mažai (<5 %) skiriasi nuo adaptyvios sistemos su nepertraukiamu parametrų koregavimu kokybės rodiklių. Tokiu būdu ši valdymo sistema gali būti įdiegta katilo PKVT-100 dūmų traukai valdyti.

Išvados ir rezultatai

1. Surinkti katilo PKVT-100 traukos sistemos dinaminiam modeliui sudaryti reikalingi duomenys: katilo ir dūmų ištraukimo kanalo mechaninių, šiluminių ir aerodinaminių parametrų vertės. Apskaičiuoti susidariusių dūmų srautai.
2. Sudarytas imitacinis katilo traukos sistemos, kuriame įvertinta: dūmų temperatūros ir slėgio pokyčiai, sistemos atskirų dalių laidumai, kamino traukos ir katile susidariusių dūmų slėgio pokyčiai katilui dirbant skirtinguose galios kitimo taškuose.
3. Imitacinio modelio pagrindu sudaryti tiesiniai katilo traukos sistemos dinaminiai modeliai kiekvienam dirbančių degiklių deriniui.
4. Modeliavimo būdu gautos traukos sistemos reakcijos nuo valdymo poveikio ir pagrindinių trikdžių. Visiems degiklių deriniams apskaičiuotos traukos sistemos perdavimo funkcijos visų įėjimo kintamųjų atžvilgiu.
5. Traukos kokybės palyginamajam tyrimui pasirinktos dvi valdymo sistemos: tiesinė su PI ir adaptyvi su PI reguliatoriais. Apskaičiuoti šių sistemų reguliatoriai, modeliavimo būdu gauti sistemų pereinamieji procesai pagrindinių trikdžių atžvilgiu ir tarpusavyje palyginti jų kokybės rodikliai. Pasirinkta adaptyvi valdymo sistema, kurios kokybės rodikliai: santykiniai dinaminiai nuokrypiai 24,5 %, reguliavimo trukmės 30 % ir ITAE kriterijai 43 % vidutiniškai geresni už tiesinės sistemos atitinkamus rodiklius.
6. Realizuotas pakopinis adaptyvus PI reguliatorius Simatic valdiklyje.
7. Modeliavimo būdu ištirta, kad dūmų traukos adaptyvi valdymo sistema su pakopomis kintančiais reguliatoriaus derinimo parametrais savo kokybės rodikliais mažai (<5 %) skiriasi nuo adaptyvios sistemos su tolydiniu parametrų koregavimu kokybės rodiklių.
8. Bendra atlikto tyrimo išvada: modernizuojant katilo PKVT-100 valdymo sistemą tikslinga vietoje tiesinės dūmų traukos ARS pritaikyti adaptyvų dūmų traukos valdymą tam panaudojant adaptyvų PI reguliatorių su tolydiniu ar pakopiniu derinimo parametrų koregavimu.

Literatūros sąrašas

1. Januševičius V.S. Automatinis valdymas: teorija, uždaviniai, sprendimai. Kaunas, „Technologija“, 2003, 554 p.
2. G.Gimbutis, K.Kajutis, V.Krukoniš, A.Pranckūnas, P.Švenčianas. „Šiluminė technika“ Vilnius, „Mokslas“ 1993, 336p.
3. D.Levišauskas „Automatinio reguliavimo sistemų derinimas“ Vilnius, „Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla“ 2008, 120p.
4. V.Aleksa, V.Galvanauskas. „Technologinių procesų automatizavimas ir valdymas“ Kaunas, „Technologija“ 2008, 282p.
5. A.Večkys „Regulatoriai Simatic valdikliuose“ Kaunas, „Technologija“, 2008, 202p.
6. VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS Kęstutis Valančius PASTATO AKTYVIOSIOS ŠILUMINĖS TALPOS ĮTAKA PATALPŲ MIKROKLIMATUI BEI ENERGIJOS POREIKIAMS Daktaro disertacija Technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija – 06T Vilnius, 2006 .
7. KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS Tomas Jonas Januška KATILO DEGIMO PROCESO VALDYMO SISTEMOS PROJEKTAVIMAS IR TYRIMAS Baigiamasis bakalauro projektas Automatika ir valdymas. Kaunas, 2015.
8. Katilo PTVM-100 techninė dokumentacija.
9. http://www.engineeringtoolbox.com/natural-draught-ventilation-d_122.html [žiūrėta 2016 m. vasario 10 d.]
10. <http://controlguru.com/ratio-control-and-metered-air-combustion-processes/> [žiūrėta 2016 m. vasario 10 d.]
11. <http://gazogenerator.com/boilers-for-power-and-process/industrial-boilers/> [žiūrėta 2016 m. vasario 23 d.]
12. <http://pudeb.com/boilerburner-combustion-air-supply-requirements-and-maintenance-2/> [žiūrėta 2016 m. vasario 24 d.]
13. <http://innovativecontrols.com/blog/how-do-burner-combustion-control-systems-work> [žiūrėta 2016 m. vasario 24 d.]
14. <http://www.wikiwand.com/en/Furnace> [žiūrėta 2016 m. kovo 19 d.]
15. <http://www.autoflame.com/mk8mm-boiler-control/> [žiūrėta 2016 m. balandžio 5 d.]
16. <http://www.slideshare.net/snehpatel2/high-pressure-boilers-1> [žiūrėta 2016 m. balandžio 5 d.]
18. [http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Central%20Web%20Documents/ISC %20Ltd%20-%20Combustion%20Process%20Control%20Technical%20Review.pdf](http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Central%20Web%20Documents/ISC%20Ltd%20-%20Combustion%20Process%20Control%20Technical%20Review.pdf) [žiūrėta 2016 m. gegužės 3 d.]

19. <http://joshikandarp.webs.com/documents/draught.pdf> [žiūrėta 2016 m. gegužės 3 d.]
20. <http://biysk.all.biz/en/ptvm-50-coppers-liquid-fuel-g3195498#.V2QYrbt95D9> [žiūrėta 2016 m. spalio 4 d.]
21. <http://www.cfdc.tu-sofia.bg/combustion.html> [žiūrėta 2016 m. spalio 20 d.]
22. R.Vasanthakumar. Power Plant Engineering. Sasurie college of engineering. 2008 m [žiūrėta 2016 m. spalio 20d.] Prieiga per internetą: <http://www.sasurieengg.com/e-course-material/EEE/III-Year%20Sem%205/ME%206701%20POWER%20PLANT%20ENGINEERING.pdf>
23. Naveenaggarwal. Draught System - Natural and Artificial draught system. 2011 m [žiūrėta 2016 m. lapkričio 8 d.] <http://www.indiastudychannel.com/resources/141978-Draught-System-Natural-Artificial-draught.aspx>
24. <https://www.quora.com/What-is-the-difference-between-ID-fan-and-FD-fan> [žiūrėta 2016 m. lapkričio 8 d.]
25. <https://www.kaunoenergija.lt/naujienos/pigiausia-sildytis-is-centralizuoto-tinklo/> [žiūrėta 2016 m. lapkričio 8 d.]
26. <http://www.biokuras.lt/centralizuotas-silumos-tiekimas-jau-pigiausias-sildymo-budas> [žiūrėta 2017 m. kovo 12 d.]
27. http://www.fieldcontrols.com/draft-control-1?page_id=95 [žiūrėta 2017 m. kovo 12 d.]

PRIEDAI

Priedas Nr.1 MATLAB programos tekstas objektų pirmos eilės perdavimo funkcijoms gauti

```
% Perdavimo funkciju koeficientu nustatymas
% taikant tiesini modelio parametru apskaiciavimo metoda

clc, close all, clear all, warning off

xe_inf=20.01;
EXP=xlsread('oro_srautas.xlsx')

mu1=55;
mu2=60;
te2=EXP(1:end,1);
xe2=EXP(1:end,2);
x0=xe2(1);

dx=xe_inf-x0;
if dx>0,
    sim_ind=find(xe2>=(x0+0.01*dx));
else
    sim_ind=find(xe2<=(x0+0.01*dx));
end,

te=te2(sim_ind);
xe=xe2(sim_ind)-x0;

%Maziausiu kvadratu motodu
%ivertiname modelio parametrus
log_x_rel=log(1-xe(:)./dx);
T=[ones(length(te),1) -te];
PAR= T \ log_x_rel;
k0=dx/(mu2-mu1)
T0=1/PAR(2)
tau0=PAR(1)*T0

%Reakcijos kreives modeliavimas
for i=1:100,
    t_mod(i)=(i-1)*(te2(end)-te2(1))/100+te2(1);
    if (t_mod(i)>=tau0),
        x_mod(i)=dx*(1.0-exp(-(t_mod(i)-tau0)/T0))+x0;
    else
        x_mod(i)=x0;
    end
end
end
plot(te2,xe2,'ob',t_mod,x_mod,'g'), grid on;
legend('eksperimento taškai','aprosimuota perdavimo funkcija')
```

Priedas Nr.2 MATLAB programos tekstas objektų antros eilės perdavimo funkcijoms gauti

```
clc, close all, clear all, warning off

global TIME OBJ_INPUT OBJ_OUTPUT
open IDENT_OBJ.mdl;

EXP=xlsread('deguonies.xlsx');
mu1=55;
mu2=60;
te=EXP(1:end,1);
xe=EXP(1:end,2);
x0=xe(1);
xe_inf=xe(end);

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

disp('Initial parameters:')
k0=dx/(mu2-mu1)
tau0=te(sim_ind(1)-1)
T06321_ind=find(((xe-x0)./dx)>=0.6321);
T1=(te(T06321_ind(1))-tau0)*0.5
T2=(te(T06321_ind(1))-tau0)*0.3

TIME=te;
OBJ_INPUT=[mu2-mu1];
OBJ_OUTPUT=xe;

PARAMETERS0=[k0, tau0, T1, T2];

OPTIONS1=optimset('MaxIter', 200);

disp('Optimization running...')
PARAMETERS = fminsearch('IDENT_J',PARAMETERS0,OPTIONS1);

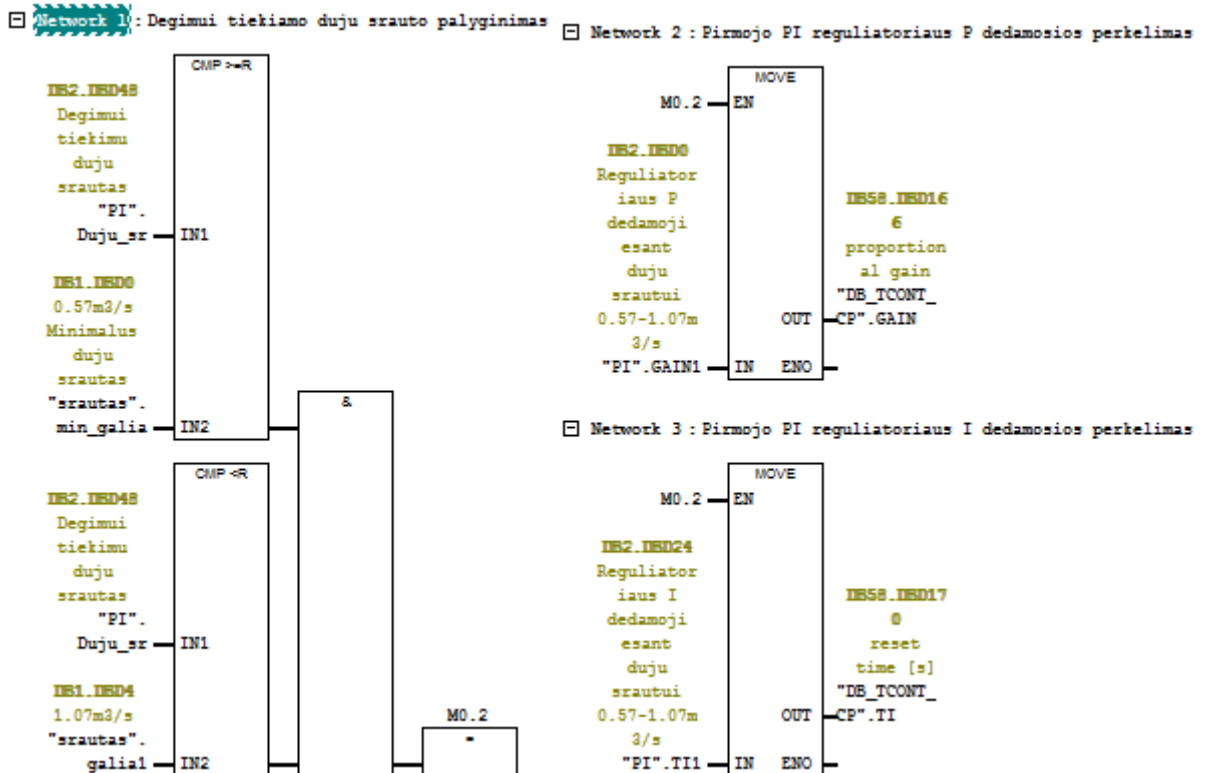
k0=PARAMETERS(1)
tau0=max([0 PARAMETERS(2)])
T1=max([0 PARAMETERS(3)])
T2=max([0 PARAMETERS(4)])

tproc=TIME(end);
sim('IDENT_OBJ.mdl',TIME);

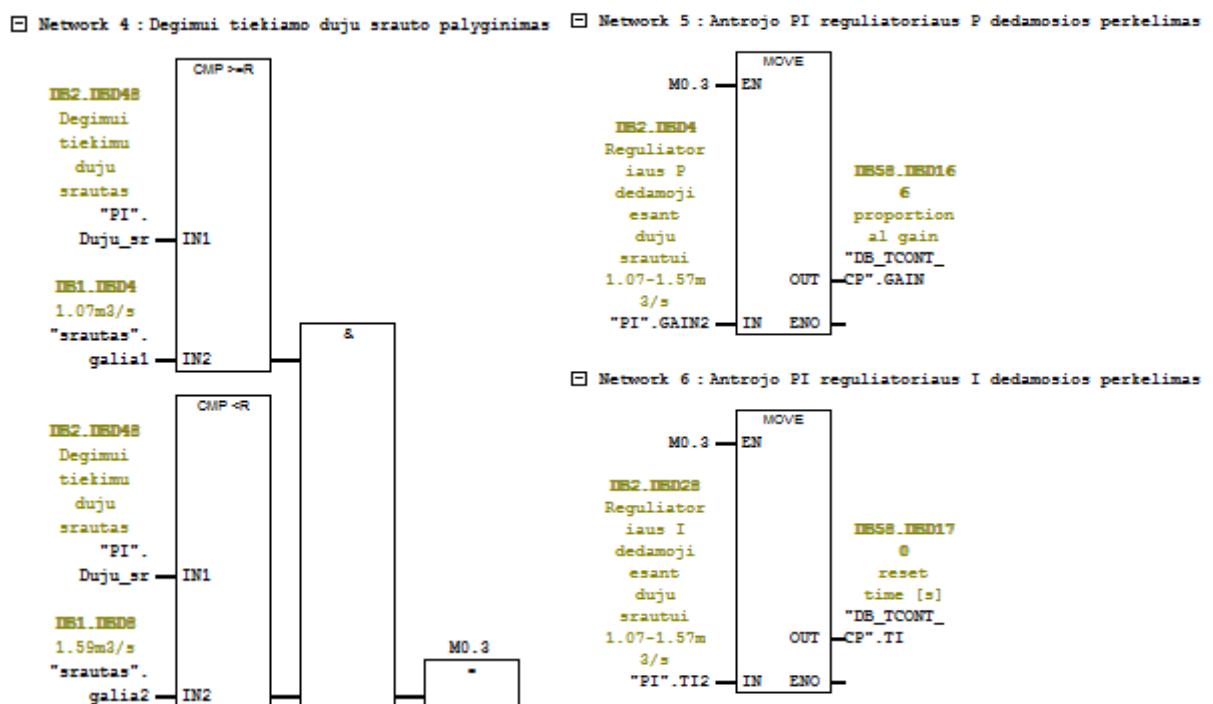
plot(te,xe,'o',TIME,M_OUTPUT,'-');
legend('eksperimento taškai','aproksimuota perdavimo funkcija')
```

Priedas Nr.3 Adaptyvaus PID reguliatoriaus realizacijos STEP7 pakete programos fragmentai.

Programos fragmentas dujų srautų palyginimui ir reguliatoriaus (pirmajam darbo taškè) parametų perkelimui.

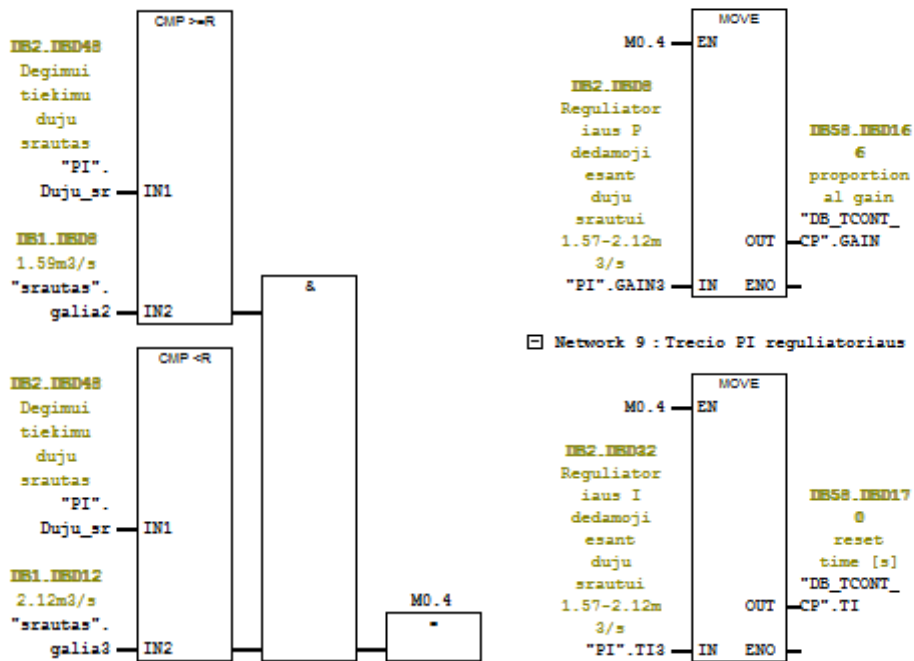


Programos fragmentas dujų srautų palyginimui ir reguliatoriaus (antrajam darbo taškè) parametų perkelimui.

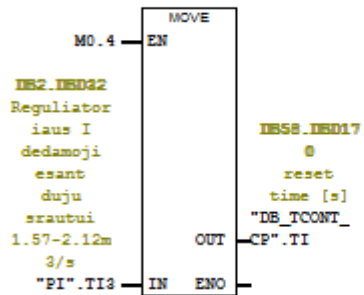


Programos fragmentas dujų srautų palyginimui ir reguliatoriaus (trečiajame darbo taške) parametrų perkėlimui.

□ Network 7 : Degimui tiekiamo duju srauto palyginimas □ Network 8 : Trecio PI reguliatoriaus P dedamosios perkėlimas

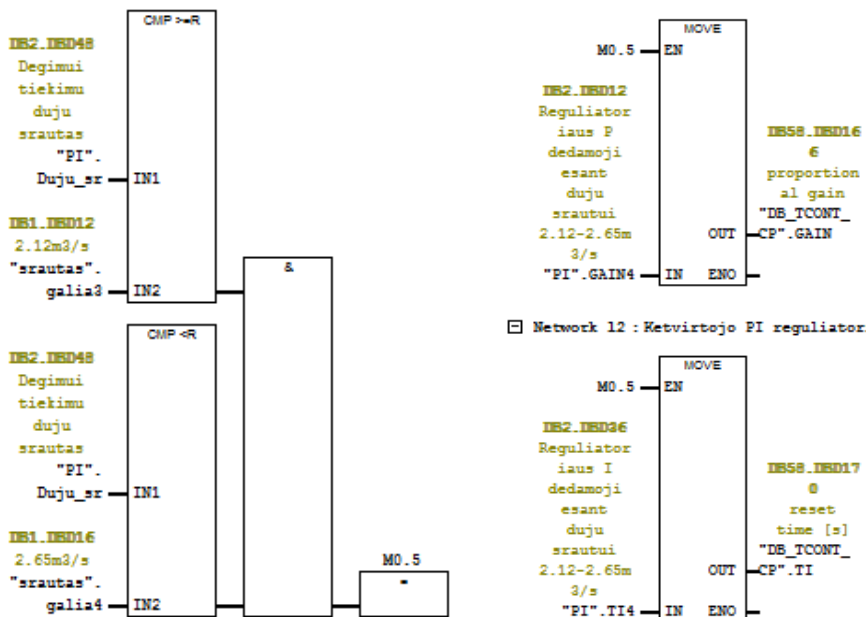


□ Network 9 : Trecio PI reguliatoriaus I dedamosios perkėlimas

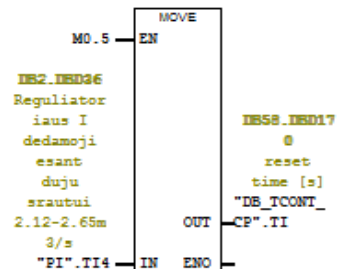


Programos fragmentas dujų srautų palyginimui ir reguliatoriaus (ketvirtajame darbo taške) parametrų perkėlimui.

□ Network 10 : Degimui tiekiamo duju srauto palyginimas □ Network 11 : Ketvirtojo PI reguliatoriaus P dedamosios perkėlimas

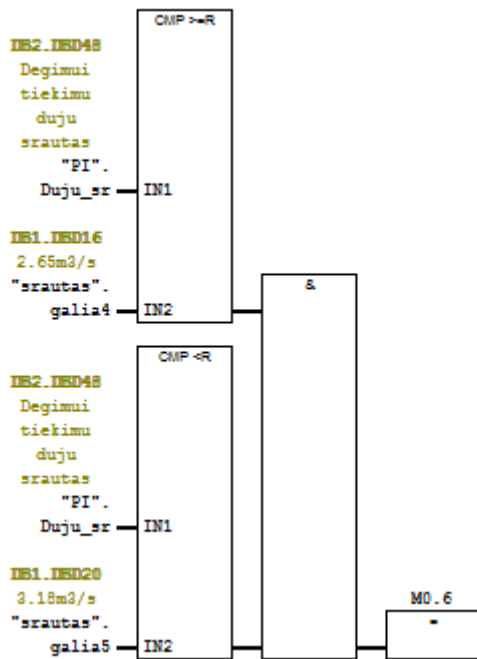


□ Network 12 : Ketvirtojo PI reguliatoriaus I dedamosios perkėlimas

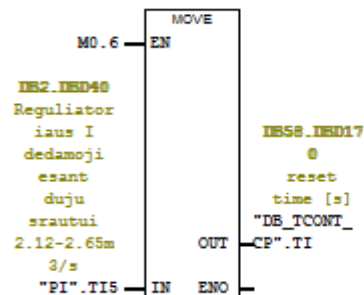


Programos fragmentas dujų srautų palyginimui ir regulatoriaus (penktajame darbo taške) parametrų perkelimui.

□ Network 13 : Degimui tiekiamo duju srauto palyginimas □ Network 14 : Penktojo PI regulatoriaus P dedamosios perkeltas

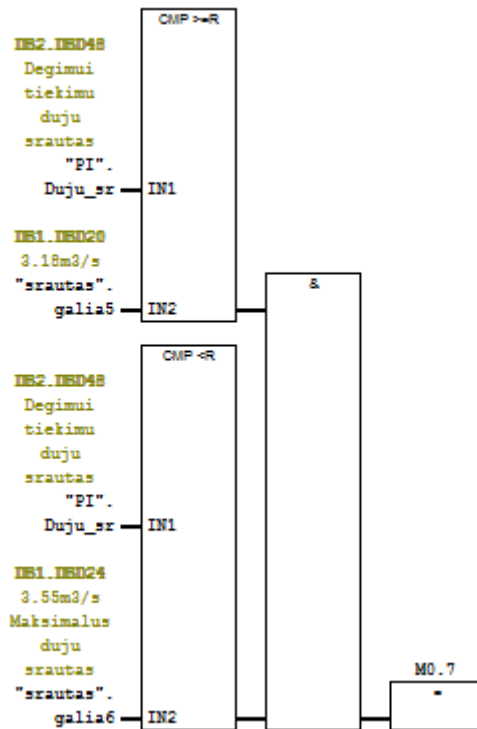


□ Network 15 : Penktojo PI regulatoriaus I dedamosios perkeltas

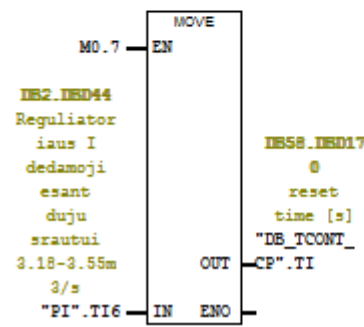


Programos fragmentas dujų srautų palyginimui ir regulatoriaus (šeštajame darbo taške) parametrų perkelimui.

□ Network 16 : Degimui tiekiamo duju srauto palyginimas □ Network 17 : Sestojo PI regulatoriaus P dedamosios perkeltas

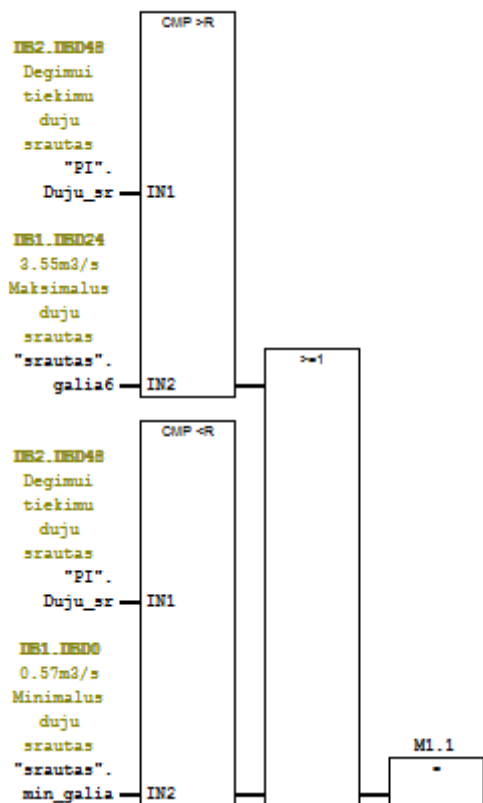


□ Network 18 : Sestojo PI regulatoriaus I dedamosios perkeltas

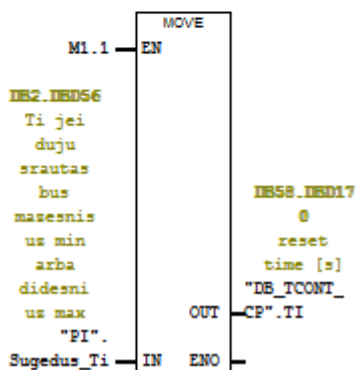


Programos fragmentas nustatantis PI reguliatoriaus parametrus dujų srautui viršijus maksimalią vertę arba mažesnę už minimalią galimą vertę.

□ Network 19 : Degimui tiekiamo duju srauto palyginimas

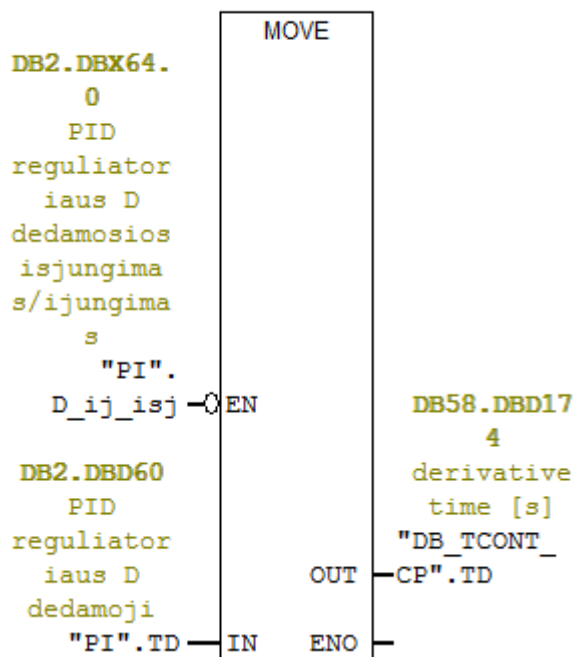


□ Network 21 : Sugedus srauto jutikli PI reguliatoriaus I dedamosios perkelimas



Programos fragmentas PID regulatoriaus D dedamosios įjungimui/išjungimui

□ **Network 22**: Regulatoriaus D dedamosios nustatymas 0 (išjungimas)



Priedas Nr4. Adaptyvaus PID reguliatoriaus realizacijos STEP7 pakete duomenų blokai.

a)

Address	Name	Type	Initial value	Comment
0.0		STRUCT		
+0.0	FD1	REAL	5.700000e-001	0.57m3/s Minimalus duju srautas
+4.0	FD2	REAL	1.070000e+000	1.07m3/s
+8.0	FD3	REAL	1.590000e+000	1.59m3/s
+12.0	FD4	REAL	2.120000e+000	2.12m3/s
+16.0	FD5	REAL	2.650000e+000	2.65m3/s
+20.0	FD6	REAL	3.180000e+000	3.18m3/s
+24.0	FD7	REAL	3.550000e+000	3.55m3/s Maksimalus duju srautas
=28.0		END_STRUCT		

Duomenų blokas DB1

b)

Address	Name	Type	Initial value	Comment
0.0		STRUCT		
+0.0	GAIN1	REAL	2.740000e-001	Regulatoriaus P dedamoji esant duju srautui 0.57-1.07m3/s
+4.0	GAIN2	REAL	3.500000e-001	Regulatoriaus P dedamoji esant duju srautui 1.07-1.57m3/s
+8.0	GAIN3	REAL	3.900000e-001	Regulatoriaus P dedamoji esant duju srautui 1.57-2.12m3/s
+12.0	GAIN4	REAL	4.160000e-001	Regulatoriaus P dedamoji esant duju srautui 2.12-2.65m3/s
+16.0	GAIN5	REAL	4.570000e-001	Regulatoriaus P dedamoji esant duju srautui 2.65-3.18m3/s
+20.0	GAIN6	REAL	5.460000e-001	Regulatoriaus P dedamoji esant duju srautui 3.18-3.55m3/s
+24.0	TI1	REAL	5.318000e+001	Regulatoriaus I dedamoji esant duju srautui 0.57-1.07m3/s
+28.0	TI2	REAL	4.450000e+001	Regulatoriaus I dedamoji esant duju srautui 1.07-1.57m3/s
+32.0	TI3	REAL	3.810000e+001	Regulatoriaus I dedamoji esant duju srautui 1.57-2.12m3/s
+36.0	TI4	REAL	3.242000e+001	Regulatoriaus I dedamoji esant duju srautui 2.12-2.65m3/s
+40.0	TI5	REAL	3.067000e+001	Regulatoriaus I dedamoji esant duju srautui 2.12-2.65m3/s
+44.0	TI6	REAL	2.880000e+001	Regulatoriaus I dedamoji esant duju srautui 3.18-3.55m3/s
+48.0	Duju_sr	REAL	1.800000e+000	Degimui tiekimu duju srautas
+52.0	Sugedus_Gain	REAL	4.000000e-001	P jei duju srautas bus mazesnis uz min arba didesni uz max
+56.0	Sugedus_Ti	REAL	3.586000e+001	Ti jei duju srautas bus mazesnis uz min arba didesni uz max
+60.0	TD	REAL	0.000000e+000	PID regulatoriaus D dedamoji
+64.0	D_ij_isj	BOOL	FALSE	PID regulatoriaus D dedamosios isjungimas/ijungimas
=66.0		END_STRUCT		

Duomenų blokas DB2

c)

Address	Declaratio	Name	Type	Initial value	@Actual v	Actual value	Comment
166.0	stat	GAIN	REAL	2.000000e+000	0.274	2.740000e-001	proportional gain
170.0	stat	TI	REAL	4.000000e+001	53.18	5.318000e+001	reset time [s]
174.0	stat	TD	REAL	1.000000e+001	0.0	0.000000e+000	derivative time [s]

Regulatoriaus duomenų blokas (BD58) P,I,D dedamųjų fragmentas