



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

JURAS BUDRECKAS

ELEKTROS GAMYBOS PROCESSE NAUDOJAMO VANDENS
TIEKIMO VALDYMO SISTEMOS MODERNIZAVIMAS

Baigiamasis bakalauro projektas

Vadovas

Doc. dr. Vidas Raudonis

KAUNAS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

AUTOMATIKOS KATEDRA

**ELEKTROS GAMYBOS PROCESĖ NAUDOJAMO VANDENS
TIEKIMO VALDYMO SISTEMOS MODERNIZAVIMAS**

Baigiamasis bakalauro projektas

Automatika ir valdymas (612H66001)

Vadovas

Doc. dr. Vidas Raudonis

2015m. gegužėsd.

Recenzentas

Prof. D. Leviškauskas

2015m.d.

Projektą atliko

Juras Budreckas

2015m. gegužėsd.

KAUNAS, 2015

TVIRTINU:

KTU Elektros ir elektronikos fakulteto
Automatikos katedros vedėjas
Doc. Dr. Gintaras Dervinis
2015

BAKALAURO BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTIS

Išduota studentui: Jurui Budreckui Grupė *EVS-1*

1. Darbo tema:
Lietuvių kalba: Elektros gamybos procese naudojamo vandens tiekimo valdymo sistemos modernizavimas
Anglų kalba: *Modernization of the Water Supply Control System in Electricity Production Process*

Patvirtinta 2015 m. balandžio mėn. 7 d. dekanų potvarkiu Nr. ST18-F-03-1

2. Darbo tikslas: *Atlikti elektros gamybos proceso vandens tiekimo sistemos modernizacija pakeičiant esamus valdymo sprendimus į studento pasiūlytus valdymo būdus. Tikslui pasiekti studentas turi sumodeliuoti vandens tiekimo sistemą Ovation programinėje aplinkoje ir parinkti šiai sistemai reguliatorius.*

3. Reikalavimai ir sąlygos: *Bakalauro projektas turi tenkinti bakalauro projektams keliamus reikalavimus, projektas turi būti parengtas Lietuvių kalba Microsoft Office teksto redagavimo programa.*

4. Projekto struktūra. *Turinys konkretizuojamas kartu su vadovu, atsižvelgiant į BBP pobūdį, pateiktą Metodinių reikalavimų 14 ir 15 punktuose.*

Literatūros apžvalga ir analizė:
Išanalizuoti reikalavimus projektavimui sistemos susijusios su bakalauro projekto tematika, susipažinti su kaskadiniais PID reguliatoriais, išsiaiškinti jų veikimo principais ir derinimu.
Autoriaus teoriniai ir analiziniai tyrimai
Atlikti reikalingus skaičiavimus parenkant reguliatorius.
Autoriaus eksperimentiniai tyrimai
Palyginti pasirinkto reguliatoriaus valdymo kokybę su jau esančia sistemoje. Palyginimui turi būti įvertinti sistemos perreguliuojimo ir reakcijos nusistovėjimo ties užduoties signalu parametrai.

5. Ekonominė dalis. *Jei reikia ekonominio pagrindimo; turinys ir apimtis konkretizuojama darbo eigoje kartu su vadovu.*

6. Grafinė dalis. *Jei reikia, pateikiama schemas, algoritmai ir surinkimo brėžiniai; turinys ir apimtis konkretizuojama darbo eigoje kartu su vadovu.*

5. Ši užduotis yra neatskiriama bakalauro baigiamojo projekto dalis

6. Projekto pateikimo gynimui kvalifikacinėje komisijoje terminas iki 2015-05-30
(data)

Užduotį gavau: Juras Budreckas
(studento vardas, pavardė, parašas) (data)

Vadovas: Doc. Dr. Vidas Raudonis
(pareigos, vardas, pavardė, parašas) (data)



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS

(Fakultetas)

JURAS BUDRECKAS

(Studento vardas, pavardė)

AUTOMATIKA IR VALDYMAS (612H66001)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Elektros gamybos procese naudojamo vandens tiekimo valdymo sistemos modernizavimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

2015 m. Gegužės 28 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano Juro Budrecko baigiamasis projektas tema „Elektros gamybos procese naudojamo vandens tiekimo valdymo sistemos modernizavimas“ 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)

SANTRAUKA

Budreckas, J. Elektros gamybos procese naudojamo vandens tiekimo valdymo sistemos modernizavimas. Bakalauro baigiamasis darbas. Vadovas doc. dr. Vidas Raudonis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Automatikos katedra.

Kaunas, 2015. 45 psl.

Šiame darbe buvo nagrinėjama anglimi kūrenamos elektrinės tiekiamo vandens trijų PID reguliatorių pakopinė valdymo sistema. Tokios valdymo sistemos yra sudėtingos sandaros ir kelia sunkumų siekiant jas suderinti, todėl buvo nuspręsta ją supaprastinti pašalinant vieną valdymo kontūrą.

Proceso modeliui sukurti buvo panaudotas „VMware Workstation“ modeliavimo aplinka su įdiegta Ovation 3.2 DCS valdymo sistema. Sukūrus elektrinės vandens tiekimo modelį: vandens tiekimo, katilo lygio kitimo, vandens pompų ir hidraulinių movų, vožtuvų valdymo logiką bei grafiką – operatoriaus langą, buvo stebimas procesas vykstantis naudojant trijų PID reguliatorių valdymo sistemą ir derinama bei lyginama su modernizuota dviejų PID reguliatorių valdymo sistema.

Reikšminiai žodžiai: pakopinės valdymo sistemos, katilo lygio valdymo struktūros.

SUMMARY

Budreckas, J. Modernization of the water supply control system in electricity production process. Bachelor's finishing project thesis. Supervisor doc. dr. Vidas Raudonis; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Automation.

Kaunas, 2015. 45 pg.

In this work I have analysed water supply cascade control system, which was based on three PID's, for electricity production process. This kind of cascade control systems have complex structure and cause difficulties which appear while tuning systems. Due to these conditions it was decided to modernize system by removing one control loop.

I have used Ovation 3.2 DCS on "VMware Workstation" test-and-development environment for making this system model. At first, water supply control system for electricity production process was created including water supply, drum level control, pumps and fluid couplings, valves control logic and graphic interface. Then processes on three PID cascade control system was monitored and compared with modernised and tuned cascade control system, which consist of 2 PID controllers.

Keywords: cascade control systems, drum level control structures.

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Tipinis katilo lygio slėgio matavimo elementų jungimas	12
1.2 pav. Tiekiamo vandens vieno elemento valdymo funkcinė schema	19
1.3 pav. Tiekiamo vandens dviejų elementų kontrolės funkcinė schema	20
1.4 pav. Tiekiamo vandens trijų elementų kontrolės funkcinio valdymo schema	21
1.5 pav. Lygio jutiklio jungimas prie katilo	22
1.6 pav. Lygio kompensavimo algoritmo funkcinė schema	23
2.1 pav. Vandens tiekimo sistemos schema	27
2.2 pav. Operatoriaus sąsaja	28
2.3 pav. HC643VA sklendės valdymo langas	29
2.4 pav. Supaprastinta vandens tiekimo valdymo sistema naudojant 3 reguliatorius	30
2.5 pav. Senosios sistemos pereinamasis procesas pasikeitus lygio užduoties signalui	34
2.6 pav. Senosios sistemos reakcija į katilo išėjimo srauto padidėjimą	34
2.7 pav. Senosios sistemos reakcija atidarius šalto vandens sklendę	35
2.8 pav. Supaprastinta vandens tiekimo valdymo sistema naudojant 2 reguliatorius	36
2.9 pav. Vidinio reguliatoriaus reakcija į šuolinį signalą	38
2.10 pav. Išorinio kontūro reakcija į šuolinį signalą	39
3.1 pav. Derinamos sistemos pereinamasis procesas pakitus lygio užduoties signalui	40
3.2 pav. Suderintos sistemos pereinamasis procesas pasikeitus lygio užduoties signalui	41
3.3 pav. Suderintos sistemos reakcija į katilo išėjimo srauto padidėjimą	42
3.4. pav. Suderintos sistemos reakcija atidarius šalto vandens sklendę	43

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Tipinių kontrolės sistemų santrauka	18
1.2 lentelė. PID parametų įtaka pereinamajam procesui, kai parametrai didinami	24
2.1 lentelė. PID parametrai naudoti MAX1000 sistemoje	31
2.2 lentelė. Perskaičiuoti PID parametrai į Ovation sistemą	33
2.3 lentelė. Cohen-Coon parametų skaičiavimo lentelė	37
3.1 lentelė. Reguliavimo metodų rezultatai	43

TURINYS

SANTRUMPŲ ŽODYNAS	9
ĮVADAS.....	10
1 LITERATŪROS APŽVALGA	11
1.1 Minimalūs projektavimo reikalavimai vandens tiekimo kontrolės sistemai.	11
1.2 Vandens tiekimo kontrolės prietaisų įrengimas	11
1.3 Kontrolės ir logikos reikalavimai	13
1.4 Reikalavimai valdymo įtaisams	15
1.5 Sistemos patikimumas ir prieinamumas.....	15
1.6 Minimalios signalizacijos reikalavimai.....	16
1.7 Operatoriaus sąsaja.....	16
1.8 Projektinėje specifikacijoje nurodyti reikalavimai.	17
1.9 Trijų elementų valdymui būtini ir panaudoti Ovation DCS sistemos algoritmai	21
1.10 PID reguliatoriai.....	24
1.11 Pakopinės valdymo sistemos.....	25
2 MODERNIZUOJAMAS OBJEKTAS	27
2.1 Modeliavimo aplinka.....	28
2.2 Senoji sistema.....	29
2.3 Naujoji sistema.....	35
2.4 Sistemos derinimas Cohen-Coon būdu:	36
3 SUDERINTOS SISTEMOS ANALIZĖ	40
4 REZULTATAI IR IŠVADOS.....	44
5 LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	45
PRIEDAI.....	46
1 PRIEDAS. Vandens tiekimo sistemos schema	47
2 PRIEDAS. Vandens valdymo sistema. Operatoriaus sąsaja	48

SANTRUMPŲ ŽODYNAS

DCS	(angl. Distributed control system)	Paskirstyta valdymo sistema
M/A	(angl. Mastation)	Valdymo stotis
LT	(angl. Level)	Lygio matavimas
PT	(angl. Pressure)	Slėgio matavimas
FT	(angl. Flow)	Srauto matavimas
TE	(angl. Temperature)	Temperatūros matavimas
SAMA	(angl. Electromagnetic susceptibility of process control instrumentation, scientific apparatus makers associations)	Technologinių procesų valdymo įrangos elektromagnetinio jautrumo, mokslinių įrenginių kūrimo asociacijos
PMC		
C-C	Cohen-Coon	Cohen Coon derinimo metodas
PID	(angl. Proportional-Integral-Derivative controller)	Proporcinis-integralinis-diferencialinis reguliatorius
CCTV	(angl. Closed circuit television)	Uždara stebėjimo sistema
SRC	(angl. Selective catalytic reduction)	Atrankinė katalizinė redukcija
MAX1000	Video Management System	Vaizdo valdymo sistema
QAD	(angl. Quarter amplitude damping)	Ketvirčio amplitudės slopinimas
PAA	(ital. Pompa Acqua Alimento)	Vandens tiekimo pompa

ĮVADAS

Šiais mokslo ir technologijų laikais kuriama vis daugiau ir daugiau naujų įrenginių naudojančių elektros energiją. Savaimė suprantama, kad dėl to didėja elektros energijos poreikis. Remiantis pasaulinės energijos agentūros duomenimis [1] anglies deginimo elektrinės pagamina 29% visos pasaulinės energijos, šalyse turinčiuose daug iškastinio kuro, tokiose kaip Kinija ir JAV, šis skaičius atitinkamai siekia 69% 2011 metais ir 39,1% 2014 metais.

Iškastinio kuro deginimas dažnai siejamas su aplinkos tarša ir klimato kaita, kadangi degimo metu susidaro įvairios dujinės, skystos ir kietosios medžiagos, per jėgainių kaminus patenkančios į atmosferą. Pavojingiausi energetikos pramonės teršalai yra CO₂ kietos dalelės, angliavandeniliai, azoto ir sieros oksidai. Dėl šios priežasties vis dažniau griežtinami reikalavimai energetikai tiek aplinkosaugos atžvilgiu, tiek saugumo. Norint atitikti visus reikalavimus tenka modernizuoti elektrines, jų valdymo ir apsaugos sistemas.

Šiame bakalauro baigiamajame darbe buvo apžvelgtas ir išnagrinėtas anglies deginimo elektrinės *Fusina*, esančios Italijoje, vandens tiekimo valdymo sistemos veikimo principas jos trūkumai. Šios jėgainės modernizavimo metu yra modifikuojama vienos iš didžiausių Italijos elektrinių trečiojo bloko valdymo sistema. Senoji patariamoji sistema yra keičiama modernia DCS - paskirstytos kontrolės sistema. Modernizuojamo bloko galia siekia 320MW, o kontrolės sistema sudaro apie 8000 įvesties ir išvesties signalų. Taip pat yra keičiama valdymo filosofija, modernizuojant senąją programinę struktūrą, kuri nebenaudojama dėl įsigaliojusių reikalavimų, nauja, atitinkančia tiek užsakovo, tiek saugumo keliamus reikalavimus.

Šiame darbe apžvelgiami elektrinės projektavimo reikalavimai vandens tiekimo valdymo įrenginiams, sistemai bei matavimo įtaisams, taip pat kaskadinės valdymo sistemos ir regulatoriai. Nagrinėjama trijų PID regulatorių pakopinė valdymo sistema, parenkami parametrai dviejų PID kaskadinei valdymo sistemai bei nagrinėjami pereinamieji procesai abiem atvejais.

Galimi pritaikymo būdai: bet koks elektrinės saugumo ir/arba našumo padidinimas gali būti pritaikytas kitose tokio tipo elektrinėse tiesiogiai arba remiantis šia patirtimi.

1 LITERATŪROS APŽVALGA

Siekiant sukurti modelį atitinkantį realų procesą, kad būtų galima gautus rezultatus ir išvadas taikyti realiai vandens tiekimo sistemai, pirmiausia reikia apžvelgti tam tikrus reikalavimus. Šiame darbe buvo įvertinti vandens tiekimo projektavimo reikalavimai įrenginiams, vandens tiekimo ir katilo lygio palaikymo valdymo sistemai, matavimo įtaisams, apsaugos logikai. Taip pat modelis buvo kuriamas atsižvelgiant į keliamus funkcinis reikalavimus iškastinį kurą deginančioms elektrinėms remiantis Amerikos nacionaliniais standartais [5,6]. Šiame skyriuje taip pat bus apžvelgtos pakopinės valdymo sistemos, kurios naudojamos projekte ir galimi katilo lygio valdymo tipai.

1.1 Minimalūs projektavimo reikalavimai vandens tiekimo kontrolės sistemai.

Valdymo sistema turi atitikti eksploatacijos reikalavimus ir turėti tinkamą sąsają su procesu. Kad pasiekti šiuos tikslus, tokie minimalūs reikalavimai yra apibrėžti sistemos projektavimui:

- a) Technologinių procesų matavimo reikalavimai
- b) Kontrolės ir logikos reikalavimai
- c) Reikalavimai valdymo įtaisams
- d) Sistemos patikimumo ir prieinamumo reikalavimai
- e) Avarinių signalų reikalavimai
- f) Operatoriaus sąsajos reikalavimai

1.2 Vandens tiekimo kontrolės prietaisų įrengimas

Prietaisai turi būti įrengti kaip įmanoma arčiau matuojamų objektų, atkreipiant dėmesį į galimas dideles vibracijas, temperatūros įtaką ir galimybes atlikti periodinę techninę priežiūrą.

Atskiri izoliuoti vožtuvai, pastovios temperatūros kamera (kai naudojama), ir impulso linijos turi būti numatyti kiekvienam įtaisui (1.1 pav.).

Katilo lygio matavimas

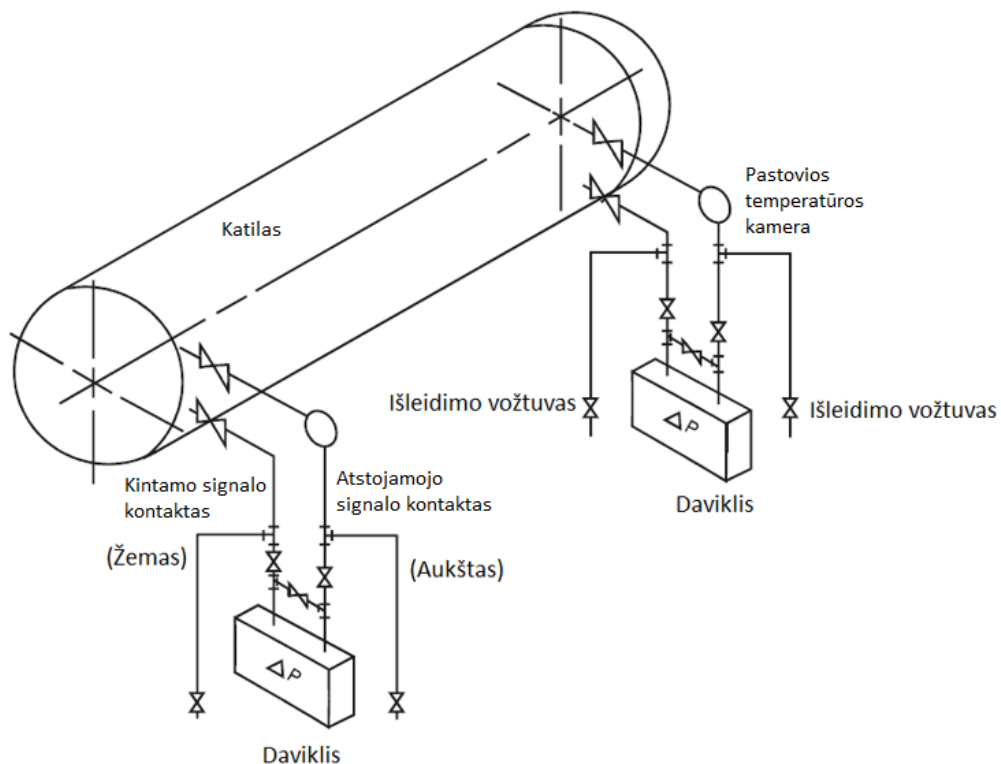
Katilo lygio signalas gali būti reikalingas vieno elemento, dviejų elementų ir trijų elementų vandens tiekimo valdymo sistemoms (žr. 1.2, 1.3 ir 1.4 paveikslus). Jei prietaisai, naudojami matuoti katilo lygį yra jautrūs tankio kitimui, tada turi būti įdiegtas tankio kompensavimas.

Garų srauto matavimas

Garų srauto masės signalas reikalingas dviejų elementų ir trijų elementų vandens tiekimo kontrolės sistemoms. Jei yra naudojami tūriniai garų srauto matavimo metodai, tuomet matuojamas (indikuojamas) srautas turi būti kompensuojamas tekančiam garų srauto tankiui, tam kad nustatyti tikrąjį garų masės srautą.

Grįžtamojo vandens srauto matavimas

Tiekiamo vandens masės srauto signalas reikalingas trijų elementų vandens maitinimo kontrolės sistemai. Kai yra naudojamas tūrinis tiekiamo vandens srauto matavimo būdas ir matuojamo tiekiamo vandens srauto temperatūra svyruoja $\sim 37,8$ °C, pamatuotas (indikuotas) srautas turi būti kompensuojamas tiekiamo vandens tankiui, tam kad nustatyti tikrąjį tiekiamo vandens srauto masę.



1.1 pav. Tipinis katilo lygio slėgio matavimo elementų jungimas

1.3 Kontrolės ir logikos reikalavimai

Tiekiamo vandens kontrolės sistemos funkcija yra išlaikyti katilo vandens lygį katilo gamintojo nustatytose ribose. Tiekiamo vandens srautas į katilą yra kontroliuojamas keičiant į katilą vandenį tiekiančių siurblių greitį ir / arba reguliuojant vožtuvo (-ų) padėtį. Tiekiamo vandens kontrolė gali būti pasiekta naudojant šias valdymo strategijas [4]:

- a) Vieno elemento kontrolė
- b) Dviejų elementų kontrolė
- c) Trijų elementų kontrolė

Vieno elemento tiekiamo vandens srauto valdymas

Vieno elemento kontrolė (žr. 1.2 pav.) yra minimali tiekiamo vandens srauto valdymo sistema ir turėtų būti naudojama šiems tikslams:

- a) Paleidimo metu ar esant mažai apkrovai, kai srauto matavimai paprastai nėra tikslūs.
- b) Jeigu garo srauto kitimas yra minimalus ir tiekiamo vandens slėgis iš esmės yra pastovus.

Dviejų elementų tiekiamo vandens srauto valdymas

Dviejų elementų kontrolė (žr. 1.3 pav.) yra minimalus tiekiamo vandens valdymas taikomas kintamam garo srautui ir nerekomenduojama naujose sistemose.

Trijų elementų tiekiamo vandens srauto valdymas

Trijų elementų kontrolė (žr. 1.4 pav.) turėtų būti naudojama naujoms sistemoms atsižvelgiant į kintamą garo srautą ir / arba kintamą tiekiamo vandens slėgį srauto valdymo vožtuvo įsiurbimo angoje.

Tiekiamo vandens apsaugos logika

Apsaugos logikos signalų reikalavimai turėtų būti tie, kurie nustatyti specifinės įrangos gamintojų. Apsauginės logikos signalai, stebintys paduodamą kurą į katilą gali apimti aukštą ir žemą katilo lygį.

Sekančios sąlygos formuoja reikalavimus signalui, kuris gali būti naudojamas kitose kontrolės sistemose numatytose pagal SP77 serijos apibrėžtus standartus:

- a) Katilą maitinančių siurblių signalo nutrūkimas, dingimas

- b) Tiekiamo vandens sistemos didžiausios leistinos pajėgumo ribos viršijimas
- c) Aukštas katilo lygis
- d) Žemas katilo lygis

Tiekiamo vandens srauto kontrolė

Tiekiamo vandens srautas turėtų būti kontroliuojamas, keičiant katilą maitinančių siurblių greitį ir / arba keičiant tiekiamo vandens vožtuvų padėtį.

Kintamo greičio vandens tiekimo siurblio (-ių) valdymas

Kai tiekiamo vandens srautas yra kontroliuojamas naudojant hidraulinę movą, kintamo greičio variklį, arba turbinos varomą kintamo greičio siurblių, turi būti pritaikyti šie aspektai:

- a) Automatinio režimo metu, srauto reguliatoriaus išėjimas turi turėti reguliuojamą minimalią ribą. Ši apatinė riba turėtų būti nustatyta išlaikant minimalų siurblio srautą, nurodyta siurblio gamintojo specifikacijoje. Srauto reguliatoriaus išėjimas yra greičio užduotis (pozicijos užduotis hidraulinei movai), ir apatinė riba bus siurblio greičio užduotis apatinei ribai.
- b) Naudojant srauto reguliatorius su greičio reguliatoriais, srauto reguliatorius nustato srauto siurblio užduotį. Greičio reguliatorius turi veikti pakopinėje konfigūracijoje siekiant palaikyti tiesinį siurblio kuriamą srautą.

Valdymo vožtuvo padėties kontrolė

Kai tiekiamo vandens srautas reguliuojamas keičiant srauto valdymo vožtuvo padėtį, gali būti naudojami vienas arba keli tiekiamo vandens valdymo vožtuvai (-ai). Vožtuvo konfigūracijos pasirinkimas turėtų būti pagrįstas atsižvelgiant į slėgio kritimą vožtuve, galimas ribas, kavitaciją, ir vožtuvo susidėvėjimą kai vožtuvas beveik uždarytas mažos apkrovos veikimo metu. Jei keli vožtuvai naudojami, kontrolės sistema turi numatyti sklandų perėjimą per kiekvieną papildomą vertę, tiek kai srautas didėja, tiek kai mažėja.

Siekiant sumažinti pagrindinių valdymo vožtuvų susidėvėjimą ir pagerinti valdymą, valdymo sistema turi būti sukonfigūruota taip, kad būtų uždaromi paleidimo vožtuvai (-ai) kai pagrindinis (-iai) srauto valdymo vožtuvas (-ai) perima apkrovą.

Į katilų vandenį tiekiančių siurblių minimalus srautas

Minimali srauto recirkuliacija yra reikalinga siurblio apsaugai remiantis gamintojo reikalavimais. Valdymas gali būti moduluojamas arba atidaromas / uždaromas, ir numatomas nuotoliniu valdikliu arba naudojantis autonominiiais automatiniiais reguliavimo vožtuvais. Kaip minimalus projekto reikalavimas, atskiros srauto kontrolės sistemos, sudarytos iš srauto elementų, siūstuvų, ir / arba jungiklių turi būti įdiegtos kiekvienam katilų maitinančiam siurbliui.

Kai srauto jungikliai yra naudojami, turi būti numatomos reguliuojamos nejautrumo zonos. Jeigu operatoriaus rankinio valdymo stotis naudojama, nustatant kontrolę į „rankinę“, vožtuvai visada turi būti atidarami.

Kai gamintojas numato reikalingą minimalus srauto recirkuliaciją aukšto slėgio stiprinimui (*booster*), jis turėtų būti numatomas naudojant tuos pačius kriterijus kaip ir pagrindiniam recirkuliacijos srautui, bet su individualiu srauto matavimo įtaisu.

1.4 Reikalavimai valdymo įtaisams

Visi valdymo įtaisai turi būti suprojektuoti taip, kad saugiai sustotų dingus užduoties signalui ar varomajai jėgai t.y. atsidaryti, užsidaryti, ar užsifikuoti tam tikroje padėtyje. Saugaus gedimo padėtis turi būti nustatoma pagal konkretų taikymą. Minimalaus srauto recirkuliacijos vožtuvas (-ai) turi atsidaryti bet kokio srauto kontrolės sistemos gedimo atveju.

1.5 Sistemos patikimumas ir prieinamumas

Siekiant nustatyti minimalius valdymo kriterijus, vandens tiekimo kontrolės sistemos specifikacija projektavimo stadijoje turi apimti šiuos aspektus:

- a) Maksimali bloko apkrova / garų talpa
- b) Apkrovimų ribos veikiant normaliu režimu
- c) Numanomi apkrovos pokyčiai (perėjimai)
- d) Paleidimo ir išjungimo dažnumas
- e) Automatizavimo laipsnis
- f) Katilų maitinančių siurblių didžiausias ir mažiausias pajėgumas

Visi valdymo davikliai turi būti dubliuojami. Šie reikalavimai taikomi dubliuojant jutiklius:

- a) Kai veikia du jutikliai, pernelyg didelis nuokrypis tarp jų laikomas pavojumi arba aliarmu ir atitinkamas valdymo mazgas turi būti perjungiamas į rankinį režimą.
- b) Jeigu tris jutikliai veikia, pernelyg didelis nuokrypis tarp perduodamų signalų turi būti signalizuojamas. Jutiklių parinkimo schema turi būti naudojama kontrolės tikslais.

1.6 Minimalios signalizacijos reikalavimai

Minimalūs signalizacijos reikalavimai apima:

- a) Aukštą ir žemą katilo lygį;
- b) Valdymo galios praradimą;
- c) Valdymo įtaiso galios praradimą;
- d) Valdymo mazgo persijungimą į rankinį valdymą;
- e) Tiekiamo vandens srauto / sistemos srauto nuokrypas (trijų elementų kontrolė)
- f) Valdymo jutiklių signalų praradimą.

1.7 Operatoriaus sąsaja

Kai operatoriaus sąsaja naudojama tiekiamo vandens kontrolės sistemoje, operatoriui turi būti prieinama ši informacija:

- a) Katilo lygis
- b) Katile esantis slėgis
- c) Tiekiamo vandens srautas
- d) Tiekiamo vandens temperatūra
- e) Iš katilo išeinančio garo srautas
- f) Iš katilo išeinančio garo temperatūra
- g) Visi aliarmai ir suveikusios signalizacijos
- h) Rankinio / automatinio valdymo būseną
- i) Pagrindinio srauto slėgis (kur įmanoma)

Informacija, kuri papildomai turėtų būti prieinama operatoriui:

- a) Valdymo įtaisų padėtys
- b) Vožtuvų padėtys
- c) Siurblio greitis
- d) Vieno ar trijų elementų kontrolės statusas
- e) Kiekvieno vandenį tiekiančio siurblio srautas
- f) Užduoties signalas katilo lygiui

1.8 Projektinėje specifikacijoje nurodyti reikalavimai.

Norėdami tinkamai nurodyti tiekiamo vandens kontrolės strategiją, šie keturi pagrindiniai klausimai turi būti išspręsti:

- a) Kokie yra numatomi proceso eksploataciniai reikalavimai; pvz. pusiausvyrinės arba ciklinės operacijos, keitimosi dažniai, ir t.t.?
- b) Kokia įranga ir veiklos parametrai yra reikalingi, tam kad tinkamai susieti valdymo sistemą?
- c) Kokie yra pageidaujami veiklos kriterijai kontrolės sistemai?
- d) Kokias charakteristikas valdymo sistema turi turėti, kad pasiekti ir palaikyti norimam sistemos našumui?

Šių klausimų atsakymų apimtis tiesiogiai lemia, kaip gerai kontrolės sistema atitiks projektavimo ir eksploataavimo reikalavimus. Klaidingi atsakymai gali įtakoti prastą darbo našumą ir gali sukelti katilo ar turbinos avariją, ar netgi abu. Sekantys poskyriai yra skirti tam, kad taip pat susipažinti ir įgauti papildomų žinių apie keliamus projektavimo reikalavimus tiekėjams, projektuotojams, konstruktoriams ir vartotojams.

Proceso veiklos reikalavimų santrauka

Svarbus veiksnys, kurį reikia apsvarstyti parenkant valdymo sistemą yra numatomas katilo naudojimas. Kadangi katilo darbo reikalavimai nustato reikalingas valdymo sistemos galimybes, projektavimo specifikacijos turi apimti šias bloko charakteristikas:

- a) Bloko apkrovas / garų talpa
- b) Normalus darbinis apkrovos diapazonas
- c) Numanomi apkrovos pokyčiai (šuoliai)

d) Paleidimo ir išjungimo dažniai

e) Automatizavimo laipsnis

Pilnas numatomų apkrovos charakteristikų aprašymas leis inžinieriui tinkamai įvertinti sistemą ir pasiūlyti kontrolės strategiją. Kai kontrolės strategija yra pasirinkta iš anksto, šios charakteristikos vis tiek turėtų būti apibrėžtos kaip pamatas projektavimui.

1.1 lentelėje palyginamos tipinės naudojamos kontrolės sistemų kūrimo specifikacijos ir vertinimas. Ši lentelė neįtraukia visų skirtumų, tai dažniausiai naudojamų kontrolės strategijų santrauka. Svarbi išvada, kurią galima padaryti iš lentelės duomenų, kad visos kontrolės sistemos yra skirtingos, ir todėl, pasirenkant konkrečią sistemą, reikia atidžiai apsvarstyti projektavimo parametrus [5].

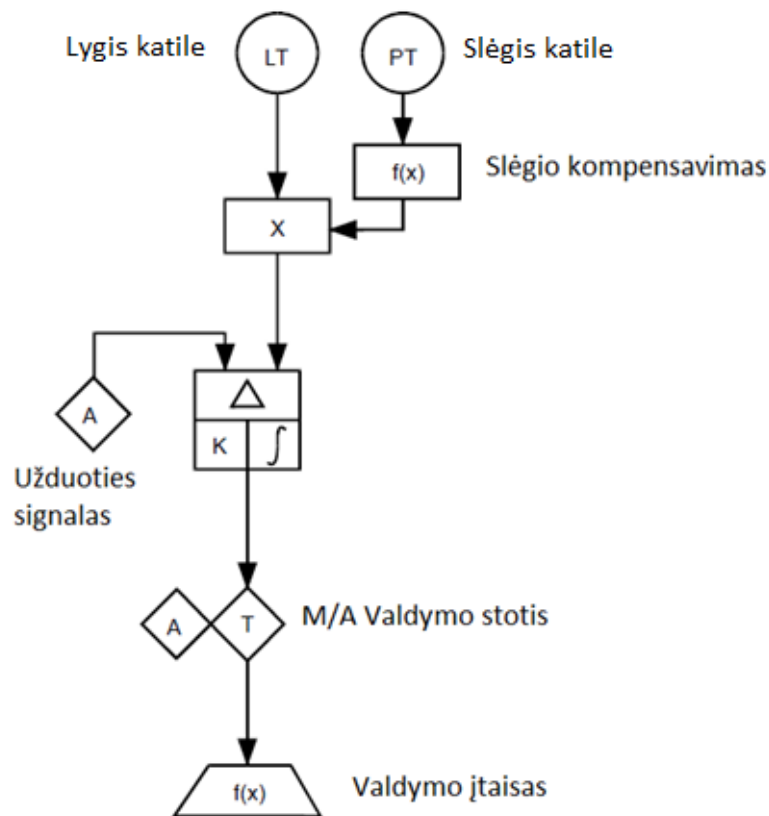
1.1 lentelė. Tipinių kontrolės sistemų santrauka

	Valdymo tipas		
	Vieno elemento	Dviejų elementų	Trijų elementų
Sąlyga, kada rekomenduojama naudoti	Mažas garo srauto pokytis	Pastovus tiekiamo vandens slėgis	Tiekiamo vandens srauto / garo signalas prieinamas
Veikimas esant pastoviai būsenai	Geras	Geras	Geras
Veikimas esant pereinamai būsenai	Prastas	Geras	Geras
Atsakas į apkrovos pokyčius	Lėtas	Greitas	Greitas
Valdymo atsako tipas	Vieno elemento grįžtamasis ryšys	Dviejų elementų be grįžtamojo ryšio ir su grįžtamoju ryšiu	Trijų Elementų be grįžtamojo ryšio ir su grįžtamoju ryšiu
Katilo susitraukimo ir plėtimosi kompensavimas	Nėra	Dalinis	Veiksmingas
Srauto disbalanso tikimybė apkrovos pokyčių metu	Tikėtinas	Priklausomai nuo valdymo įtaiso tiesiškumo ir pasikartojimo dažnio apkrovos diapazone	Minimali tikimybė

Remiantis P. Albertos ir A. Sala pateiktais aprašymais [4] bei Amerikos nacionalinio standarto formuluotėmis ir reikalavimais [5,6] ir atlikus tos medžiagos santrauką, katilo lygio valdymo strategijas galima aprašyti sekančiai:

Vieno elemento kontrolė (žr. 1.2 pav.)

Vieno elemento kontrolė reikalauja katilo lygio signalo su slėgio kompensavimu (jei priemonės, naudojamos išmatuoti katilo lygį yra jautrios tankio kitimui) ir pageidaujamo užduoties signalo. Proporciniai plus integralinio pobūdžio valdikliai išlaiko lygį siūsdami signalą į galutinį valdymo įtaisą. Vieno elemento kontrolė iškastiniu kuru kūrenamuose katiluose turėtų būti naudojama paleidimo metu prieš garo srautui pradedant daryti įtaką procesui. Vieno elemento kontrolė yra minimali tiekiamo vandens kontrolės sistema ir yra taikoma, ten kur garo srautas yra pastovus arba vyrauja mažos apkrovos, kai garo srauto matavimai nėra galimi arba yra netikslūs. Kai vieno elemento valdymas naudojamas kartu su dviejų ar trijų elementų kontrole, režimas gali būti automatiškai parenkamas arba parinktas operatoriaus.

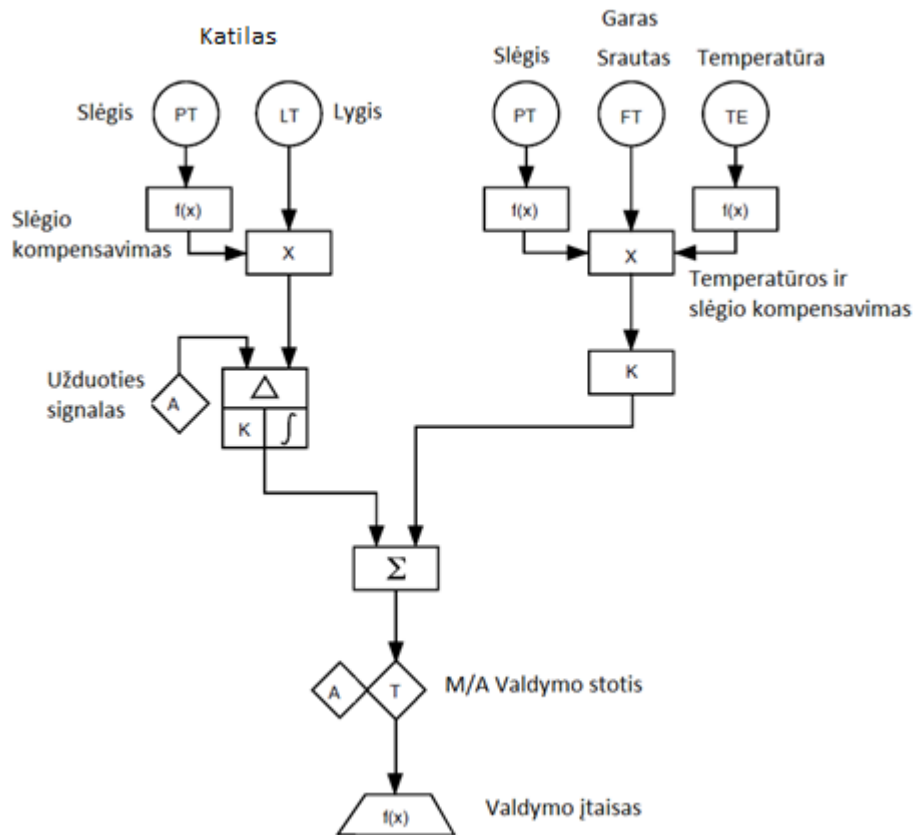


1.2 pav. Tiekiamo vandens vieno elemento valdymo funkcinė schema (funkcinė valdymo schema naudojant SAMA PMC 22.1-1981 formatą)

Dviejų elementų kontrolė (žr. 1.3 pav.)

Dviejų elementų vandens tiekimo kontrolė reikalauja katilo lygio signalo su kompensuojamu slėgiu, jeigu jautriai naudojami išmatuoti katilo lygį yra jautrūs tankio pokyčiui ir norimo lygio užduoties signalo, kartu su garo srautu be grįžtamojo ryšio ir su temperatūros kompensavimo signalu.

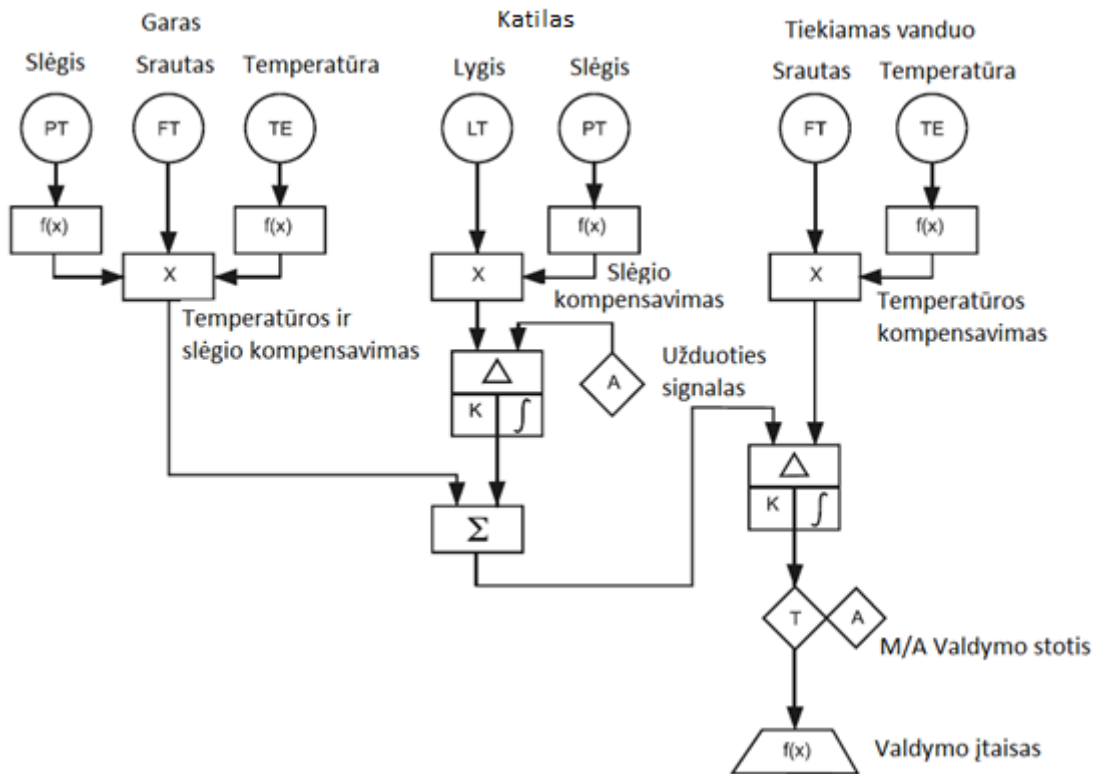
Proporcinio plus integruojančio lygio valdiklio paklaida yra sumuojami su garo srauto signalu, tam kad nustatyti užduotį galutiniam valdančiam elementui.



1.3 pav. Tiekiamo vandens dviejų elementų kontrolės funkcinė schema (funkcinis valdymo schema naudojant SAMA PMC 22.1-1981 formatą)

Trijų elementų kontrolė (žr. 1.4 pav.)

Trijų elementų vandens tiekimo kontrolė reikalauja katilo lygio signalo su slėgio kompensavimu (jei jautikliai, naudojami išmatuoti katilo lygį yra jautrūs tankio pokyčiui), norimo lygio užduoties signalo vertės, garo srauto jutiklio su temperatūros kompensavimu signalo ir signalo iš tiekiamo vandens srautą indikuojančio jutiklio. Tiekiamo vandens srauto daviklis turi būti su temperatūros kompensavimu jei matavimas įtakojamas tiekiamo vandens temperatūros. Trijų elementų kontrolė turi sulyginti tiekiamo vandens srautą su iš katilo išeinančiu garo srautu ir naudoti lygio pokytį kaip atskaitos tašką, tam kad sugrąžinti reikiamo vandens kiekio pusiausvyrą. Tiekiamo vandens poreikis turi būti gaunamas iš katilo lygio ir paklaidos tarp tiekiamo vandens ir garo srauto. Taip pat turėtų būti apsvarstytas vandens purškimo srauto įtraukimas į bendrą tiekiamo vandens srauto matavimą, kuomet purškimas nutraukiamas prieš paleidžiant pagrindinį tiekiamo vandens srautą.



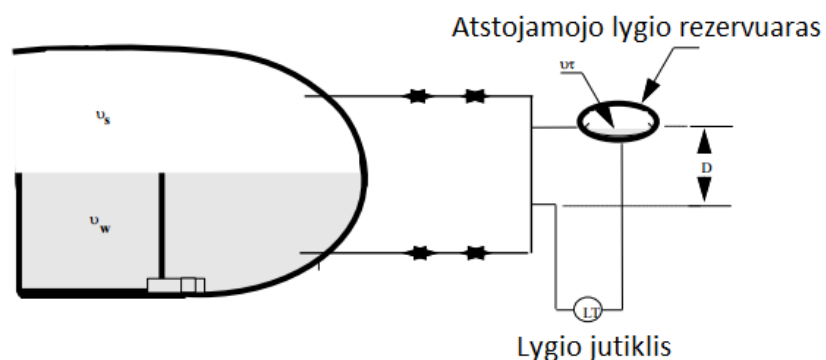
1.4 pav. Tiekiamo vandens trijų elementų kontrolės funkcinio valdymo schema (funkcinis valdymo schema naudojant SAMA PMC 22.1-1981 formatą)

1.9 Trijų elementų valdymui būtini ir panaudoti Ovation DCS sistemos algoritmai

Naudojant trijų elementų kontrolę vandens tiekimui ir siekiant, kad modelis atitiktų realų procesą buvo panaudoti Ovation DCS valdymo sistemos lygio, srauto, temperatūros kompensavimo algoritmai. Šie algoritmai trumpai aptarti šiame skyriuje remiantis Ovation DCS vartotojo instrukcijomis [3].

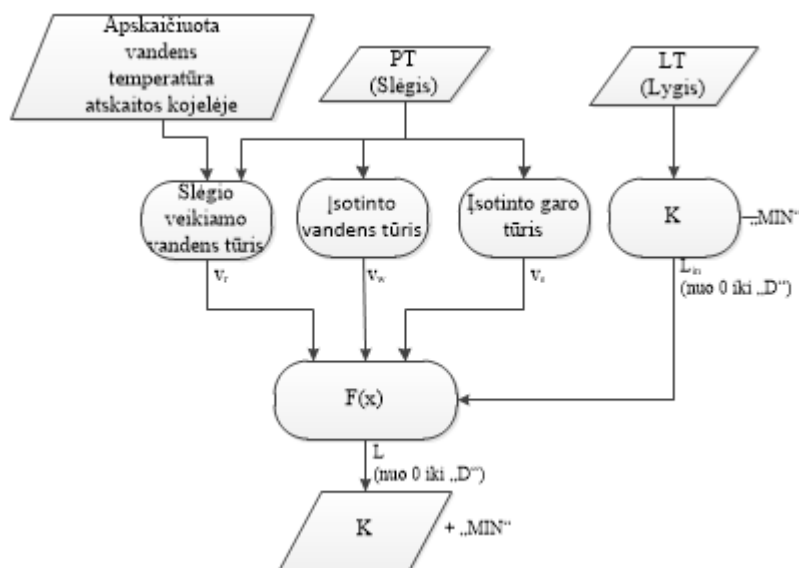
Lygio kompensavimas

Lygio kompensavimo algoritmas apskaičiuoja vandens lygį su tankio kompensavimu suslėgto garo katile. Ši kompensacija paremta prielaida, kad skirtuminio slėgio jutiklis įterpia naują lygio signalą. Viena jutiklio dalis yra prijungta prie kondensato rezervuaro, kuris atstoja maksimalų rekomenduojamą vandens lygį. Kita jutiklio kojelė yra prijungta prie taško, kuris apibrėžia minimalų vandens lygį. Atstumas tarp šių taškų yra jutiklio matavimo diapazonas "D" (žr. 1.5 pav.)



1.5 pav. Lygio jutiklio jungimas prie katilo

Garas ir vanduo esantys katilo viduje yra išotinio sąlygomis. Vanduo esantis kondensato rezervuare yra veikiamas slėgio. Lygio kompensavimo algoritmas naudoja garų esančių katile tūrį (μ_s), vandens katile tūrį (μ_w) ir vandens tūrį iš atskaitos kojos (μ_r), ir vandens tūrio reikšmę kalibravimui (μ_{cal}) reikalingą apskaičiuoti kompensuojamą lygį. Lygio kompensavimo algoritmas atlieka skaičiavimus ir duomenis surašo į lentelę ir gauna μ_s , μ_w ir μ_r vertes pagal slėgio ir temperatūros įėjimo signalus. μ_r išvedimas reikalauja, kad būtų įvertinama vidutinė kondensato temperatūra. Temperatūra gali būti kintamas signalas arba įvesta į algoritmo nustatymus kaip pastovus derinimo parametras (konstanta). Kalibruojamo skysčio tūris (μ_{cal}) yra apskaičiuota vertė įvesta kaip derinimo parametras. Katilo lygio kompensavimo algoritmo funkcinė schema pateikta 1.6 pav.



1.6 pav. Lygio kompensavimo algoritmo funkcinė schema

Čia: K – stiprinimas, $F(x)$ – 1 lygtis.

$$L = \frac{L_{in} D \left(1 - \frac{v_{cal}}{v_r} + \frac{v_{cal}}{v_s}\right)}{\left(\frac{v_{cal}}{v_w} + \frac{v_{cal}}{v_s}\right)} \quad (1)$$

Katilo lygio įėjimas paprastas svyruoja nuo neigiamos, reiškiančios minimalią lygio vertę, iki teigiamos maksimalios +500 mmH₂O, o 0 mmH₂O laikomas normaliu vandens lygiu. Minimali ir maksimali vertės nėra naudojamos kompensavimo skaičiavimuose. Algoritmo išėjimo diapazonas yra toks pat kaip ir įėjimo.

Dujų slėgio ir temperatūros kompensavimas

GASFLOW algoritmas apskaičiuoja slėgio ir temperatūros kompensuojamą masę arba tūrinį srautą idealioms dujoms. Šie skaičiavimai atliekami remiantis 1 formule, o tūrinis srautas apskaičiuojamas pagal 2 formulę.

$$OUT = K \times \sqrt{PDIF \times \frac{PACT + ABSPRES}{PREF + ABSPRES} \times \frac{TREF + ABSTEMP}{TACT + ABSTEMP}} \quad (2)$$

$$OUT = K \times \sqrt{PDIF \times \frac{PREF + ABSPRES}{PACT + ABSPRES} \times \frac{TACT + ABSTEMP}{TREF + ABSTEMP}} \quad (3)$$

Čia: OUT – išėjimas, K – stiprinimas, PDIF, ABSPRES ir ABSTEMP – vidiniai algoritmo parametrai, PACT – realus slėgis, PREF – atstojamasis slėgis, TREF – atstojamoji temperatūra, TACT – reali temperatūra.

Yra galimybė išjungti slėgio kompensaciją ar temperatūros kompensaciją. Kad nepaisyti slėgio kompensacijos, reikia kaip atstojamąją nurodyti neigiamą (*PRES*) vertę. Kad nepaisyti temperatūros kompensacijos, reikia kaip atstojamąją nurodyti neigiamą temperatūros (*TEMP*) vertę.

1.10 PID reguliatoriai

PID reguliatorius – tai reguliatorius, kuris turi grįžtamąjį ryšį. Jis yra naudojamas pramoninėse valdymo sistemose. Reguliatorių sudaro 3 grandys ir kiekvienai grandžiai reikia parinkti parametrus. Šios grandys įvardijamos kaip proporcinė (P), integruojanti (I) ir diferencijuojanti (D). Tolydinio PID reguliatoriaus išraiška pateikta 4 formulėje.

$$U(t) = K(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d(\tau) + T_D \frac{de(t)}{dt}) \quad (4)$$

Čia K – perdavimo koeficientas, T_I – integruojančios grandies laiko pastovioji, T_D – diferencijuojančios grandies laiko pastovioji, e – paklaida ($e=SP-PV$), t – laikas arba momentinis laikas, τ – integravimo kintamasis.

Parametrų įtaka pereinamajam procesui nurodyti 1.2 lentelėje.

1.2 lentelė. PID parametrų įtaka pereinamajam procesui, kai parametrai didinami.

Parametras	Augimo trukmė	Perreguliavimas	Pereinamojo proceso trukmė	Statinė paklaida	Stabilumas
K	Sumažėja	Padidėja	Maža įtaka	Sumažėja	Blogina
T_I	Sumažėja	Padidėja	Padidėja	Eliminuoja	Blogina
T_D	Maža įtaka	Sumažėja	Sumažėja	Teoriškai nedaro įtakos	Padidina jei T_D mažas

Anksčiau buvo naudojami elektroniniai analoginiai valdikliai, kurie gali būti pagaminti iš operacinio stiprintuvo, kondensatoriaus ir rezistoriaus. Elektroniniai analoginiai PID reguliatorių kontūrai dažniausiai yra dalis daug sudėtingesnių elektroninių sistemų, pavyzdžiui, kompaktinio disko lazerio galvutės pozicionavimo, seismografo judėsio indikavimo sistemos. Šiuo metu elektroniniai valdikliai dažniausiai yra pakeičiami skaitmeniniais reguliatoriais naudojamais kartu su mikrovaldikliais.

Dauguma šiuolaikinių PID reguliatorių pramonėje yra įgyvendinami kartu su programuojamais loginiais valdikliais (PLV) arba įmontuojami skyde kaip skaitmeniniai valdikliai. Programinės įrangos diegimas turi tam tikrų privalumų, tokių kaip santykinai mažesnė kaina ir galimybė lanksčiau panaudoti reguliatorių, atsižvelgiant į tai, kur PID algoritmas naudojamas. PID temperatūros reguliatoriai naudojami pramoninėse krosnyse, karšto štam pavimo įrenginiuose ir pakavimo pramonėje bei daugelyje kitų sričių.

1.11 Pakopinės valdymo sistemos

Pakopinė valdymo sistema tai tokia sistema, kai pirminiame valdymo kontūre yra dar vienas ar keli kiti kontūrai su atskirais valdikliais. Paprastai pirminiame mazge yra vienas, tačiau gali būti du ar net tris vidiniai kontūrai. Pirmas kontūras esantis išorinio kontūro viduje vadinamas antriniu arba vidiniu, o šiame kontūre esantis valdiklis – antriniu reguliatoriumi (arba pavaldžiu - *slave*). Išorinis kontūras vadinamas pagrindiniu arba pirminiu, ir valdiklis kuris yra valdomas yra vadinamas pagrindiniu valdikliu (arba valdančiu kontrolieriu). Pirminio reguliatoriaus apskaičiuotas valdymo signalas yra antrinio reguliatoriaus užduoties signalas, o pastarojo išėjimas sekančio valdiklio užduoties signalas ir t.t.

Daugeliu atveju vidinio kontūro tikslas yra greita reakcija ir trikdžių kompensavimas, o jo įtaka pirminio reguliatoriaus išėjimui yra maža. Antrasis PID reguliatorius turi sumažinti arba kompensuoti bet kokius svyravimus atsirandančius vandens tiekime. Pirminis PID reguliatorius palaiko lygi katilė ir yra derinamas atsižvelgiant į lygio kitimą katilė, šis procesas paprastai yra lėtesnis. Pakopinės sistemos nauda yra ta, kad bet kokie tiekiamo vandens srauto svyravimai gali būti išlyginti vidinio (greitojo) kontūro (pagal PID2), nelaukiant kol bus padaryta įtaką katilė lygiui (PID1), todėl geresnė (griežtesnė ir greitesnė) lygio kontrolė gali būti pasiekta. Trūkumas yra tai, kad dabar mes turime ne

vieną PID reguliatorių, o du ar net daugiau, kuriuos reikia suderinti kiekvieną atskirai, bet atsižvelgiant į kitus reguliatorius [7].

Pakopinės sistemos derinimas

Remiantis J. Smuts patirtimi [8] pakopinė sistema turėtų būti pradėta derinti nuo mažiausio kontūro, t.y. nuo reguliatoriaus esančiame visų kitų kontūrų viduje. Kai pastarasis reguliatorius yra suderintas, jis yra nustatomas į kaskadinį režimą ir tuomet kontūras nustatantis jam užduoties signalą yra derinamas. Autorius atkreipia dėmesį į tokios sistemos derinimą: „Nenaudokite ketvirčio amplitudės slopinimo derinimo metodų (tokio kaip nemodifikuotas Zieglerio ir Nicholso metodas) pakopinėms sistemoms derinti, nes jie gali sukelti sistemos nestabilumą jeigu vidinio ir išorinio kontūro dinamika yra panaši.“ [8]. Žinoma tai dar nereiškia, kad negalima naudoti QAD metodų. Kaip pats autorius pabrėžia, tai tik gali sukelti nestabilumą esant panašiai kontūrų dinamikai, tačiau gali ir neįtakoti sistemos stabilumo, o jei dinamika skiriasi, tuomet tikimybė itin maža.

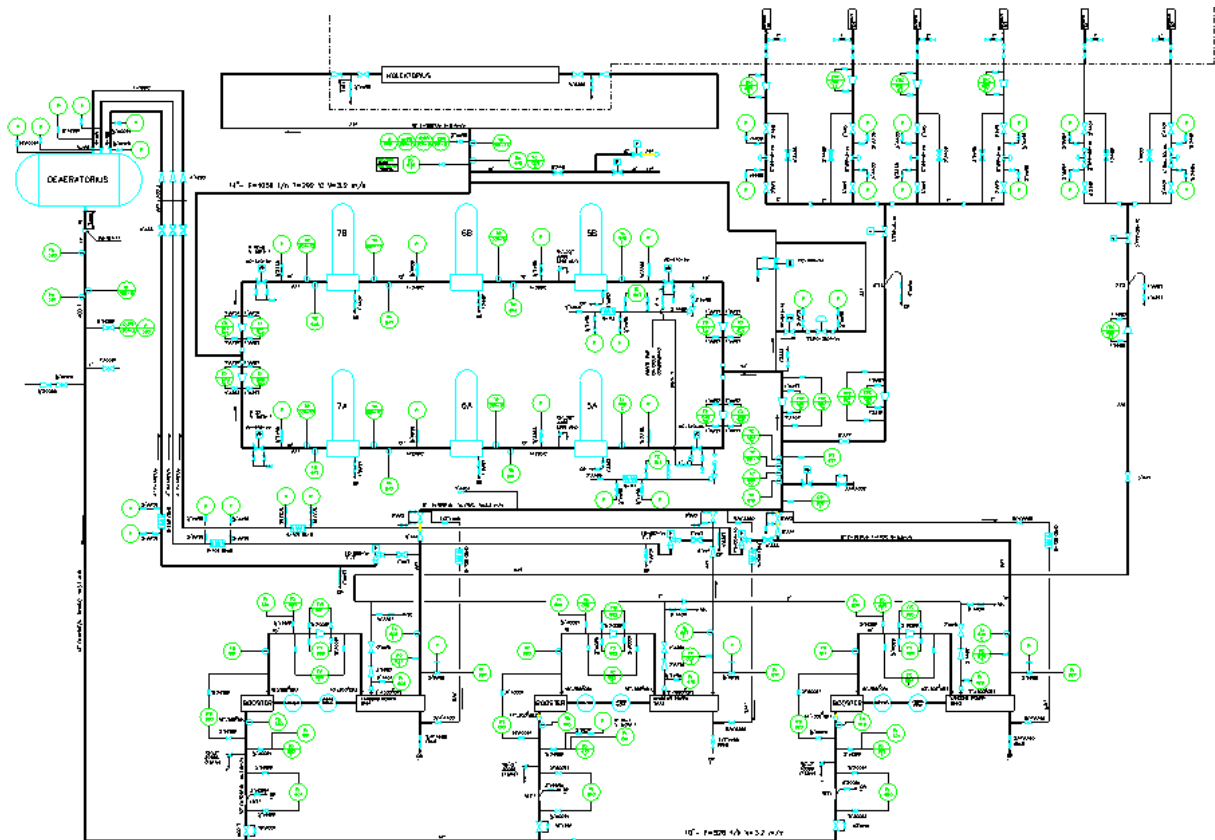
Svarbios PID reguliatorių derinimo sąlygos [7]:

1. Pirmiausiai reikia suderinti vidinį PID reguliatorių, tada esantį jo išorėje. Dažnai, vidiniam reguliatoriui pakanka proporcinės dedamosios.
2. PID 2 turi veikti (paprastai automatiniu režimu), kai yra derinamas PID 1.

Labai svarbu laikytis sąlygos, kad vidinis kontūras (PID2) būtų greitesnis už išorinį kontūrą (PID 1) [8]. Jeigu vidinis kontūras veiks lėčiau už išorinį, tuomet nebus gaunama ryški nauda.

2 MODERNIZUOJAMAS OBJEKTAS

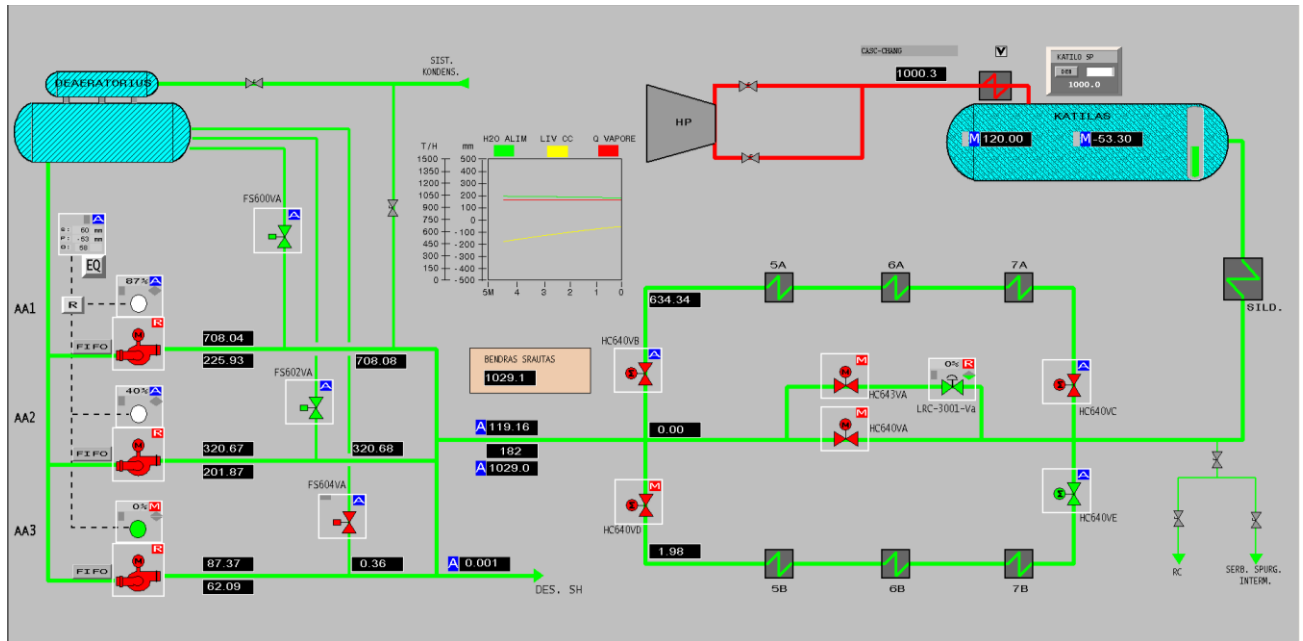
Modernizuojamas objektas yra anglimi kūrenamos elektrinės katilė esantis vandens lygis ir jį kontroliuojanti vandens tiekimo sistema. Vanduo į katilą tiekiamas per tris kanalus, kuriuos valdo varikliai sujungti su hidraulinėmis movomis taip reguliuojant srautą. Valdomi įtaisai yra varikliai, kurie yra reguliuojamo greičio, tokiu būdu keičiamos hidraulinių movų padėties, o tai įtakoja tiekiamo vandens srautą. Vanduo tiekiamas iš deaeratoriaus per pompas į šildytuvus ir iš jų patenka į katilą. Reikia pastebėti, kad atidarius vožtuvus HC640VA arba HC643VA kartu su LRC-3001-VA sklende, vanduo į katilą tiekiamas ne tik per šildytuvus bet ir kitu keliu, kur nėra kaitinamas, todėl vandens debitas į katilą staiga išauga dėl sumažėjusio pasipriešinimo srautui. Taip pat kiekviena šaka turi recirkuliacijos vožtuvus, kurie nukreipia vandenį atgal į deaeratorių. Pastarieji atidaromi esant mažam vandens srautui, pvz. paleidžiant sistemą. Bendrą vandens tiekimo schemą galima matyti 2.1 paveiksle (detalus brėžinys pateiktas 1 priede).



2.1 pav. Vandens tiekimo sistemos schema

2.1 Modeliavimo aplinka

Proceso modeliui sukurti buvo panaudota „VMware Workstation“ modeliavimo aplinka su įdiegta Ovation 3.2 DCS valdymo sistema. Atsižvelgiant į pirmame skyriuje išdėstytus reikalavimus buvo sukurta elementų valdymo logika ir operatoriaus sąsaja. Grafinis langas, kuriame matyti kiekvieno elemento būseną pateikta 2.2 paveiksle (didesnės raiškos paveikslas pateiktas 2 priede).



2.2 pav. Operatoriaus sąsaja

Į valdymo langą - 2.2 paveikslą, sudėti pagrindiniai elementai reikalingi modernizuojamo objekto modeliavimui ir vykstančio proceso valdymui. Operatoriaus sąsaja sukurta pagal 2.1 pav. (schemą). Šiame lange sudėti ir atvaizduoti visi būtini elementai tokie kaip deaeratorius, katilas, sklendės, pompos, šildytuvai ir matavimai reikalingi proceso stebėjimui. Elementai mažai įtakojantys proceso kokybę ir nenagrinėjami darbo metu, bet esantys vandens tiekimo sistemos schemoje, pavaizduoti kaip nevaldomi elementai (pvz. pilkos sklendės).

Šiame lange esančios žalios linijos reiškia vamzdžius, kuriais teka vanduo, o raudonos garą. Žali elementai rodo jų būseną, kai pastarieji neveikia (t.y. sustoję, uždaryti), o raudoni, kad jie veikia (t.y. pompos dirba, sklendės atviros).

Kiekvienas elementas, esantis grafiniame lange ir svarbus tiekiamo vandens srauto reguliavimui, gali būti valdomas priklausomai nuo elemento pobūdžio. Paspaudus ant elemento iššaukiamas jo valdymo langas. Kaip pavyzdys 2.3 pav. pateikta HC643VA vožtuvo valdymo langas.



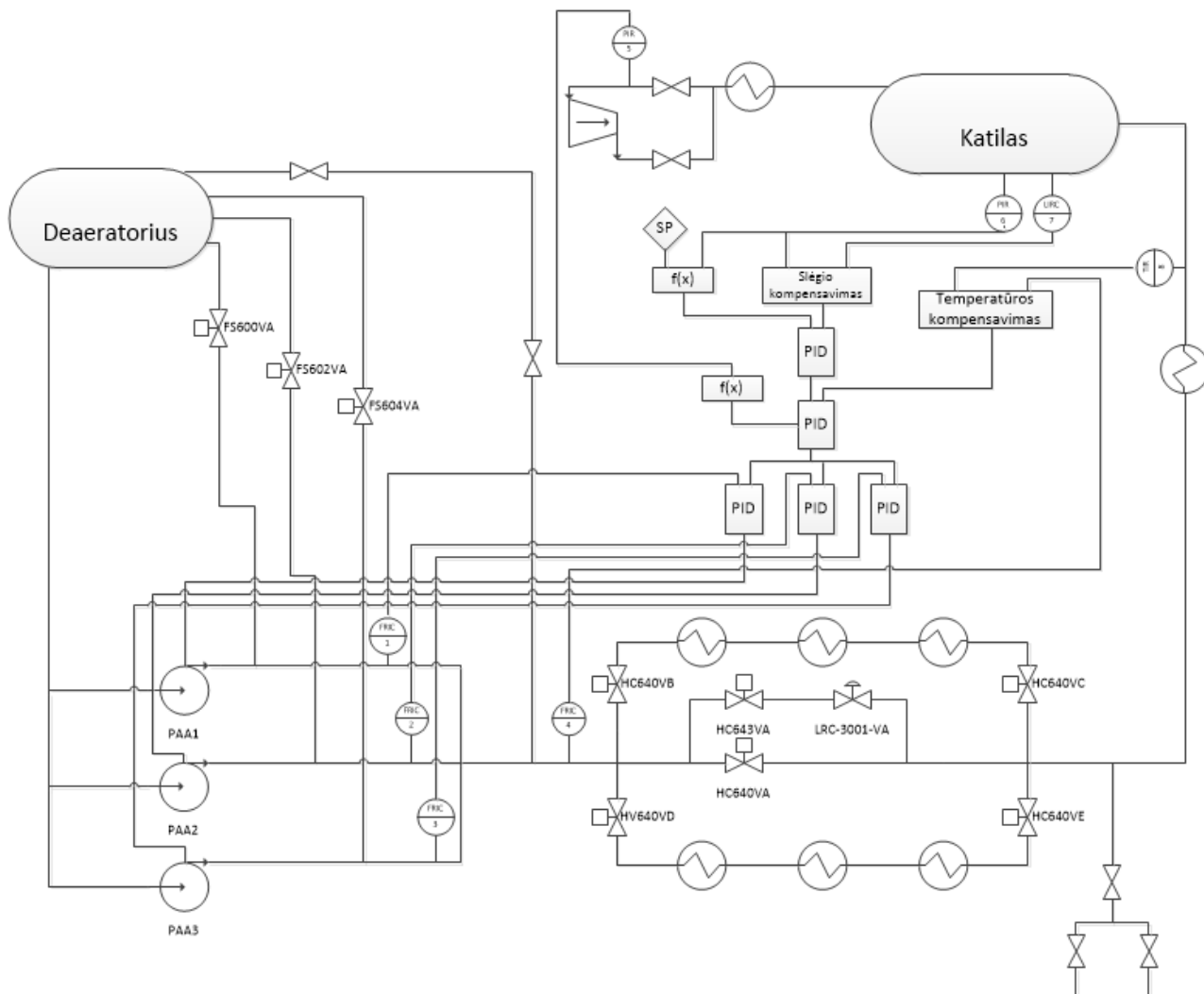
2.3 pav. HC643VA sklendės valdymo langas

2.3 paveiksle matome vožtuvo valdymo langą. Iššaukus valdymo langą bet kuriam elementui matome koks tai elementas, jo aprašymą bei momentinę būseną - šiuo atveju įrenginys valdomas rankiniu režimu ir yra atviras. Iššaukus šį langą taip pat galima atidaryti ar uždaryti vožtuvą (*ATIDR* ir *UZDR* mygtukai) arba perjungti į kitą valdymo režimą (*AUTO* ir *RANK* mygtukai). Šiame lange dar įtraukti papildomi laukeliai, tam kad operatorius galėtų matyti avarinio režimo būseną.

2.2 Senoji sistema

Senąją valdymo sistemą sudarė tris PID reguliatoriai – tai buvo pakopinė valdymo sistema (žiūrėti 2.4 pav.). Pirmojo PID reguliatoriaus užduoties signalas buvo katilo lygio signalas, o proceso vertė - lygis katile, įvertinant slėgio įtaką. Pirmojo PID reguliatoriaus išėjimas įvertinamas antrajame PID reguliatoriuje kaip poslinkis, o pastarojo užduoties signalas buvo išskaičiuojamas pagal išėinančio garo slėgį – netiesioginis matavimas. Proceso vertė vidinio kontūro reguliatoriui buvo bendras tiekiamo vandens srautas su temperatūros kompensavimu. Šio reguliatoriaus išėjimas buvo užduoties signalas trečiame kontūre esantiems PID reguliatoriams, kurie remdamiesi šiuo signalu ir kiekvienos šakos vandens srauto matavimu formuodavo užduotį hidraulinės movas pozicionuojantiems varikliams taip keičiant pratekantį srautą pro kiekvieną šaką. Galima teigti, kad šioje sistemoje antrinis PID reguliatorius dubliuoja pirminį, nes abiejų išėjime gaunamas reikiamo

srauto užduoties signalas. Dėl šios priežasties galima teigti, kad vienas PID yra perteklinis ir dėl to suprastėja proceso efektyvumas bei būdamas papildomas PID reguliatorius sumažina sistemos stabilumą keičiantis sistemos užduoties signalui. Dėl šių priežasčių buvo nuspręsta vieną kontūrą pašalinti, paliekant dviejų PID reguliatorių pakopinę valdymo sistemą.



2.4 pav. Supaprastinta vandens tiekimo valdymo sistema naudojant 3 reguliatorius.

Senąjį objektą valdė MAX1000 CCTV valdymo sistema, kuri vizualiai atvaizdavo operatoriams procesus bei buvo suderinta su SRC. Buvusioji sistema nepraktiška, nes tai buvo kelios tarpusavyje sujungtos skirtingos sistemos, iš kurių vieną atliko valdymo funkciją, kita kūrė sąsają operatoriui. Reikia atkreipti dėmesį, kad bet kokie papildomi sistemų tarpusavio derinimai didina projekto išlaidas bei padidina klaidingo signalo tikimybę. Pastarosios sistemos parametrai pateikti 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė PID parametrai naudoti MAX1000 sistemoje.

PID	3TEDLC1	3TEDLC2	3FWPAA1	3FWPAA2	3FWPAA3
Aprašymas	Katilo lygio reguliavimas	Katilo lygio reguliavimas	PAA1 hidraulinės movos padėtis	PAA2 hidraulinės movos padėtis	PAA3 hidraulinės movos padėtis
K1	1,54	0,8	0,2	0,2	0,2
K2	0,4	5	17	17	17
K3	0,2	0	0	0	0
K4	1	1	5	5	5
K5	-1	33,9	-5	-5	-5
K6	0	0	0,5	0,5	0,5
K7	0,8	0	0	0	0
K8	0	0	30	30	30
K9	0	0	0,5	0,5	0,5
K10	1250	1250	100	100	100
K11	0	0	30	30	30
K12	0	0	0	0	0
K13	0	0	0	0	0
K14	0	0	0	0	0
K15	0	0	0	0	0
L1	50	0	9999	9999	9999
L2	-50	0	-9999	-9999	-9999
L3	50	100	9999	9999	9999
L4	-50	-100	-9999	-9999	-9999
L5	100	100	100	100	100
L6	-100	0	0	0	0
L7	100	100	3	3	3

Parametrų reikšmės MAX1000 sistemoje:

K1 – Proporcinė dedamoji K_p . Stiprinimas lygus 0,5 reiškia, kad išėjimas pasikeis 0,5% esant 1% pokyčiui.

K2 – Atstatymas - $(1/T_i)$ greičiu.

K3 – Koeficientas - (T_d) vienetais per minutę.

K4 – Funkcija, kuri priklauso nuo PID tipo: santykinio PID (santykio koeficientas naudojamas skaičiuoti užduoties signalui), normalaus PID (užduoties signalas turi aukštą ribojimo laipsnį), skirtuminis PID (didelis skirtumas tarp ribojimų).

K5 – Funkcija, kuri priklauso nuo PID tipo: santykinio PID (kitimo greičio koeficientas naudojamas skaičiuoti užduoties signalui), normalaus PID (užduoties signalas turi mažą ribojimo laipsnį), skirtuminis PID (mažas skirtumas tarp ribojimų).

K6 – Kvadratinės paklaidos koeficientas.

K7 – Užduoties signalo pokytis per sekundę.

K8 – Pavaros inercija - stabdymo trukmė sekundėmis (naudojama tik PAT pavaroms).

K9 – Pavaros pozicionavimo vėlinimas procentais nuo pilnos skalės (naudojama tik PAT pavaroms)

K10 – Kaskadinės sistemos daugiklis. Skaliavimas

$$K10 = 100\% \text{ nuo išėjimo}$$

$$\text{Išėjimas inžinieriniais vienetais} = \text{išėjimas} * (\text{skaliavimo procentas}) * 100$$

K11 – Pavaros inercija - paleidimo laikas sekundėmis (naudojama tik PAT pavaroms).

Ribojimai:

L1 – Proceso viršutinė riba inicijuojanti aliarmą.

L2 - Proceso apatinė riba inicijuojanti aliarmą.

L3 – Maksimalus teigiamas leistinas nukrypimas, kurį viršijus inicijuojamas aliarmas.

L4 – Maksimalus neigiamas leistinas nukrypimas, kurį viršijus inicijuojamas aliarmas.

L5 – Išėjimo viršutinė riba.

L6 – Išėjimo apatinė riba.

L7 – Išėjimo koeficientas - procentinė išėjimo reikšmė per sekundę, kuriuo gali kisti išėjimas.

Ovation sistemos PID reguliatoriaus parametrai reikalingi norint jį suderinti [3]:

PGAIN – Proporcinė dedamoji. Jeigu proporcinė dedamoji lygi nuliui, ji nedaro įtakos išėjimui.

INTG – Integravimo laikas sekundėmis per žingsnį. Jeigu integravimo laikas lygus nuliui, ši dedamoji nedaro įtakos reguliatoriaus išėjimui.

DGAIN – Diferencijuojančios grandies laiko pastovioji. Jeigu šis koeficientas lygus nuliui, jis nedaro įtakos reguliatoriaus išėjimui.

DRAT – Diferencijavimo grandies didėjimo ribojimo koeficientas. Šis koeficientas apriboja išvestinės pokytį pagal inžinieriaus nustatymus ir neleidžia išėjimui kisti šuoliškai, dideliais intervalais.

DBND – paklaidos vėlinimas (tik PID – G). Nustačius šį parametą lygiu 0, yra išjungiamas nejautrumo zona ir jos įtaka.

ERRD – paklaidos vėlinimo stiprinimas (tik PID – G)

Siekdamas modeliuoti senąją sistemą Ovation aplinkoje, teko perskaičiuoti parametrus. PID regulatoriaus skaičiavimų tvarka:

$$PGAIN = K1 \times (1 + K3 \times K2) \quad (5)$$

$$NTG = \frac{60}{K1 \times K2} \quad (6)$$

$$DGAIN = K1 \times 8 \quad \text{Jei } K3 \neq 0 \quad (7)$$

$$DGAIN = 0 \quad \text{Jei } K3 = 0$$

$$DRAT = K3 \times \frac{60}{8} \quad (8)$$

$$DBND = K4 \quad (9)$$

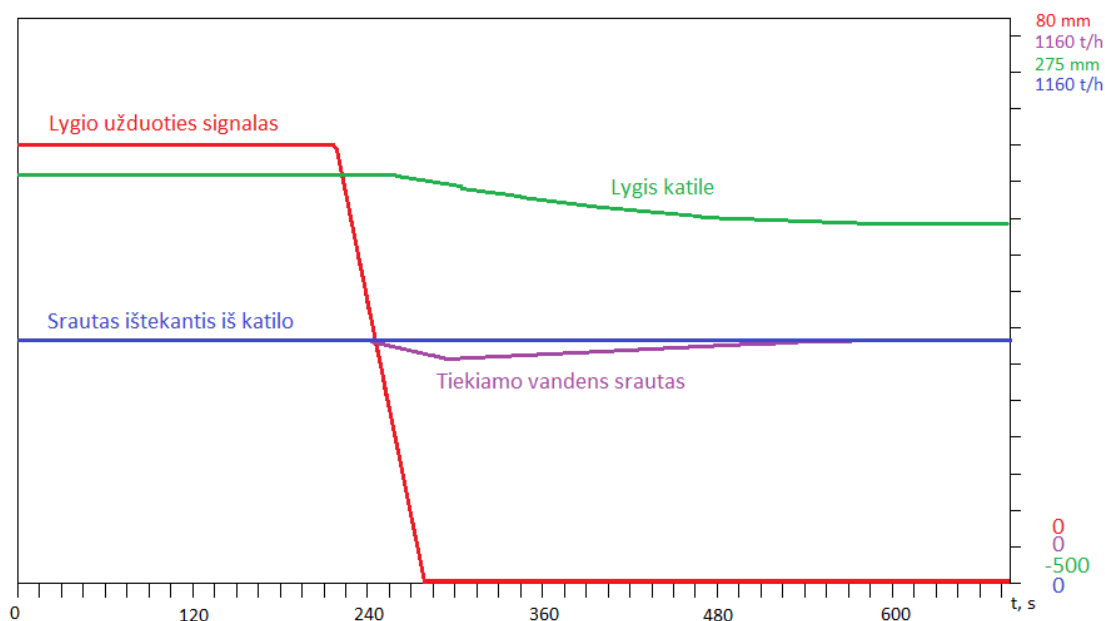
$$DBND = 1 - K6 \quad (10)$$

Remiantis 5-10 formulėmis ir atlikus skaičiavimus gautos reikšmės surašytos 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Perskaičiuoti PID parametrai į Ovation sistemą.

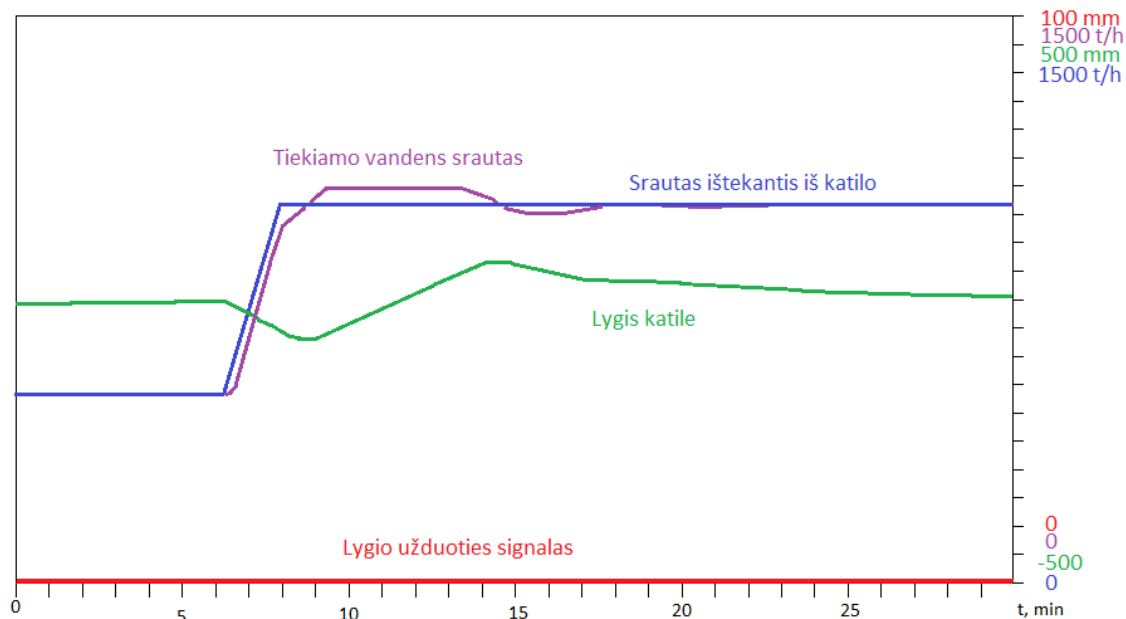
PID	3TEDLC1	3TEDLC2	3FWPAA1	3FWPAA2	3FWPAA3
Objektas	Katilo lygio reguliavimas	Katilo lygio reguliavimas	Pirmos hidraulinės movos padėtis	Antros hidraulinės movos padėtis	Trečios hidraulinės movos padėtis
PGAIN	3,2000124	0,3000031	0,2000046	0,2000046	0,2000046
INTG	99,99897	39,99959	17,64665	17,64665	17,64665
DGAIN	16	0	0	0	0
DTIME	15	0	0	0	0
DB RANGE	-	-	5	5	5
DB GAIN	-	-	0,5	0,5	0,5

Sistemą suderinus su senaisiais parametrais analizuoju ją keisdamas tris parametrus: lygio užduoties signalą, katilo išėjimo srautą ir sistemos reakciją į tiekiamo vandens srauto padidėjimą - atidarius sklendes 640VA ir 643VA su LRC-3001-VA paduodamas šaltas vanduo t.y. tiekiamo vandens kelias pasikeičia, srautas nukreipiamas ne per šildytuvus, o per laisvą vamzdį, kas sumažina pasipriešinimą srautui ir srautas išauga.



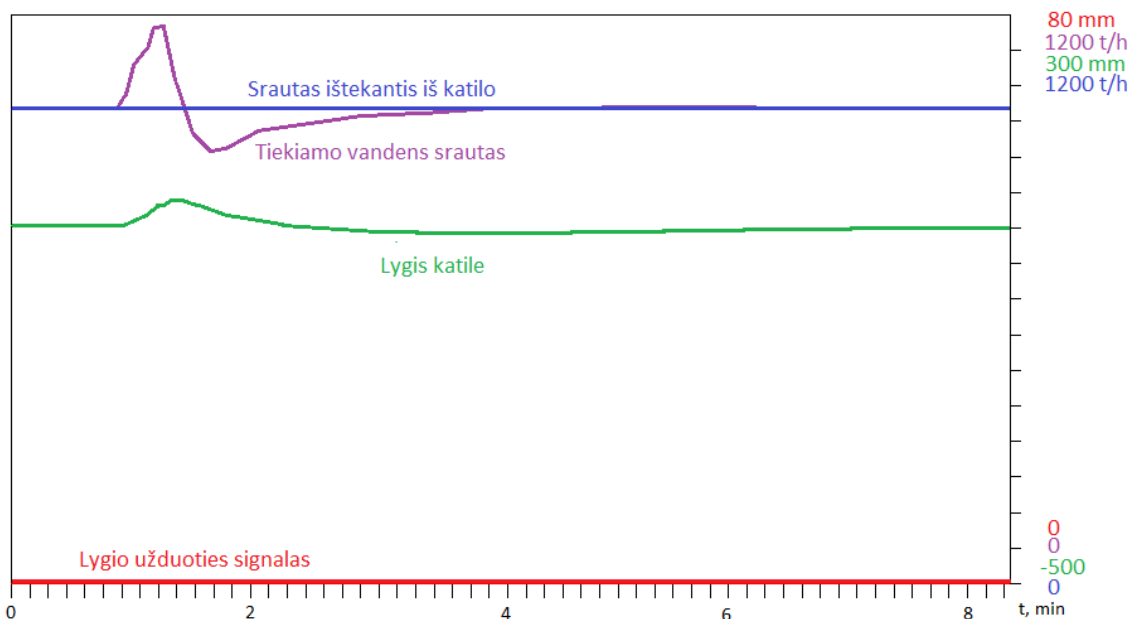
2.5 pav. Senosios sistemos pereinamasis procesas pasikeitus lygio užduoties signalui

2.5 pav. vaizduoja pereinamuosius procesus, kai lygio užduoties signalas pakinta nuo 60 mmH₂O iki 0 mmH₂O. Šiame grafike matome, kad pradėjus kisti lygio užduoties signalui, sistema sureaguoja ir pradeda keisti tiekiamo vandens srautą po 38s, o lygis pasiekia nustatytą naują lygį po 375 s.



2.6 pav. Senosios sistemos reakcija į katilo išėjimo srauto padidėjimą.

Kaip matyti iš 2.6 pav. padidėjus išėjimui iš katilo nuo 500 t/h iki 1000 t/h sistemos vėlinimas yra lygus 12s, dėl to atsiranda lygio svyravimai siekiantys 75 t/h (7% nuo pilnos skalės). Reguliavimo trukmė 23 min.



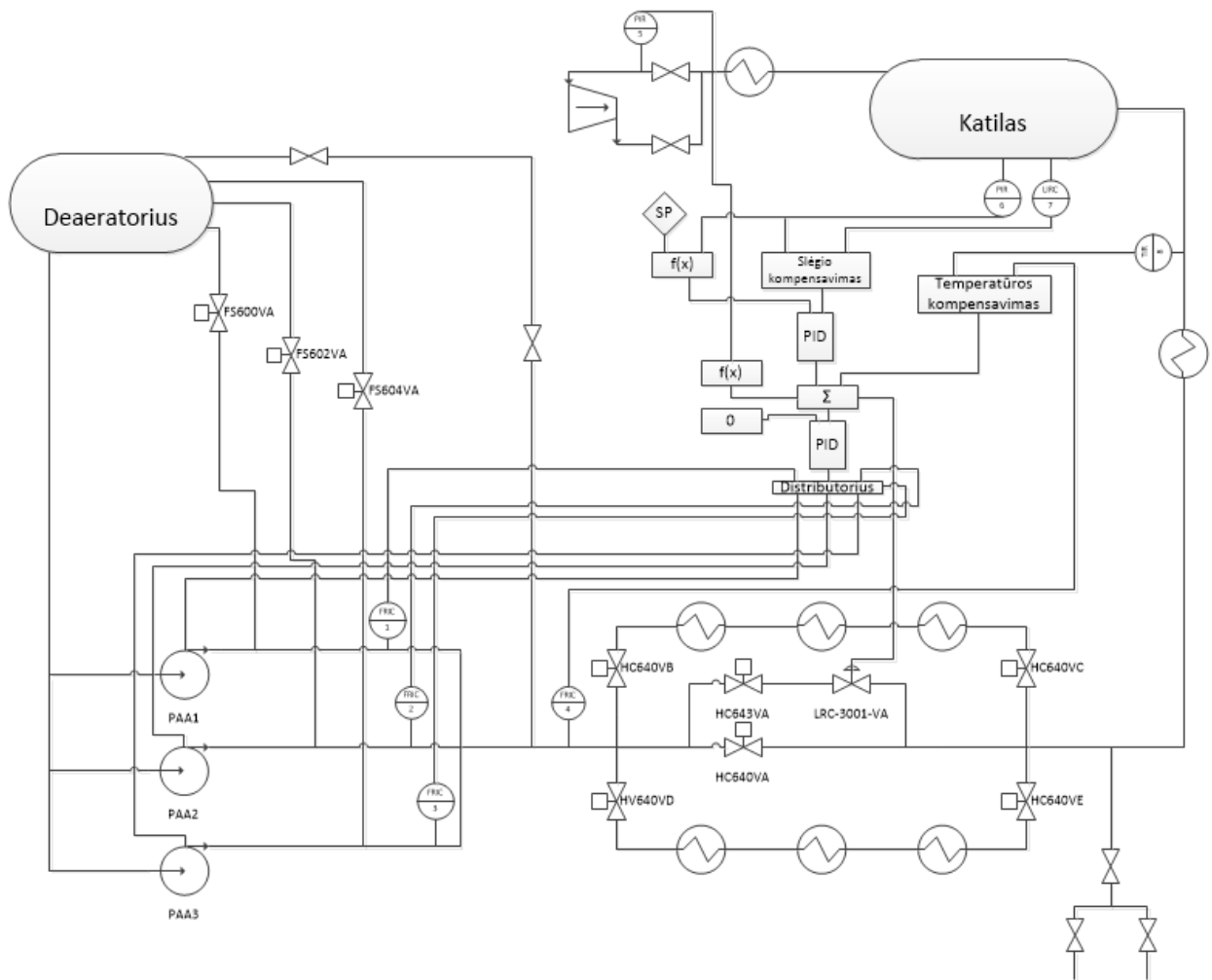
2.7 pav. Senosios sistemos reakcija atidarius šalta vandens sklendę

2.7 pav. vaizduojama sistemos reakcija į pakitusį vandens srautą, t.y. paleidus šaltą vandenį. Sistema sureagavo po 22 s, o lygis, kol sistema pradeda mažinti tiekiamo vandens srautą, padidėja 40 t/h (4% nuo visos skalės). Vandens srauto perreguliavimas siekia 14,9%. Reguliavimo trukmė 6 min.

2.3 Naujoji sistema

Naujosios sistemos pirminis kontūras liko nepakitęs. Pirmojo PID reguliatoriaus užduoties signalas yra lygis katile, proceso reikšmė – esamas lygis. Antrojo PID reguliatoriaus užduotis yra kompensuoti trikdžius, atsirandančius dėl ištekancio srauto pokyčio, vidinių trikdžių t.y. dėl temperatūros pokyčių, bangavimo, kavitacijos katile. Antrojo PID reguliatoriaus užduoties signalas yra reikalingo tiekiamo vandens srauto ir esamo srauto skirtumas, kuris suformuojamas remiantis pirmojo PID išėjimu, iš katilo išeinancio garo srautu, tiekiamo vandens srautu bei vožtuvo, kuris praleidžia į katilą šaltą vandenį, padėtimi. Žinant LRC-3001-VA padėtį ir jo charakteristikas galima išskaičiuoti pro jį pratekantį vandens srautą. Šis skirtumas turėtų būti palaikomas lygiu nuliui, remiantis tuo antrasis PID reguliatorius suformuoja signalą paskirstymo algoritmui, kuris valdo

variklius, o pastarieji pozicionuoja hidraulinės movas. Tokiu būdu iš valdymo sistemos pašalinamas vienas papildomas kontūras (žr. 2.8 pav.).



2.8 pav. Supaprastinta vandens tiekimo valdymo sistema naudojant 2 reguliatorius.

2.4 Sistemos derinimas Cohen-Coon būdu:

Jacques Smuts teigia, kad 2010 metais Cohen-Coon derinimo būdas buvo antras pagal populiarumą [8]. Šis būdas buvo paskelbtas 1953 metais, praėjus vienuolikai metų po Zieglerio ir Nicholso metodo paskelbimo. Šis būdas gali būti taikomas plačiau negu Zieglerio ir Nicholso metodus. Cohen-Coon derinimo metodus apibrėžiamas trimis konstantomis: proceso stiprinimu, vėlinimu ir laiko konstanta. Šios konstantos yra analizuojamos padavus šuolį procesui ir nagrinėjant pereinamojo proceso kreivę.

Pasirinkau šį derinimo metodą, nes jis yra pritaikytas greitiems procesams (tinkamas vidinio reguliatoriaus derinimui) su minimaliu pereinamuoju procesu ir mažiausia paklaida.

Atliekami punktai derinant C-C metodu [8]:

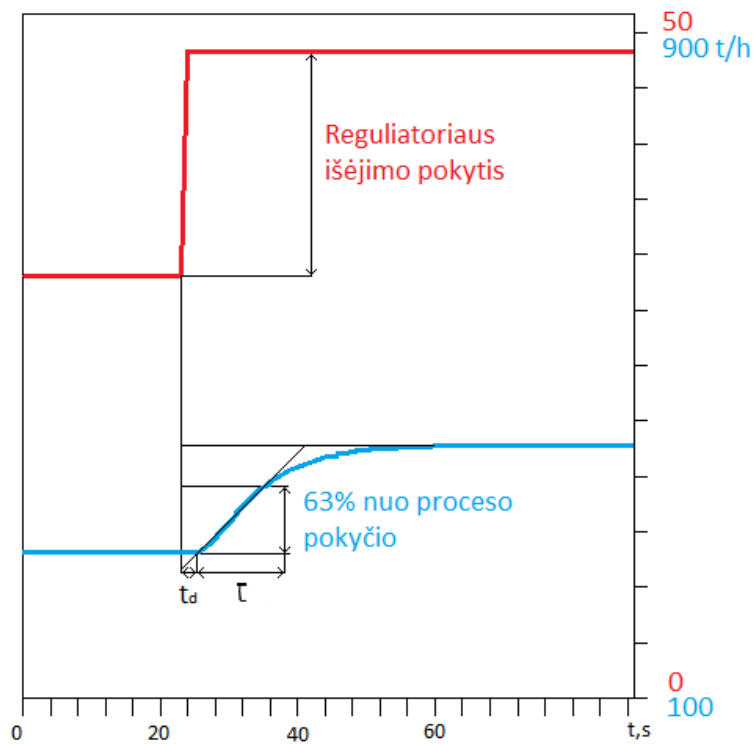
1. Regulatoriai nustatomi į rankinį režimą ir laukiama, kol procesas nusistovės;
2. PID išėjime duodamas šuolis ir laukiama kol procesas nusistovės;
3. Perskaičiuoti pakitusią proceso vertę į procentinį pokytį;
4. Suskaičiuoti proceso stiprinimą:

$$gp = \frac{\text{proceso pokytis \%}}{\text{regulatoriaus išėjimas \%}} \quad (11)$$

5. Nubrėžti pereinamojo proceso liestinę;
6. Nustatyti vėlinimo laiką t_d ;
7. Nustatyti proceso vertę, kai jis pasiekia 63% nusistovėjusios reikšmės;
8. Rasti laiką nuo vėlinimo pabaigos iki kol pasiekama 63% nusistovėjusios reikšmės τ ;
9. Jeigu reikia perskaičiuoti vėlinimą ir laiką τ į tuos pačius vienetus kaip PID reguliatoriuje;
10. Paskaičiuoti parametrus pagal C-C (2.3) lentelę;

2.3 lentelė. Cohen-Coon parametrų skaičiavimo lentelė.

	Proporcinis stiprinimas	Integravimo laikas	Diferencijavimo laikas
P valdiklis	$Kc = \frac{1,03}{gp} \left(\frac{\tau}{td} + 0,34 \right)$		
PI valdiklis	$Kc = \frac{0,9}{gp} \left(\frac{\tau}{td} + 0,092 \right)$	$Ti = 3,33td \left(\frac{\tau + 0,092td}{\tau - 0,092td} \right)$	
PD valdiklis	$Kc = \frac{1,24}{gp} \left(\frac{\tau}{td} + 0,129 \right)$		$Ti = 0,27td \left(\frac{\tau - 0,324td}{\tau + 0,129td} \right)$
PID valdiklis	$Kc = \frac{1,35}{gp} \left(\frac{\tau}{td} + 0,185 \right)$	$Ti = 2,5td \left(\frac{\tau + 0,185td}{\tau - 0,611td} \right)$	$Ti = 0,37td \left(\frac{\tau}{\tau + 0,185td} \right)$



2.9 pav. Vidinio regulatoriaus reakcija į šuolinį signalą

Iš 2.9 grafiko:

$$t_d=3,4s$$

$$\tau=14,7s$$

Pagal 10 formulę:

$$g_p=35/22=1,59$$

Vidinio kontūro esmė yra greita reakcija į trikdžius ir jų kompensavimas. Pagal 1.2 lentelę diferencijavimo laiko pastovioji daro mažą įtaką proceso reakcijai ir augimo trukmei. Remiantis šiais teiginiais pagal 2.3 lentelę parenku PI reguliatorių:

$$Kc = \frac{0,9}{g_p} \left(\frac{\tau}{t_d} + 0,092 \right) = \frac{0,9}{1,59} \left(\frac{14,7}{3,4} + 0,092 \right) = 2,499$$

$$Ti = 3,33 * 1,59 \left(\frac{3,4 + 0,092 * 14,7}{3,4 - 0,092 * 14,7} \right) = 26,278$$

Kadangi pirminis PID reguliatorius valdo lygi, o derinant jį trikdžiai ir srauto ištekėjimas yra ignoruojami, todėl lygis pildosi be apribojimo ir tai yra astatinis objektas. Tokiam procesui negalima taikyti anksčiau naudoto C-C metodo. Astatinio objekto reguliatoriaus parametų skaičiavimui pasirenku Chieno, Hroneso ir Reswicko metodą, kuris sukurtas remiantis Zieglerio ir Nicholso metodo modifikacija ir kuris siūlo neperreguliuojamo ir 20% perreguliuavimo derinimo kriterijus [10]. Taip pat atskiros užduoties signalo ir trikdžio derinimo formules. Svarbu tai, kad šis metodas siūlo atskiras skaičiavimo formules astatiniams objektams ir jų parametų skaičiavimams.

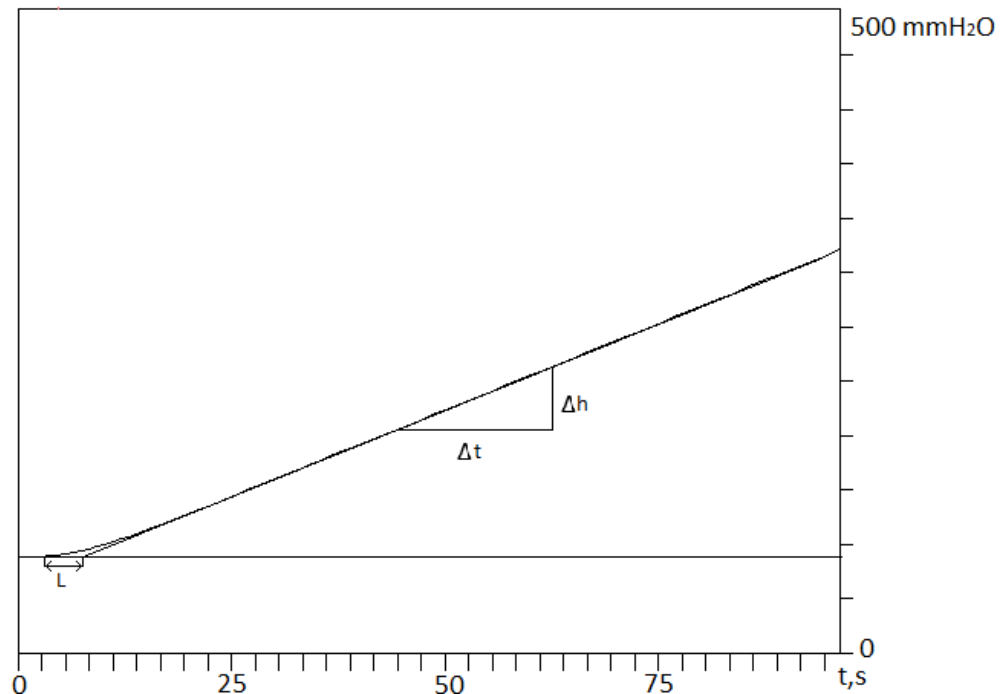
Diferencijavimo laiko pastoviosios nebuvimas padaro sistemą stabilesnę pusiausvyros būsenoje, esant triukšmams [7], o tai aktualu dėl kavitacijos ir bangavimo katile. Remiantis šia prielaida ir 1.2 lentelė, išoriniam kontūriui taip pat parenku PI reguliatorių.

PI reguliatoriaus parinkimui reikalingos formulės:

$$k = \frac{0,59}{ki0 \times L} \quad (12)$$

$$Ti = 4L \quad (13)$$

$$ki0 = \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (14)$$



2.10 pav. Išorinio kontūro reakcija į šulinį signalą

Iš 2.10 grafiko $L=4,8s$, $\Delta t=17,2s$, $\Delta h=50,4 \text{ mmH}_2\text{O}$.

Pagal 12-14 formules PI parametrai:

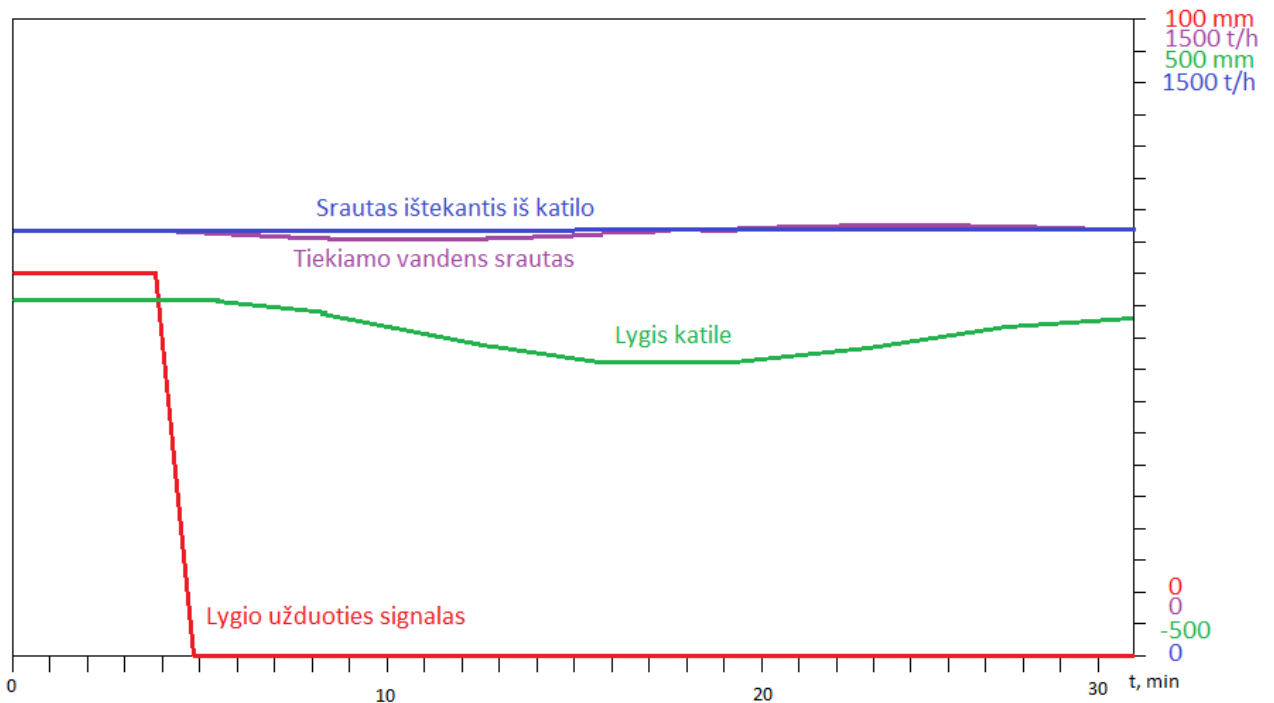
$$ki0 = \frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{50,4}{68,8} = 0,733$$

$$k = \frac{0,59}{ki0 \times L} = \frac{0,59}{0,733 \times 17,5} = 0,046$$

$$Ti = 4L = 4 \times 17,5 = 70$$

3 SUDERINTOS SISTEMOS ANALIZĖ

Siekiant pamatyti naujosios suderintos sistemos pranašumą analizuoju ją atsižvelgdamas į tuos pačius tris kriterijus: lygio užduoties signalą, srautu ištekantiu iš katilo ir tirdamas sistemos reakciją į tiekiamo vandens srauto padidėjimą - atidarius sklendes 640VA ir 643VA bei LRC-3001-VA paduodamas šaltas vanduo.



3.1 pav. Derinamos sistemos pereinamasis procesas pakitus lygio užduoties signalui

3.1 grafike matoma sistemos pereinamasis procesas pakitus lygio užduoties signalui nuo 60 mmH₂O iki 0 mmH₂O. Dėl pirmojo kontūro, valdančio lygį katile, mažos proporcinės dedamosios procesas vyksta labai lėtai ~27 min (76,9% ilgiau) t.y. prasčiau negu su senąja sistema, o perreguliavimas siekia 100 t/h (10% nuo pilnos skalės). Todėl šie parametrai buvo atmesti ir laikomi netinkamais, tyrimas toliau nebetęsiamas, kadangi pereinamieji procesai netenkina sistemos reikalavimų.

Atsižvelgdamas į suskaičiuotus parametrus reguliatorių derinimo metu bei parametrus gautus perskaičiavus iš MAX1000 sistemos į Ovation DCS sistemą, parametrus parenku intuityvaus derinimo metodu:

1 PID reguliatoriaus (išorinis kontūras)

$$P = 7$$

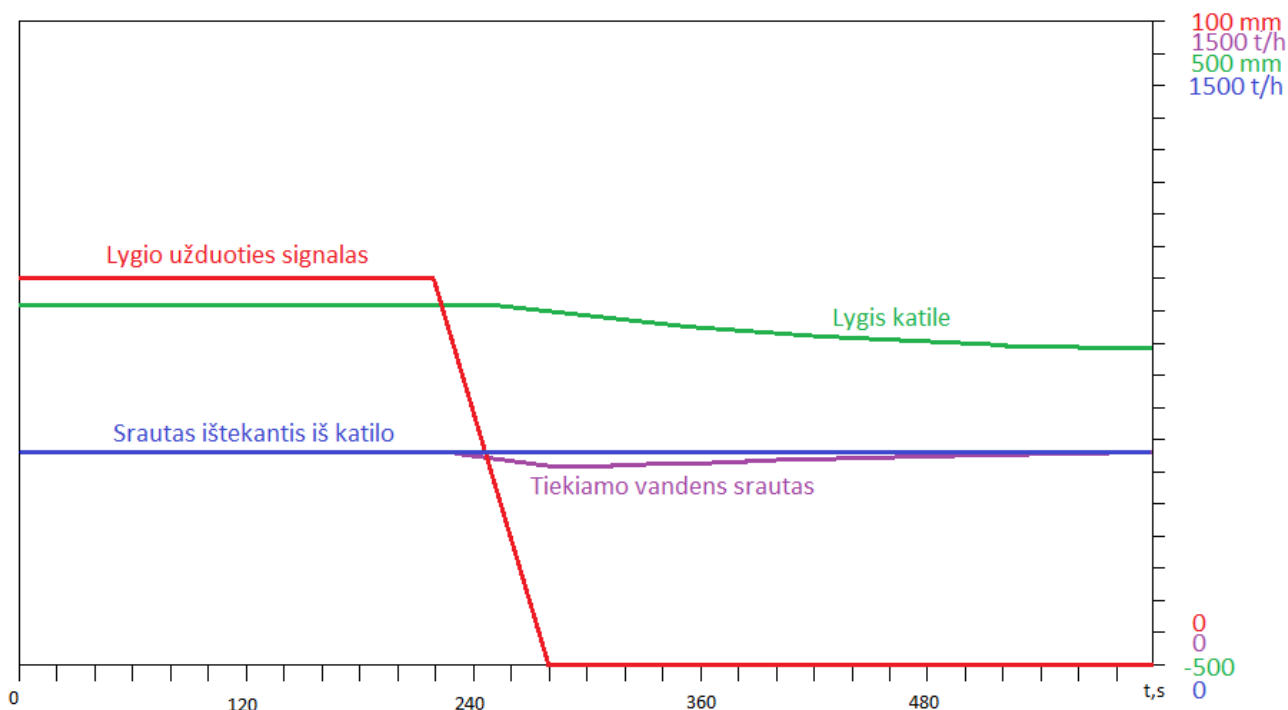
$$I = 78$$

2 PID reguliatoriaus (vidinis kontūras)

$$P = 1$$

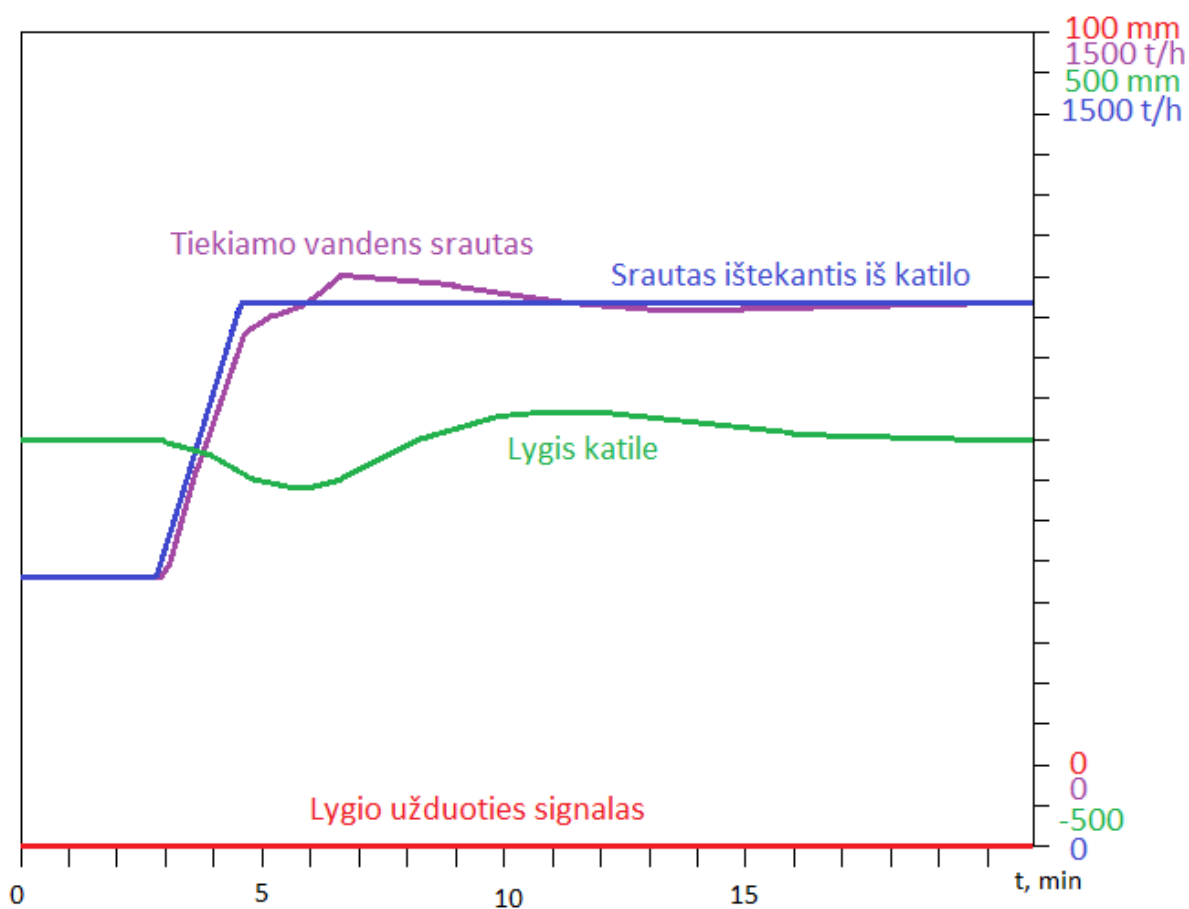
$$I = 25$$

Suderintos sistemos pereinamieji procesai:



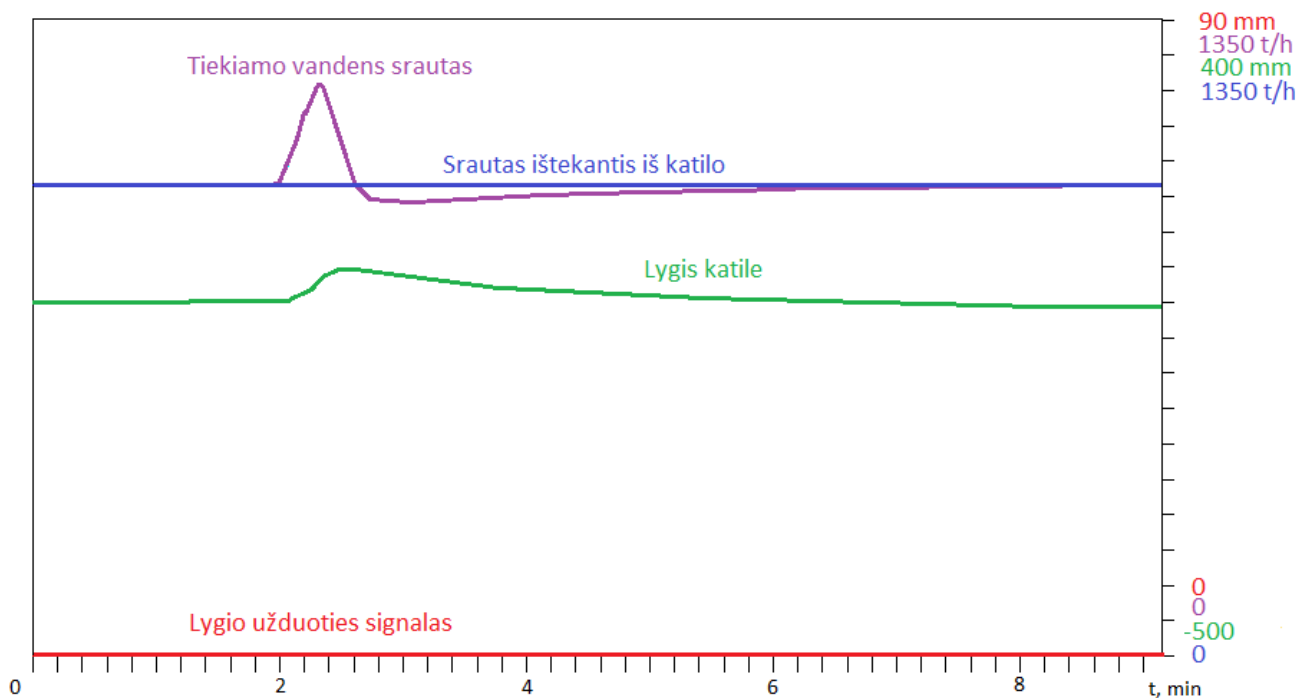
3.2 pav. Suderintos sistemos pereinamasis procesas pasikeitus lygio užduoties signalui

Iš 3.2 pav. matome, kad pasikeitus lygio užduoties signalui (sumažinus nuo 60 mmH₂O iki 0 mmH₂O), lygis katile sureaguoja po 25s, o lygis pasiekia nustatytą naują lygį po 300s.



3.3 pav. Suderintos sistemos reakcija į katilo išėjimo srauto padidėjimą

Kaip matyti iš 3.3 pav., pakitus srauto išėjimui iš katilo sistemos vėlinimas trunka 8s, dėl to atsiranda lygio svyravimai siekiantys iki 55 t/h (5,5% nuo pilnos skalės). Reguliavimo trukmė 17 min.



3.4. pav. Suderintos sistemos reakcija atidarius šalto vandens sklendę

3.4 pav. pavaizduota sistemos reakcija į pakitusį vandens srautą, t.y. paleidus šaltą vandenį. Sistema pradeda reguliuoti valdymo įtaisus praėjus 18s. nuo HC640VA, HC643VA ir LRC-3001-VA vožtuvų atidarymo momento. Lygis padidėja 45 t/h (4,5% nuo visos skalės) kol sistema pradeda mažinti tiekiamo vandens srautą. Vandens srauto perreguliavimas siekia 16,7%. Reguliavimo trukmė 5 min.

3.1 lentelė. Reguliavimo metodų rezultatai.

	Senoji sistema	Naujoji sistema
Reakcija į pakitusį vandens lygio užduoties signalą		
Vėlinimas	38s	25s
Pereinamojo proceso trukmė	375s	300s
Reakcija į katilo išėjimo srauto pokytį		
Vėlinimas	12s	8s
Perreguliavimas (nuo pilnos skalės)	7%	5,5%
Pereinamo proceso trukmė	23 min.	17 min.
Reakcija atidarius šalto vandens sklendes		
Vėlinimas	22 s	18s
Lygio perreguliavimas (nuo pilnos skalės)	4%	4,5%
Srauto perreguliavimas	14,9%.	16,7%.

4 REZULTATAI IR IŠVADOS

1. Išnagrinėjus anglies deginimo elektrinės vandens tiekimo sistemos reikalavimus, pakopines valdymo sistemas ir jų galimas struktūras buvo modernizuota ir suderinta vandens tiekimo valdymo sistema.
2. Pasitelkus kelis papildomus Ovation paskirstytos valdymo sistemos algoritmus, trijų reguliatorių valdymo sistema buvo pakeista dvių reguliatorių, o tai reiškia, kad pašalinus vieną perteklinį kontūrą sistemą suderinti tampa lengviau. Perskaičiavus senosios sistemos parametrus į Ovation sistemą buvo gauti 8 privalomi parametrai (neskaičiuojant neįtakojamos zonos), o suderinus naująją užteko 4. Nepaisant to, kad buvo pašalintas vienas valdymo kontūras, išanalizavus sistemos pereinamuosius procesus matyti, kad bendras sistemos veikimas ir stabilumas ženkliai pagerėjo – vėlinimas sumažėjo 30%, o perreguliavimas 20%.
3. Atsižvelgiant į tai, kad realus objektas gali skirtis nuo prototipinio modelio, reguliatoriaus derinimo kokybė gali neatitikti reikalavimų. Todėl parinktus reguliatorių parametrus galima vertinti tik kaip pradines reikšmes reguliavimo kontūrai optimizuoti toliau.
4. Po sistemos modernizacijos jos reakcija į užduoties signalo pokytį pagreitėjo 33%, o tai įtakoja mažesnę perreguliavimą ir mažesnę pereinamojo proceso trukmę.
5. Suderinus naująją sistemą, jos perreguliavimas sumažėjo 20%, tai įtakoja mažesnę pereinamojo proceso trukmę - sutrumpėjo 20% bei greitesnį švytavimų slopinimą.

5 LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. International energy agency, Key world energy statistics [interaktyvus] [žiūrėta 2015 m. kovo 15 d.]. Prieiga per internetą:
<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/keyworld2014.pdf>.
2. The Ovation™ Control System [interaktyvus] [žiūrėta 2015 m. balandžio 10 d.]. Prieiga per internetą:
http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Power%20and%20Water%20Documents/pws_002856.pdf.
3. Ovation Algorithms Reference OW350_R1100 January 2013, p. 252-288.
4. P. Albertos, A. Sala, Multivariable Control Systems: An Engineering Approach London, 2004, p. 340.
5. ANSI/ISA, American national standart, Fossil Fuel Power Plant Feedwater Control System — Drum Type, North Carolina, 2000, p. 34.
6. ANSI/ISA, American national standart, Fossil Fuel Power Plant Simulators – Functional Requirements. North Carolina, 17 May 1994, p. 46.
7. Tim Leopold, Boiler-Tuning Basics, January 03, 2009, p. 27.
8. Jacques Smuts, Process Control for Practitioners, League city, Texas: OptiControls Inc, August 22, 2011, p. 315.
9. H. Bishoff, D. Hoffmann, E. Terzi Procesų valdymo sistemos, Mokomoji knyga, Kaunas, Lietuva. Spalis, 1997 m p. 166.
10. Leonas Balaševičius, Napalys Ezerskis. Programuojamieji valdikliai, Laboratoriniai darbai. Vilnius, 2008 p. 88 – 103.

PRIEDAI

1 PRIEDAS. Vandens tiekimo sistemos schema

2 PRIEDAS. Vandens valdymo sistema. Operatoriaus sąsaja.