

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Darius Žvirblis

**KOMBINUOTO CIKLO DUJŲ TURBINOS APROKSIMUOTO
MATEMATINIO MODELIO SUDARYMAS IR ANALIZĖ**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Leonas Balaševičius

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
AUTOMATIKOS KATEDRA

KOMBINUOTO CIKLO DUJŲ TURBINOS APROKSIMUOTO
MATEMATINIO MODELIO SUDARYMAS IR ANALIZĖ

Baigiamasis magistro projektas
Valdymo technologijos (kodas 621H66001)

Vadovas

Doc. dr. Leonas Balaševičius

Recenzentas

Doc. Renaldas Urniežius

Projektą atliko

Darius Žvirblis

KAUNAS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Darius Žvirblis

(Studento vardas, pavardė)

Valdymo technologijos 621H66001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Kombinuoto ciklo dujų turbinos aproksimuoto matematinio modelio sudarymas ir analizė“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 16 m. gegužės 19 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Dariaus Žvirblio** baigiamasis projektas tema „Kombinuoto ciklo dujų turbinos aproksimuoto matematinio modelio sudarymas ir analizė“ 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)

Žvirblis, D. Kombinuoto ciklo dujų turbino aproksimuoto matematinio modelio sudarymas ir analizė. Valdymo sistemų magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Leonas Balaševičius; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Automatikos katedra.

Kaunas, 2016. 53 psl.

SANTRAUKA

Kombinuoto ciklo jėgainėje dujų turbina yra viena iš pagrindinių energijos gamybos proceso struktūros dalių. Todėl projekto tikslas buvo sudaryti kombinuoto ciklo dujų turbino matematinį modelį ir atlikti gautų charakteringųjų duomenų analizę. Darbe įvertinamas modelio adekvatumas realiam objektui bei atliekamas tyrimas keičiant į turbiną tiekiamų dujų kaloringumą. Šiame projekte taip pat apžvelgiami kombinuoto, Rankino bei Braitono ciklų technologijos. Supažindinama su paskirstytų valdymo sistemų, kurios plačiai naudojamos jėgainėse, privalumais. Apžvelgtas rinkoje esantis tokio tipo matematinis modelis, kuris pastūmėjo sukurti kombinuoto ciklo dujų turbino matematinį modelį *Simulink* aplinkoje. Apibendrinus literatūros apžvalgos dalį ir gautus modeliavimo rezultatus, pateikiamos baigiamosios darbo išvados.

Reikšminiai žodžiai: matematinis modeliavimas; kombinuotas ciklas; dujų turbina; Braitono ciklas.

Žvirblis, D. Final project of Design and Analysis of Approximated Mathematical Model for Combined Cycle Gas Turbine. Control systems master's degree final project/ supervisor Assoc. Prof. Dr. Leonas Balaševičius; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Department of Automation.

Kaunas, 2016. 53 pages.

SUMMARY

Combined cycle gas turbine is one of the most important parts in this type of power plants. Therefore, project goal was to create combined cycle gas turbine mathematical model and make process simulation to obtain characteristics of important parameters that are used for data analysis. There was performed evaluation of mathematical model and real object adequacy. Then experiment took place when calorific value of natural gas that is supplied to gas turbines was changed. In addition, this project reviews combined cycle, Rankine cycle and Brayton cycle technologies. Project introduces to distributed control systems that is used in most power plants, structure and its perks. Also work reviews gas turbine mathematical model that is found in the market. It led to creation of combined cycle gas turbine mathematical model that was established in *Simulink* workspace. Summarizing literature review part and obtained simulation results, presented conclusions.

Key words: mathematical modeling; combined cycle; gas turbine; Brayton cycle.

TURINYS

Įvadas.....	10
Teorinė dalis.....	12
1. Jėginių darbo ciklų apžvaga.....	12
1.1 Braitono ciklas.....	13
1.2 Rankino ciklas.....	14
1.3 Kombinuotas ciklas.....	16
1.4 Skyriaus apibendrinimas.....	17
2. Objektų matematiniai modeliai.....	18
2.1 Rinkoje esantys dujų turbinų matematiniai modeliai.....	19
2.2 Skyriaus apibendrinimas.....	20
3. Jėginių eksploatuojamos valdymo sistemos.....	20
3.2 Paskirstyto valdymo sistemų topologija.....	21
3.3 Skyriaus apibendrinimas.....	23
Modeliavimo dalis.....	24
4. Matematinis KC dujų turbinos modelis.....	24
4.1 Realaus objekto duomenų rinkimas.....	24
4.2 Realaus objekto duomenų analizė.....	25
4.3 Sistemos matematiniai modeliai.....	26
4.4 KCB dujų turbinos matematinio modelio struktūra.....	29
4.5 Matematinio modelio duomenų registravimas.....	33
4.6 Skyriaus apibendrinimas.....	33
5. Modelio parametrų adekvatumo tyrimas.....	34
5.1 Simuliacijų metu išskaičiuoti parametrai.....	41
5.2 Skyriaus apibendrinimas.....	42
6. Matematinio modelio tyrimas pakitus tiekiamų gamtinių dujų struktūrai.....	44

6.1 Skyriaus apibendrinimas	49
Išvados.....	50
Literatūros sąrašas	52
Priedai.....	56

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Braitono ciklas	13
1.2 pav. Rankino ciklas	15
1.3 pav. Kombinuotas ciklas.....	17
3.1 pav. Centralizuoto (žvaigždinio) tinklo topologija.....	21
3.2 pav. Žiedinio tinklo topologija	22
3.3 pav. Hierarchinio tinklo topologija.....	22
3.4 pav. Decentralizuoto tinklo topologija	23
4.1 pav. KCB realaus objekto aktyviosios galios reikšmių diagrama duomenų registravimo metu	25
4.2 pav. <i>Ident.</i> įrankiu gautos perdavimo funkcijos simuliuoto išėjimo ir realaus objekto duomenų palyginimas kreivių išraiška	26
4.3 pav. <i>Ident</i> įrankiu gauto modelio ir realaus objekto duomenų palyginimas kreivių išraiška	29
5.1 pav. Bloko aktyviosios galios, realaus objekto ir simuliacijos, verčių palyginimas (338 MW - 385 MW)	36
5.2 pav. Bloko aktyviosios galios, realaus objekto ir simuliacijos, verčių palyginimas (412 MW - 292 MW)	37
5.3 pav. Dujų turbinos kompresoriaus mentelių realaus objekto ir simuliacijos padėties palyginimas (338 MW - 385 MW)	38
5.4 pav. Dujų turbinos kompresoriaus mentelių realaus objekto ir simuliacijos padėties palyginimas (293 MW - 231MW)	38
5.5 pav. Dujų turbinos dujų srauto į degimo kamerą realaus objekto ir simuliacijos verčių palyginimas (355 MW - 412 MW)	39
5.6 pav. Dujų turbinos dujų srauto į degimo kamerą realaus objekto ir simuliacijos verčių palyginimas (412 MW - 292 MW)	40
5.7 pav. Dūmų srauto dujų turbinos išmetime, realaus objekto ir simuliacijos, verčių palyginimas (338 MW - 385 MW).....	40
5.8 pav. Dūmų srauto dujų turbinos išmetime, realaus objekto ir simuliacijos, verčių palyginimas (293 MW - 231 MW).....	41
6.1 pav. Bloko aktyviosios galios, simuliacijų su skirtingomis gamtinių dujų struktūromis, verčių palyginimas.....	45

6.2 pav. Dujų turbinos kompresoriaus mentelių kampo, simuliacijų su skirtingomis gamtinių dujų struktūromis, verčių palyginimas	46
6.3 pav. Gamtinių dujų srauto į dujų turbiną , simuliacijų su skirtingomis gamtinių dujų struktūromis, verčių palyginimas.....	47
6.4 pav. Dūmų srauto dujų turbinos išmetime, simuliacijų su skirtingomis gamtinių dujų struktūromis, verčių palyginimas	47

LENTELIŲ SĄRAŠAS

4.1. lentelė. Dujų turbinos srautų ir galios skaičiavimo bloko parametro vertės ribotuvų reikšmės	31
4.2. lentelė. Gamtinių dujų kaloringumo bloko parametro vertės ribotuvų reikšmės	32
4.3. lentelė. Emisijų skaičiavimo bloko parametro vertės ribotuvų reikšmės	33
5.1 lentelė. Simuliacijos ir realaus objekto charakteringųjų kreivių standartinio nuokrypio bei įvestos šuolinės trikdžio reikšmės	35
5.2 lentelė. Gamtinių dujų struktūra naudota modelio adekvatumo tyrimo metu	41
5.3 lentelė. Simuliacijos metu išskaičiuotų parametrų reikšmės	42
6.1. lentelė. Gamtinių dujų struktūra naudota modelio adekvatumo tyrimo metu	44
6.2 lentelė. Simuliacijos, naudojant realaus objekto dujų struktūra ir simuliacijos naudojant pakeistą dujų struktūra, reikšmių standartinio nuokrypio paskaičiavimo lentelė.....	45
6.3 lentelė. Simuliacijos metu išskaičiuotų parametrų reikšmės	48

IVADAS

Šiandienos energetikos sektoriaus aktualijos – aplinkos taršos minimizavimas bei proceso optimizavimas. Pastarąjį galima pavadinti proceso automatizavimu. Procesą reguliuojant žmogui atsiranda paprastasis žmogiškasis faktorius. Tai reiškia, jog neišvengiamai kažkuriuo proceso darbo metu gali būti priimamas netinkamas sprendimas, kurio pasekmės gali būti įvairios. Todėl procesus stengiamasi automatizuoti ir taip pašalinti žmogiškojo faktoriaus įtaką. Tačiau viskas priklauso nuo kaštų ir proceso svarbos. Tokie objektai, kaip kombinuoto ciklo dujų ar garo turbinos, yra kertiniai energetinių blokų įrenginiai. Todėl norint juos apsaugot nuo staigių režimų pasikeitimo ar nenumatytų stabdymų, į šių įrenginių valdymo sistemas įvedama kuo daugiau, taip vadinamų, saugiklių, kurie turi padėti išvengti šių situacijų. Vienas iš tokių saugiklių – matematinis objekto modeliavimas. Jis gali būti įgyvendintas tiek objektą valdančiame valdiklyje, tiek matematinio modeliavimo aplinkoje. Pirmu atveju valdiklyje lygiagrečiai veikiantis matematinis objekto modelis išduoda papildomą informaciją apie procesą, kadangi galime sulyginti realiai išmatuotą ir teorinę proceso būsenas. Antru atveju atliekamas modeliavimas norint ištirti, kaip įrenginys dirbs įvedus kokį nors trikdį. Tokiu būdu prognozuojama, kaip objektas elgsis prie įvairių nestandartinių situacijų.

Šiame baigiamajame magistro projekte aprašomas sudaromas matematinis realaus objekto – kombinuoto ciklo jėgainės dujų turbinos - modelis. Matematinis aprašas realizuojamas *Matlab* programinio paketo *Simulink* aplinkoje. Tokio modelio paskirtis - tirti turbinos parametrų pokyčius esant nestandartinėms situacijoms. Sudarant objekto modelį, svarbu suprasti realaus įrenginio veikimo principus, technologiją. Tik sukaupus šias žinias, įgyvendinamas modeliavimo procesas. Todėl šio darbo pradžioje atliekama literatūros analizė, kuri suteiks žinių suprasti kombinuoto ciklo jėgainės dujų turbinoje vykstančius procesus ir jų valdymą. Sudaromas modelis ir vykdomas modeliavimo bei gautų rezultatų analizavimo procesas. Atliekama pagal realų objektą sukurto matematinio modelio gautų rezultatų analizė, kuri įgalina išsiaiškinti, kaip pakitus gamtinių dujų, tiekiamų į kombinuoto ciklo jėgainės dujų turbinos degimo kamerą, struktūrai ir keičiantis turbinos apkrovai įtakojami kiti dujų turbinos parametrai. Modelyje naudojamos atvirojo tipo sistemos, kadangi matematiniam apraše nenaudojamas grįžtamasis ryšys. Vykdikliai matematiškai aprašomi šio darbo eigoje, modeliuojami prie nekintančios gamtinių dujų struktūros. Todėl pakeitus šių dujų struktūrą galėsime matyti, kaip tiksliai išlaikomi parametrai.

Darbo tikslas – sudaryti kombinuoto ciklo dujų turbinos matematinį modelį ir atlikti jos parametrų dinamikos modeliavimą, keičiant turbinos apkrovimą ir gamtinių dujų struktūrą.

Darbo uždaviniai:

1. Apžvelgti kombinuoto ciklo bei jį sudarančių Rankino ir Braitono ciklų technologijas.
2. Atlikti rinkoje esančių kombinuoto ciklo dujų turbinų matematinių modelių apžvalgą.
3. Sudaryti kombinuoto ciklo dujų turbinos matematinį modelį pagal realaus objekto duomenis ir patikrinti jo adekvatumą su realiu objektu.
4. Atlikti kombinuoto ciklo dujų turbinos matematinio modelio parametrų dinamikos modeliavimą, keičiant gamtinių dujų struktūrą bei turbinos apkrovimą.

TEORINĖ DALIS

1. JĖGAINIŲ DARBO CIKLŲ APŽVAGA

Pasaulyje yra įvairių jėgainių tipų, kurios skiriasi savo veikimo technologija, tačiau didėjant energijos sunaudojimui ieškoma, kaip patobulinti turimas technologijas, pagerinti energijos išgavimo efektyvumą, paskirstymą ir sunaudojimą. Kiekvienas energijos išgavimo būdas turi tiek privalumų, tiek trūkumų (pvz.: tarša, sąnaudos ir kt.), todėl turimų technologijų tobulinimas yra viena iš svarbiausių užduočių mums ir ateities kartoms.

Pagal pirminės energijos šaltinį jėgainės skirstomos į: šilumines, branduolines, geotermines, hidroelektrines, hidroakumuliacines, potvynių arba bangų, vėjo ir saulės elektrines. Šiuo metu yra tik dviejų tipų jėgainės, kurios tam, kad išgautų energiją, degina kūrą, tai - iškastinio kuro ir atominės jėgainės. Jos naudoja šiluminį variklį tam, kad karščio energiją paverstų elektros energija. Šiluminiu varikliu vadiname mechanizmą, dalyvaujantį termodinamiame cikle ir dėl karščio perėjimo iš aukštos temperatūros korpuso į žemos temperatūros korpusą, atliekantį tam tikrą teigiamo darbo dalį [1].

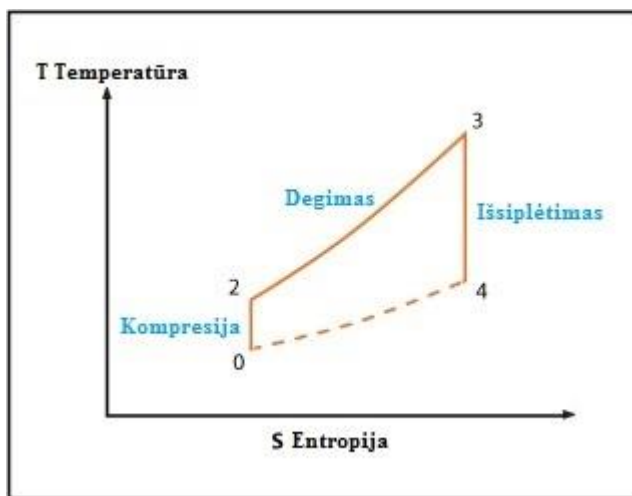
Minėtas būdas šilumos perdavimą panaudoti pastoviam energijos gaminimui yra labiausiai paplitęs tarp energijos išgavimo būdų, tačiau norint, kad elektros energija būtų gaminama nuolat, būtinas termodinaminis proceso ciklas. Termodinaminis ciklas - tai bet koks termodinaminių procesų veiksmas, kai darbinis skystis grąžinamas į jo pirminę būseną [2]. Kad paveiktų šilumos perdavimą ir taip atliktų teigiamą darbą, šiluminis variklis per ciklą naudoja darbinį skystį, garą, orą ir kt.

Į kombinuoto ciklo sudėtį įeina Rankino ciklas ir Braitono ciklas, kurie skiriasi savo efektyvumu ir naudojamo kuro kaštais. Rankino ciklas yra termodinaminis ciklas, kuris paverčia šilumą į darbą. Jį sudaro procesų seka, kuomet naudojant tam tikrą medžiagą šilumos energija virsta mechanine energija [3]. Tokia medžiaga dažniausiai yra vanduo/garai. Rankino ciklą paprastai sudaro katilas (šilumos šaltinis), turbina (perdirbanti į mechaninę energiją) ir kondensatorius (šilumos rinktuvas) [4, p. 5]. Įprastinis Rankino ciklo efektyvumas svyruoja nuo 27 proc. iki 35 proc. Rankinio ciklą efektyvumu pranoksta Braitono ciklas, dar vadinamas dujų turbinos ciklu. Tai termodinaminis ciklas, kuris apibūdina pastovaus slėgio šiluminio variklio darbą.[5] Ankstyvosios dujų turbinos ciklo versijos buvo itin neveiksmingos, tačiau 20 amžiaus viduryje jas patobulinus, ciklų efektyvumas padidėjo iki 25 proc. ir šis lygis išlaikytas iki 8-ojo dešimtmečio vidurio. Šiandien dujų turbinų efektyvumas per paprastą ciklą svyruoja nuo 38 proc. iki 45 proc. [6]. Nepaisant to, kad Rankino ciklas yra mažiau efektyvus, jo naudojimas gali būti pigesnis dėl mažesnių kuro kainų. Nors

kiekvienas šių ciklų turi trūkumų, tačiau apjungus šiuos ciklus kombinuoto ciklo jėgainėje, padidėja jų bendrasis efektyvumas.

1.1 Braitono ciklas

Braitono ciklas pavadintas amerikiečių mechanikos inžinieriaus Džordžo Braitono garbei. Braitono ciklas gali būti atviras ir uždaras. Šioje apžvalgoje bus aptariamas atvirasis ciklas, kadangi jis geriausiai atitinka šio darbo tikslus. Idealiame atvirajame Braitono cikle darbinis kūnas yra atmosferos oras, kuriam priskiriamos idealiųjų dujų savybės, o šilumos nukreipimo procesas vyksta atmosferoje, nes turbinos išmetamosios dujos išleidžiamos per išmetamąjį vamzdį [7, p. 127].



1.1 Pav. Braitono ciklas [8]

Dujų turbinos ciklas yra pastovaus srauto ciklas, kuriame yra palaikomas pastovus slėgis ir nuolat papildomas šilumine energija [9, p. 1]. Šį idealųjį termodinaminį ciklą, kuris nusako dujų turbinos veikimą, iliustruoja 1.1 paveiksle pateikiamas atvirasis arba paprastasis ciklas, temperatūrų ir entropijos koordinačių sistemoje. Šis ciklas charakterizuoja dujų turbiną, kaip atskirą, energiją gaminantį įrengimą. Čia šiluminis naudingumo koeficientas priklauso nuo suspaudimo laipsnio, kurį padidinus kyla patenkančių į turbiną dujų temperatūra, taigi jo pokytis lemia išgaunamo darbo pokytį [9, p. 3]. Apatinė slėgio kreivė žymi atmosferos slėgį – oro spaudimą prieš kompresiją, o viršutinė kreivė žymi oro spaudimą po kompresijos. Tokiu būdu oras yra suslegiamas procese tarp 1 ir 2 žingsnių, naudojant ašinį srauto kompresorių. Vėliau į sistemą įvedamas kuras ir uždegimo šaltinis. Vykstant degimui, procese tarp 2 ir 3 žingsnių, į sistemą yra nukreipiama šiluma. Kadangi pastovų slėgį žyminčios kreivės skiriasi nuo kylančios temperatūros ir entropijos, dėl šio skirtumo paprastojo ciklo dujų turbina pagamina naudingą darbą. Darbas išgaunamas turbinoje, procese tarp 3 ir 4 žingsnių, kai plečiasi degimo metu įkaitusios dujos. Taigi turbinos pagamintas darbas viršija darbą,

sunaudotą kompresoriaus procese tarp 0 ir 2 žingsnių. Tokiu būdu pagaminamas naudingasis darbas, kuris skirtas sukurti elektros generatorių.

Labai svarbi dujų turbinos dalis yra daugiapakopis ašinis srauto kompresorius, kurio dėka oras suspaudžiamas iki daugelio atmosferų slėgio. Kompresorius padeda išgauti maksimalų turbinos darbo pajėgumą, nes geba valdyti oro srauto pasipriešinimą. Dujų turbinos kompresorius naudoja kreipiamąsias mentės, kurias uždaro arba atidaro, siekiant valdyti oro srautą, judantį kompresoriumi. Taip pat yra numatytos ir kitos atsargumo priemonės, kurios užkerta kelią oro nutekėjimui iš kompresoriaus. Kompresorius, reguliuodamas oro srautą, geba veikti daliniu pajėgumu arba visu pajėgumu, kuomet dėl aerodinaminio dizaino savybių nepatiria oro pasipriešinimo.

Dujų turbinos degimo kamera – tai įrenginys, kuris talpina suslėgtą orą bei kurą, reikalingus degimo procesui užtikrinti [10]. Degimas turi vykti esant minimaliam slėgio praradimui ir emisijai. Šis procesas pakelia darbinį dujų temperatūrą [11, p. 12.1]. Darbinių dujų temperatūra vidutiniškai pakyla iki 1300°C. Tuomet įkaitintos dujos juda iš degimo kameros į turbiną.

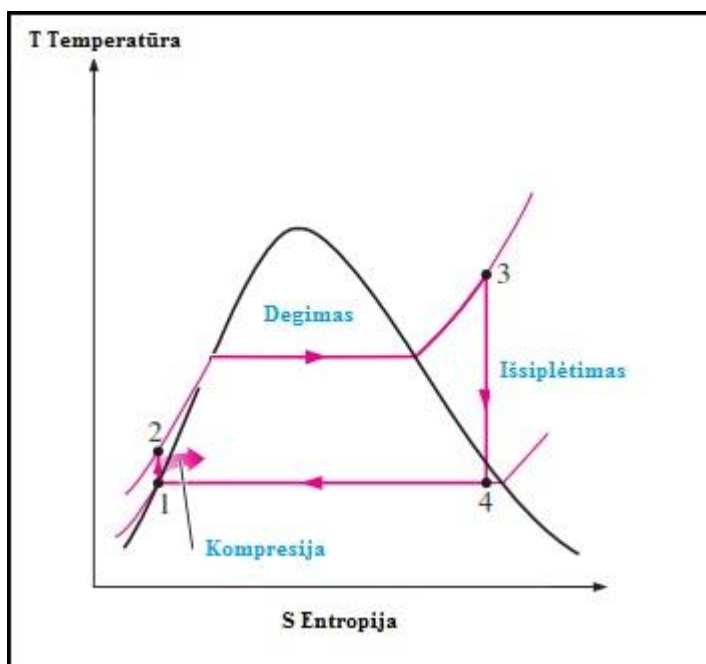
Dujų turbinoje iš aukšto slėgio įkaitusių ir dėl to besiplečiančių dujų, mažinant spaudimą iki atmosferinio, yra išgaunamas darbas. Dujoms paliekant degimo kamerą, jų temperatūra gerokai viršija kreipiamųjų aparatų ir pirmojo laipsnio menčių konstrukcijos detalių lydymosi temperatūrą, todėl norint užtikrinti tolygų jų veikimą, ypatingą dėmesį reikia skirti komponentų aušinimui pirmuosiuose turbinos laipsniuose [12]. Kai dujos praeina pro turbinos kreipiamuosius aparatus ir mentes, dujų temperatūra ir slėgis atitinkamai mažėja, jų terminei energijai virstant mechaniniu sukimo darbu. Perėjusios per turbiną, įkaitusios dujos vėsta, tačiau ir toliau plečiasi. Tuo metu jų temperatūra siekia apie 650°C, taigi ženklus energijos kiekis dar gali būti panaudotas virinant ar perkaitinant vandenį kombinuoto ciklo jėgainėje [13]. Būtent toks atliekamos energijos panaudojimas žymiai padidina kombinuoto ciklo efektyvumą, lyginant su paprastuoju ciklu.

1.2 Rankino ciklas

Rankino ciklas pavadintas škotų mechanikos inžinieriaus, fiziko ir matematiko William John Macquorn Rankine garbei. Šis ciklas yra pagrindinis idealusis termodinaminis energijos ciklas, naudojantis garo turbiną. Šio ciklo metu darbinis skystis yra nuolat garinamas ir kondensuojamas. Skirtingai nuo Braitono Ciklo, kurio principu veikiančioje dujų turbinoje darbinis kūnas yra oras, garo turbinos ciklas naudoja vandenį (garą).

1.2 paveiksle pavaizduota Rankino ciklo diagrama (temperatūros ir entropijos koordinačių ašyse). Šį garo energijos ciklą sudaro keturi komponentai, kurių kiekvienas keičia darbinio skysčio būseną ir pasižymi savitu termodinaminiu procesu. Pirmiausia siurblyje vyksta kompresija be šilumos

perdavimo. Darbinis skystis yra pumpuojamas nuo mažo iki didelio slėgio, kadangi šioje būsenoje darbinis skystis yra skysčio būsenoje, siurblys šiam procesui reikalauja įdėti energijos (1 – 2 žingsniai). Vanduo yra atitinkamai suslegiamas, kad patektų į katilą (ŠUGG). Tuomet, esant aukštam ir pastoviam slėgiui, darbinis skystis yra kaitinamas iš išorinio šilumos šaltinio į ŠUGG (2 – 3 žingsniai). Toliau turbinoje vyksta sauso garo plėtimasis be šilumos perdavimo (3 – 4 žingsniai), kas lemia, kad garo energija virsta mechanine energija, kuri suka bloko veleną. Tai sumažina temperatūrą ir garų slėgį, ko pasekoje garai kondensuojasi. Galiausiai, kondensatoriuje susidarius pastoviam slėgiui (vakuumui) ir temperatūrai, išleidžiama šiluma (4 – 1 žingsniai) [14].



1.2 pav. Rankino ciklas [16]

Taigi Rankino ciklo termodinaminiai procesai yra identiški Braitono ciklui: 1) kompresija be šilumos perdavimo, 2) kaitinimas esant pastoviam slėgiui, 3) kūno plėtimasis be šilumos perdavimo, 4) šilumos išleidimas, esant pastoviam slėgiui. Skirtumas tarp Braitono ir Rankino ciklų yra tas, kad Rankino cikle šilumos įvedimo procesui yra būtinas šilumokaitis. Šilumokaitis (kondensatorius) taip pat naudojamas šilumos išleidimui iš sistemos.

Kaip aptarta prieš tai buvusiuose skyriuose, garo ir dujų turbinų ciklai dirba su sąlyginai dideliais nuostoliais. Nors dujų turbino ciklas efektyvesnis, tačiau jo kuro kaštai yra dažniausiai didesni. Taip yra švaistomi dideli energijos kiekiai.

1.3 Kombinuotas ciklas

Jėginių efektyvumą galima padidinti sujungus dujų ir garo jėgaines į kombinuoto ciklo bloką, kuomet iš dujų jėgainės išmetami produktai yra visiškai ar iš dalies panaudojami garo jėgainės cikle. Tokiu būdu išgaunama iki 60 proc. daugiau elektros energijos iš to paties kuro kiekio, nei paprastų ciklų jėgainės [17, 18]. Paprastoje dujų turbinoje didžioji dalis efektyvumo prarandama dalį šilumos energijos pašalinant kartu su išmetamosiomis dujomis. Norint išnaudoti šią energijos rezervą, išmetamųjų dujų kelyje yra įrengiamas šilumą utilizuojantis garo generatorius (ŠUGG). Jis sulaiko išskiriamą šilumą iš dujų turbinos, gamina garus iš garo turbinos nepanaudoto karščio ir tiekia juos į garo turbiną [16]. Taigi šio įrenginio tikslas – utilizuoti kuo didesnę šilumos energijos kiekį ir gaminti garą. Tokios konstrukcijos privalumas - bendras įrenginio efektyvumas. Gaunamos elektros energijos kiekis, lyginant su įvedamos šilumos energijos kiekiu, žymiai didesnis, nei paprastajame dujų turbinos ar garo turbinos cikle atskirai. Kombinuoto ciklo sistema suteikia galimybę išsaugoti didelę dalį šilumos, kuri kitaip būtų prarasta. Garas iš ŠUGG varo garo turbiną, kuri, savo ruožtu, suka generatorių, gaminantį papildomą elektros energiją. [16] Taigi kombinuoto ciklo technologija leidžia iš to paties karštųjų dujų kiekio pagaminti elektrą dukart: pirmąkart – dujų turbinos cikle, antrąkart – garo turbinos cikle. Dėl šios technologijos kombinuotas ciklas yra efektyvesnis už dujų ar garo turbinas atskirai.

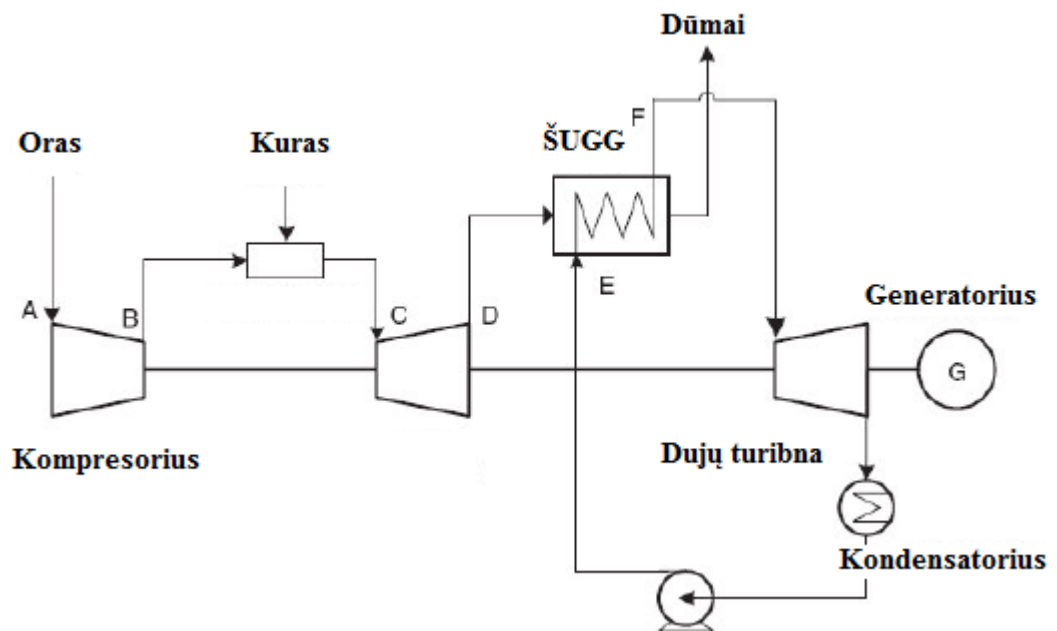
Šilumos, išmetamųjų dujų perduodamos vandeniui / garui, kiekis ŠUGG priklauso nuo dviejų veiksnių: 1) karštųjų dujų, pereinančių per ŠUGG, kiekio ir 2) išmetamųjų dujų temperatūros. Kad tarp išmetamųjų dujų ir vandens / garo būtų paskatintas šilumos perdavimas, turi egzistuoti temperatūrų skirtumas. Pavyzdžiui, kuomet dujų turbina veikia esant darbinei apkrovai, išmetamųjų dujų temperatūra paprastai vidutiniškai 30°C viršija garo temperatūrą. Tai svarbu, nes jokioje ŠUGG dalyje garo temperatūra negali būti aukštesnė nei atitinkamų išmetamųjų dujų.

Šios sąlygos taikytinos tik tuomet, kai turbina veikia esant darbinei apkrovai. Sumažinus apkrovą iki 50 proc., arba ½ nuo bazinės apkrovos, dujų turbina efektyviai suksis tuo pačiu greičiu, o kompresorius, degimui užtikrinti, įleis tokį patį oro kiekį [17]. Kadangi degimui užtikrinti su tuo pačiu oro kiekiu sumaišoma mažiau degalų, išmetamųjų dujų srauto galia išlieka ta pati, tačiau nukrenta temperatūra. Tokiomis sąlygomis perduodama mažiau šilumos energijos, dėl to sumažėja pagaminto garo kiekis.

Panašus garo temperatūros mažėjimas, savo ruožtu, atsirastų ir žemo ar vidutinio garo slėgio dalyje. Tokiu būdu, mažėjant garo temperatūrai ir silpstant srautui, efektyvumas taip pat sumažėja. Didesnį nerimą kelia tikimybė, kad dėl žemesnės garo temperatūros gali įvykti dalinė garo

kondensacija paskutiniuose garo turbinos laipsniuose, ko pasekoje gali atsirasti garo turbinos menčių pažeidimas.

Tam, kad būtų palaikomas kuo lankstesnis ir optimaliai efektyvus ciklo veikimas, svarbu išnagrinėti ir pritaikyti alternatyvius valdymo metodus. Vienas iš sprendimų yra kontroliuoti dujų turbinos kompresoriaus mentelių padėtį. Tai sudaro galimybę keisti oro, patenkančio į dujų turbinos degimo kamerą, kiekį. Kuomet apkrova sumažėja, kompresoriaus mentelių kampas mažinamas, palaikant aukštą išmetamųjų dujų temperatūrą, kad būtų optimizuota garo gamyba. Išmetamųjų dujų srauto susilpnėjimas reiškia, kad prieinamos šilumos energijos kiekis vis dėlto yra mažesnis nei darbinės apkrovos metu, tačiau, pakilus išmetamųjų dujų temperatūrai, garas išliks norimos temperatūros ir bus išvengta galimų problemų susijusių su garo turbina.



1.3 pav. Kombinuotas ciklas [18]

1.4 Skyriaus apibendrinimas

1. Tiek Braitono, tiek Rankino ciklai naudojami išgauti elektros energiją, tačiau Braitono ciklo metu patiriami per dideli šiluminės energijos iššvaistymo nuostoliai. Taigi Braitono ciklo efektyvumas, palyginti su Rankino ciklo, yra mažesnis. Tuo tarpu Rankino ciklo metu naudojamas brangesnis kuras, reikalingas pagaminti garus, kurie suka garo turbinos rotorių.

2. Kombinuotas ciklas, apjungdamas minėtus ciklus, padidina išgaunamos elektros energijos kiekį, panaudojant likutinę šilumos energiją iš karštų išmetamųjų dujų, atsiradusią Braitono ciklo

nepakankamo efektyvumo dėka, tiekiant jas pagaminti garus garų turbinai, kad generuotų papildomą elektros energiją. Tokiu būdu elektros energijos išgavimo efektyvumas padidėja iki 60 procentų.

2. OBJEKTŲ MATEMATINIAI MODELIAI

Matematiniai modeliai, skirti aprašyti objektą, naudojami įvairiais tikslais. Vienas iš jų - išskaičiuoti parametrus, kurie objekte nėra matuojami, kuriuos žinome ir galime ar turime išmatavę fiziškai. Tai gali padėti technologui geriau orientuotis proceso eigoje. Taip pat galimas variantas, kai parametrai yra išskaičiuojami matematinėmis lygtimis ir tuo pačiu metu išmatuojami fiziškai. Tokiu atveju atsiranda galimybė sulyginti teorinę ir realią parametro vertes. Esant verčių skirtumams, ieškoma priežasties, kuri turėjo įtakos skirtumų atsiradimui. Tai tarsi prevencinė priemonė, kuri suteikia didesnę sistemos patikimumą ir atkreipia dėmesį į objekto taškus, kurie galbūt yra probleminiai.

Išskaičiuotos vertės, kaip minėta praeitoje pastraipoje, gali pasitarnauti technologui ar operatoriui valdant procesą, tačiau tokios matematinėmis lygtimis gautos parametru vertės nėra naudojamos proceso valdymo logikoje. Turime omenyje, jog fiziškai neišmatuoti parametrai negali būti naudojami valdiklio algoritme, kuris valdo procesą ir apsprendžia, kokie bus atliekami veiksmai esant vienokiai ar kitokiai parametro vertei.

Dažnai matematiniai objektų modeliai sudarinėjami norint ištirti, kaip objektas elgsis prie tam tikrų sąlygų pasikeitimo. Tokiu atveju sudarinėjamas matematinis modelis, remiantis realiais objekto duomenimis, kurie nusako jo dinamiškumą tam tikroje reikšmių amplitudėje. Taigi turint realaus objekto informaciją, sudaromas jo matematinis aprašas, kuriame įvedami: trikdys, apkrovimas ar kiti sistemos testavimo kriterijai, kurių įtaka objektui yra tiriama. Atlikus matematinio objekto modelio reakciją į tam tikrą nuostatą, registruojamos objekto charakteristikų vertės ir atliekama duomenų analizė. Toliau vyksta matematinio modelio tobulinimo darbai ir vėl kartojamas bandymas, kol pasiekama norima objekto reakcija. Tokiu atveju matematinio objekto aprašu atlikti tyrimai ir pakeitimai realizuojami realiame objekte. Kitais atvejais, remiantis apie objektą gautais duomenimis, tiesiog sudaromos tam tikros išvados. Viskas priklauso nuo tyrimo projektą atliekančio inžinieriaus tikslų.

Šis projektas būtent toks, kurio metu bandoma ištirti objekto reakciją pakitus normalioms sąlygoms – pasikeitus į dujų turbiną tiekiamų gamtinių dujų struktūrai. Atlikti tokiam tyrimui svarbu išanalizuoti informaciją apie patį įrenginį ar procesą, kuris tiriamas, o taip pat žinoti technologiją ir faktorius, kurie procesui gali turėti įtakos. Reikia įvertinti kiekvieną faktorių, kuris gali būti svarbus

atliekant tyrimą. Būtent todėl, kad neliktų neįvertintų veiksnių įtakos procesui, sudarius matematinį modelį būtina jį patikrinti ir įvertinus gautus duomenis teigti, jog šis objekto matematinis aprašas tenkina savo adekvatumu ir gali būti naudojamas tolesniuose tyrimuose arba netenkina ir turi būti tobulinamas, ieškoma priežastis, dėl kurios gautos parametrų vertės nėra artimos tomis pačiomis sąlygomis gautoms realaus objekto charakteristikoms.

2.1 Rinkoje esantys dujų turbinų matematiniai modeliai

Atliekant jau sukurtų matematinų dujų turbinos modelių apžvalgą, išsiaiškinta, jog matematiniai parametrų išskaičiavimai – dažna saugesnių valdymo sistemų sudedamoji dalis. Tačiau tokio tipo matematinio modelio, kuriame būtų sudaryti pagrindinio dujų turbinos ciklo skaičiavimai, pavyko rasti nedaug. Vienas iš tokių modelių yra juodos dėžės modelis, sukurtas kompanijos „General Electric“. Matematinis modelis realizuotas „Mark Vie“ paskirstyto valdymo sistemoje. Valdikliuose realizuojamas lygiagrečiai realiam procesui veikiantis, matematinėmis išraiškomis aprašytas, modelis. Kaip rašoma „Mark Vie“ produkto dokumentacijoje, viena iš matematinio modelio funkcijų – realių matavimų adekvatumo lygio nustatymas pagal išskaičiuotas matematiškai tų pačių taškų vertes. Vizualizacijos languose šalia išmatuotos parametro vertės atvaizduojamas parametro patikimumo indeksas. Vienetas reiškia, jog išmatuoto ir išskaičiuoto parametro reikšmės identiškos arba su mažu leistinu nuokrypiu. Parametro patikimumo indeksui artėjant link nulio, mažėja išmatuotos vertės teorinis tikslumas. Tokiu atveju būtina patikrinti, ar jutiklio išmatuota ir perduota į valdymo sistemą reikšmė yra teisinga. Esant vieno taško tripleksuotai indikacijai, parametras, kurio patikimumo indeksas žemesnis nei nustatyta, išvedamas iš valdymo. Pastarojo jutiklio reikšmė valdyme nenaudojama kol patikimumo indeksas neatsistato į leistinas ribas. Taip apsaugojama nuo klaidingo proceso valdymo, kadangi dažnai esant tripleksuotam arba dubleksuotam matavimui, proceso valdymui naudojama vidutinė išmatuota parametro vertė.

„General Electric“ dujų turbinos matematinis modelis naudojamas, norint sumažinti energetinio bloko atsijungimo galimybę. Žinant, jog matavimas atvaizduoja klaidingas vertes, galima greitai reaguoti ir bandyti sutaisyti ar pakeisti probleminę įrangą, kol procesas dar nespėjo išsibalansuoti.

Dar vienas „Mark Vie“ paskirstyto valdymo sistemoje realizuojamo matematinio modelio tikslas yra perduoti reguliatorių parametrus pagal tiekiamų gamtinių dujų struktūrą. Chromatografai išanalizuoja gamtinių dujų sudėtį ir gautus duomenis siunčia į valdymo sistemą. Matematinio modelio pagalba vyksta sistemos perreguliavimas pagal tam tikrą, tik „General Electric“ žinomą, algoritmą.

Šis perreguliuojimas reikalingas padidinti bloko efektyvumą ir sureguliuoti dujų turbinos degimo kameroje vykstantį degimo procesą.

Kompanijų sukurti tokio tipo matematiniai modeliai yra priskiriami prie „know-how“ produktų, todėl visa informacija, susijusi su modelio realizacija, yra užrakinta. Ir tai yra suprantama, kadangi įmonės konkuruoja tarpusavyje ir nenori išduoti savo produkto paslapčių.

2.2 Skyriaus apibendrinimas

1. Atlikus matematinių modelių sudarymo ir panaudojimo analizę, galima teigti, jog sudaryti matematinį objekto modelį, kuris atitiktų realų objektą 100 proc., neįmanoma. Visi sudaryti objekto modeliai turės tam tikrą paklaidą, kadangi realų objektą gali veikti daug faktorių, nors ir nežymiai ar ne visais laiko momentais, tačiau turi įtakos objekto parametrų reikšmėms.

2. Įvertinus, jog kompanijos, kurios realizuoja savo produktuose matematinius objekto aprašus, visą informaciją, kuri susijusi su įgyvendintu programos algoritmu ar struktūra, laiko paslapyje, galima teigti, jog objekto matematinio modelio sukūrimas, kuriuo galėtų naudotis technologai, inžinieriai, būtų naudingas. Tokiu atveju žinant savo objekto charakteristikas, galima būtų modeliuoti ar eksperimentuoti proceso valdymu.

3. JĖGAINIŲ EKSPLOATUOJAMOS VALDYMO SISTEMOS

Didelės apimties ir svarbos objektų valdymui naudojamos paskirstyto valdymo sistemos (DCS). Kadangi energetiniai blokai įeina į šią kategoriją, todėl jėgainėse pagrindinės valdymo sistemos visada būna paskirstyto valdymo. Naudojamos įvairių gamintojų sistemos: „Metso“ [19], „General Electric“ [20], „Emerson“ [21], „Siemens“ [22], „ABB“ [23].

Paskirstyto valdymo sistemos nuo centralizuoto valdymo sistemų skiriasi architektūra. Pastarosios sistemos atveju praradus duomenų bazės serverį, darbo stotys, kurios kreipėsi į šį serverį, praras ryšį su valdomu procesu. Taigi tokiu atveju prarandame distancinį objekto valdymą ir negalime matyti, kokioje stadijoje ar režime šis dirba. Tai yra labai pavojinga, nes sistema tampa nevaldoma ir dėl šios priežasties gali būti sugadinta įranga ar fiziškai nukentėti personalas.

Paskirstyto valdymo sistemose pastaroji situacija nesusidarys, jeigu teisingai parinkta tinklo struktūra, kadangi operatorių ir inžinerinio personalo darbo stotys duomenis renka tiesiai iš valdiklio ar keičiasi tarpusavyje. Taigi sugedus kuriai nors iš darbo stočių, proceso valdymas bus galimas iš kitos darbo stoties. Kaip minėta ankstesnėse pastraipose, paskirstyto valdymo sistemos išsiskiria savo stabilumu, kuris atsiranda ne tik dėl paskirstytų duomenų srautų, bet ir dėl dubliuotos valdiklių sistemos. Vienas valdiklis atlieka pirminio valdiklio pareigas ir valdo procesą, kol antrasis eina

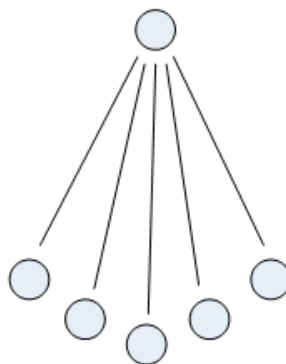
pagalbinio - antrinio valdiklio pareigas ir yra pasiruošęs bet kuriuo momentu perimti proceso valdymą iš pirminio valdiklio, jei šis pereitų į klaidos būseną. Taip pat dubliuoti ir tinklai, kuriuose duomenys perduodami per dubliuotus maršrutizatorius. Tinklų topologija pasirenkama tokia, kad tinklo gedimų atveju duomenys darbo stotis ar valdiklius pasiektų kitais maršrutais. DCS architektūroje kiekviena darbo stotis turi savo paskirtį. Jos būna suskirstytos į inžinerines, operatorių bei istorijos.

Šiame projekte dirbta su istorine darbo stotimi. Buvo atliekama duomenų, gautų iš šios stoties, analizė. Atrinkus charakteringas parametrų vertes, šios eksportuotos į darbalaukį ir naudotos objekto modeliavimo procese. Istorinės stotys svarbios ypač tada, kai atsiranda proceso nuokrypiai ar įvyksta gedimai. Šiame darbe analizuotų jėgainių atvejais labai svarbu turėti parametrų verčių istoriją, kai energetinis blokas dėl tam tikro įvykio atjungiamas nuo elektros tinklo. Tokiu atveju būtina operatyviai išanalizuoti duomenis ir pateikti išvadas, dėl ko energetinis blokas atsijungė, bei pašalinti to priežastį.

3.2 Paskirstyto valdymo sistemų topologija

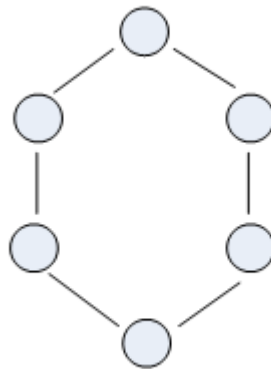
Kaip minėta šio skyriaus pradžioje, projektuojant paskirstyto valdymo sistemos struktūrą svarbu parinkti tinkamą tinklo topologiją. Nuo šios priklausys, kaip darbo stotys bei valdikliai komunikuos tarpusavyje. Taigi nuo parinktos topologijos priklausys, ar tinkle atsiradus gedimui šis turės įtakos proceso valdomumui. Tinklo topologijos gali būti įvairiausios: centralizuoto valdymo, žiedinio valdymo, hierarchinio valdymo bei decentralizuoto valdymo.

Centralizuoto (žvaigždinio) tinklo sistemose (3.1 pav.) centrinė stotis atsakinga už duomenų perdavimą kitoms tinkle esančioms stotims. Esant tokiai tinklo struktūrai, dažniausiai centrinis kompiuteris atlieka serverio darbą bei atsako už duomenų archyvavimą. Taip pat serverio vietoje gali būti naudojamas ir maršrutizatorius. Praradus centrinę stotį, duomenų mainai tampa neįmanomi [24].



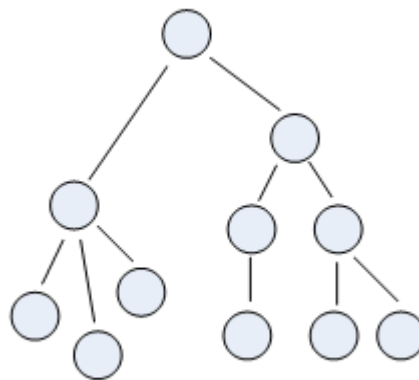
3.1 pav. Centralizuoto (žvaigždinio) tinklo topologija [24]

Žiedinio tinklo topologijoje (3.2 pav.) kiekviena stotis pasiruošusi ne tik perduoti bei gauti duomenis, tačiau ir persiųsti, kadangi visos stotys sujungtos nuosekliai. Todėl norint išsiųsti užklausa ar priimti duomenų paketą, tai vykdome per stotis, esančias informacijos keitimosi kelyje. Susidarius suticijai, kai prarandama komunikacija su keliomis iš žiede esančių stočių, prarandame duomenų mainus ir su stotimis esančiomis tarp jų [24].



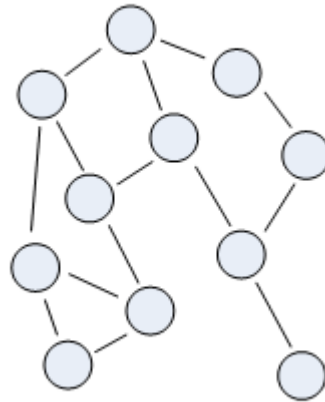
3.2 pav. Žiedinio tinklo topologija [24]

Hierarchinio tinklo topologijoje (3.3 pav.) įvedamas prioritizavimas. Pagal stoties svarbą yra parenkama, kiek fizinių komunikacinių sąlyčio mazgų ši turės [24]. Kadangi tinklo sutrikimų išvengti nepavyks, todėl įvykus mazgo komunikacijos gedimui, stotis gali bendrauti su tinklu per kitus, šiai stočiai projektavimo metu numatytus, fizinius mazgus. Taigi mažesnės svarbos stotys gali turėti tik vieną sąlyčio tašką su tinklu, o svarbesnės - kelis ar daugiau mazgų.



3.3 pav. Hierarchinio tinklo topologija [24]

Decentralizuoto tinklo topologijoje (3.4 pav.) esančios stotys dirba kaip serveris ir kaip klientas. Tokio tipo tinkle praradus kurią nors iš stočių, likusios turės galimybę toliau vykdyti duomenų mainus, naudojant kitus informacijos keitimosi kanalus. Būtent dėl šios savybės decentralizuoto tinklo struktūra yra stabilesnė nei centralizuoto tinklo [24].



3.4 pav. Decentralizuoto tinklo topologija [24]

3.3 Skyriaus apibendrinimas

1. Kaip ir centralizuotose valdymo sistemose, taip ir DCS gedimų išvengti nepavyks. Visi įrenginiai ir sistemos laikui bėgant susiduria su nesklaidumais. Išaušus dienai, kai sistemoje įvyks gedimas, dings ryšys, suges valdymo stotis ar įvyks kitas kritinis gedimas, paskirstyto valdymo sistema išliks valdoma iš kitų darbo stočių - dubliuoto kontrolerio ar dubliuoto tinklo. Gedimo atveju DC sistemoje daugiau saugiklių, apsaugančių nuo proceso stabdymo ir valdymo galimybės praradimo, nei centralizuoto valdymo sistemose.

2. Saugumas paskirstyto valdymo sistemose apsisprendžia projektavimo metu - pradedant naudojama topologija ir baigiant darbo stočių dubliavimu. Blogai parinkta tinklo topologija gali lemti nestabilų proceso valdymą įvykus menkiausiam stoties komunikaciniam gedimui.

MODELIAVIMO DALIS

4. MATEMATINIS KC DUJŲ TURBINOS MODELIS

Šis skyrius skirtas aprašyti sudarytą matematinį kombinuoto ciklo dujų turbinos modelį, taip pat įvertinti matematinio modelio atitikimą realiam objektui. Matematinio modelio sudarymas ir modelio adekvatumo įvardijimas reikalingas tolimesniam tyrimui. Matematiniam modeliui sudaryti pasirinktas *Matlab* įrankių paketas. Modelis sudaromas atvirųjų sistemų principu. Sistema dirba pagal matematinę lygtį be grįžtamojo ryšio.

4.1 Realus objekto duomenų rinkimas

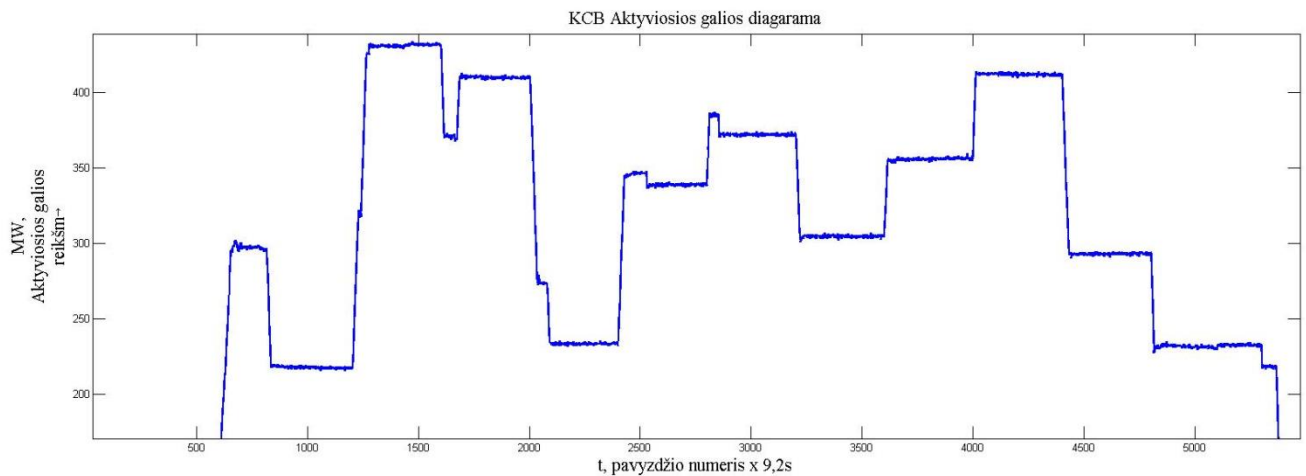
Modelio sudarymui buvo pasirenkami charakteringieji duomenys. Tai duomenys, kurie paveikti šuolinės charakteristikos trikdžio. Pagrindinis trikdžius - aktyviosios galios užduoties staigus pokytis. Naudojantis tokiais duomenimis galima tiksliau atkurti proceso parametrų charakteristikas, pasikeitus proceso darbo režimui.

Duomenys buvo registruojami 9,2 sekundžių intervalu. Toks duomenų registravimo intervalas pasirinktas dėl paskirstyto valdymo sistemos ypatumų. Viename grafiko lange, kuris skirtas istorinių duomenų analizavimui ir eksportavimui, telpa 600 vieno parametro taškų bet kokiu laiko tarpsniu. Taigi teko eksportuoti duomenis devynis kartus po 600 verčių, tarp kurių, kaip ir minėta, apytikriai 9,2 sekundės laiko tarpas. Registravimo laikas apėmė 13 valandų ir 50 minučių. Per šį laiką kombinuoto ciklo bloko darbo režimas keitėsi nuo startavimo režimo iki stabdymo režimo. Tarp bloko startavimo ir stabdymo laiko buvo išlaikomi stabilūs darbo režimai, kuriuose buvo aiškios nusistovėjusios parametrų vertės.

Iš viso surinkta kiekvieno parametro 5400 verčių vienodais laiko momentais. Parametrai, kurių duomenys buvo registruojami :

1. Kombinuoto ciklo bloko momentinės aktyviosios galios užduoties parametras, MW;
2. Kombinuoto ciklo bloko momentinės aktyviosios galios reikšmės parametras, MW;
3. Dujų turbinos gamtinių dujų srautas į degimo kameras, t/h;
4. Dujų turbinos kompresoriaus mentelių kampas, °;
5. Dūmų temperatūra dujų turbinos išmetime, °C;
6. Dūmų srautas dujų turbinos išmetime, t/h;
7. Deguonies kiekis dujų turbinos išmetime, %;
8. Chromatografo rodmenys:

- a) Propanas, %;
- b) Nbutanas, %;
- c) Neopenatas, %;
- d) Isopentanas, %;
- e) Npentanas, %;
- f) N₂, %;
- g) Metanas, %;
- h) CO₂, %;
- i) Etanas, %;
- j) Dujų masės ir tūrio santykis, kg/m³;
- k) Žemutinė šiluminė vertė, MJ/m³.

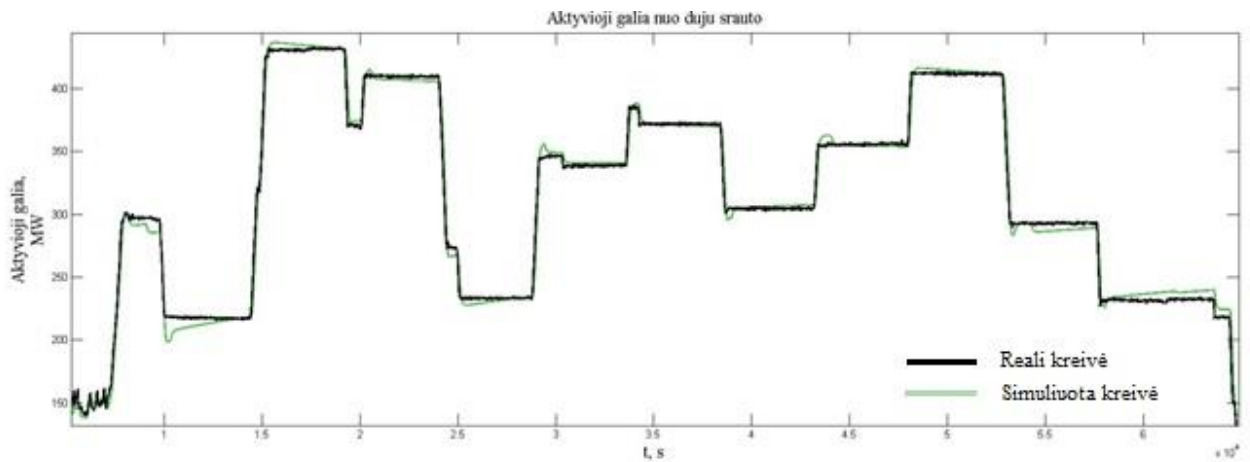


4.1 pav. KCB realaus objekto aktyviosios galios reikšmių diagrama duomenų registravimo metu

4.2 Realaus objekto duomenų analizė

Atlikus realaus objekto duomenų rinkimą, buvo atlikta turimų duomenų analizė. Tiriama, kaip atitinkami parametrai tarpusavyje koreliuoja. Ieškomas tiesioginis ryšys. Buvo lyginamos iš gautų duomenų sudarytos kreivės ir vertinamas technologinis faktorius tam, kad būtų galima nustatyti, kurie parametrai bus naudojami aprašant kitų parametų perdavimo funkcijas.

Perdavimo funkcijoms skaičiuoti buvo pasitelktas *Matlab* įrankis *Ident tool*. Šis įrankis skirtas generuoti įvairiems sistemų modeliams. Iš įvesties ir išvesties duomenų, pasirinkus norimo tipo modelį bei nustačius tam tikrus parametrus, sugeneruojamas norimas sistemos modelis matematine išraiška. Šiuo atveju, kaip minėta ankstesnėje pastraipoje, buvo generuojamos perdavimo funkcijos ir vienas nelinejinis modelis.



4.2 pav. *Ident* įrankiu gautos perdavimo funkcijos simuliuoto išėjimo ir realaus objekto duomenų palyginimas kreivių išraiška (aktyviosios galios perdavimo funkcija išeities signalas nuo gamtinių dujų srauto įvesties signalo).

4.3 Sistemos matematiniai modeliai

Visi parametų matematiniai funkciniai modeliai sudaryti *Ident* įrankio pagalba. Toliau bus pateikiama kiekvieno parametro funkcinio modelio aprašymai bei matematinės išraiškos. Gautos funkcijos tame pačiame *Ident* įrankio lange simuliuotos su iš realaus objekto priskirtomis įėjimų ir išėjimų reikšmėmis. Gautos dvi kreivės, iš kurių viena yra nubrėžta pagal realius parametro duomenis, o kita - iš simuliacijos metu gautų reikšmių, sudaryto funkcinio modelio. Kreivės sulyginamos ir pagal tai, kiek funkcinio modelio simuliacijos metu gautų reikšmių kreivė sutampa su realaus objekto parametro kreive, programiškai apskaičiuojamas funkcinio modelio atitikimo nuošimtis.

4.3.1 Gamtinių dujų srauto perdavimo funkcija

Dujų srautas į dujų turbiną priklauso nuo to, kokią aktyviąją galią norima išgauti. Todėl įvertinus technologiją buvo sugeneruota dujų turbinos gamtinių dujų srautas į degimo kameras perdavimo funkcija pagal KCB aktyviosios galios užduoties reikšmes. Matematinė išraiška:

$$\text{Gamtinių dujų srauto TF} = \frac{7,16 \cdot 10^{-5} s + 3,068 \cdot 10^{-5}}{s^3 + 0,2613s^2 + 0,02582s + 0,0002345}$$

Šios, *Ident* įrankiu paskaičiuotos, perdavimo funkcijos tikslumas 91,84 proc. Funkcijai sudaryti buvo naudojami realaus objekto darbinio režimo duomenys, kai KCB aktyviosios galios užduoties amplitudė nuo 200 MW iki 450 MW, o gamtinių dujų srauto amplitudė nuo 30 t/h iki 60 t/h.

4.3.2 Dujų kompresoriaus mentelių kampo padėties perdavimo funkcijos

Dujų turbinos kompresoriaus mentelių kampo padėtis priklauso nuo dujų srauto į degimo kamerą. Kitaip tariant, turi būti išlaikomas oro ir gamtinių dujų santykis, kuris privalomas norint turėti gerai suderintą degimo procesą. Todėl įvertinus technologiją buvo sugeneruotos dvi, dujų turbinos mentelių padėties pagal gamtinių dujų srautą, perdavimo funkcijos. Buvo pasirinktos dvi perdavimo funkcijos, nes norėta išgauti tikslesnes simuliacijos reikšmes, kadangi prie skirtingų dujų srautų nevienodai kinta kompresoriaus mentelių kampas. Pirmoji perdavimo funkcija aprašo modelio mentelių kampo padėtį, kai gamtinių dujų srautas į degimo kamerą nuo 30 t/h iki 40 t/h. Matematinė šios funkcijos išraiška:

$$\text{Kompresoriaus kampo TF1} = \frac{0,006179s + 1,321 \cdot 10^{-5}}{s^4 + 0,5914s^3 + 0,007843s^2 + 0,005493s + 9,452 \cdot 10^{-6}}$$

Šios perdavimo funkcijos *Ident* įrankiu paskaičiuotas tikslumas - 91,58 proc. Funkcijai sudaryti buvo naudojami realaus objekto darbinio režimo duomenys, kai gamtinių dujų srautas didesnis nei 25 t/h, bet mažesnis nei 40 t/h, o dujų kompresoriaus mentelių kampo amplitudė nuo 30° iki 65°.

Antroji perdavimo funkcija aprašo modelio mentelių kampo padėtį, kai gamtinių dujų srautas į degimo kamerą didesnis nei 40 t/h. Matematinė šios funkcijos išraiška:

$$\text{Kompresoriaus kampo TF2} = \frac{1,729s + 0,006943}{s^2 + 0,98s + 0,004497}$$

Šios perdavimo funkcijos *Ident* įrankiu paskaičiuotas tikslumas - 94,3 proc. Funkcijai sudaryti buvo naudojami realaus objekto darbinio režimo duomenys, kai gamtinių dujų srautas didesnis nei 40 t/h, o dujų kompresoriaus mentelių kampo amplitudė nuo 65° iki 85°.

4.3.3 KCB aktyviosios galios perdavimo funkcija

Aktyviosios galios reikšmė realaus objekto valdymo sistemoje registruojama tik viso bloko bendrai, neišskiriant, kiek galios gamina dujų turbina, o kiek - garo. Todėl realizuojant matematinį modelį bus naudojama ne dujų turbinos, bet viso bloko aktyviosios galios reikšmės. Apskaičiuoti aktyviają KCB galią pasirinkau pagal dujų srautą. Įvertinau, jog didėjant dujų srautui, didėja ir bloko generuojama momentinė galia. Todėl KCB aktyviosios galios perdavimo funkcija skaičiuota pagal gamtinių dujų srautą į dujų turbinos degimo kamerą. Matematinė išraiška:

$$\text{Bloko aktyviosios galios TF} = \frac{1 + 11765s}{(1 + 9711,3s) * (1 + 79,037s)}$$

Šios perdavimo funkcijos *Ident* įrankiu paskaičiuotas tikslumas - 91,9 proc. Funkcijai sudaryti buvo naudojami realaus objekto darbinio režimo duomenys, kai gamtinių dujų srautas nuo 20 t/h iki 60 t/h, o KCB aktyvioji galia nuo 200 MW iki 450 MW.

4.3.4 Dujų turbinos dūmų srauto perdavimo funkcija

Dūmų srautas dujų turbinos išmetime priklauso nuo gamtinių dujų ir oro srautų į dujų turbinos degimo kameras. Kadangi oro srauto reikšmių neturime, tačiau turime dujų turbinos kompresoriaus mentelių padėtį, kuri valdo oro padavimą į degimo kamerą, todėl ir dūmų srauto dujų turbinos išmetime perdavimo funkcija aprašoma pagal dujų turbinos kompresoriaus mentelių kampo padėties reikšmes. Matematinė išraiška:

$$\text{Dūmų srauto TF} = \frac{70,32s + 0,06393}{s^2 + 2,601s + 0,002135}$$

Šios perdavimo funkcijos *Ident* įrankiu paskaičiuotas tikslumas - 92,24 proc. Funkcijai sudaryti buvo naudojami realaus objekto darbinio režimo duomenys, kai dujų kompresoriaus mentelių kampo padėties reikšmės nuo 40⁰ iki 85⁰, o dūmų srauto dujų turbinos išmetime reikšmės nuo 1500 t/h iki 2500 t/h.

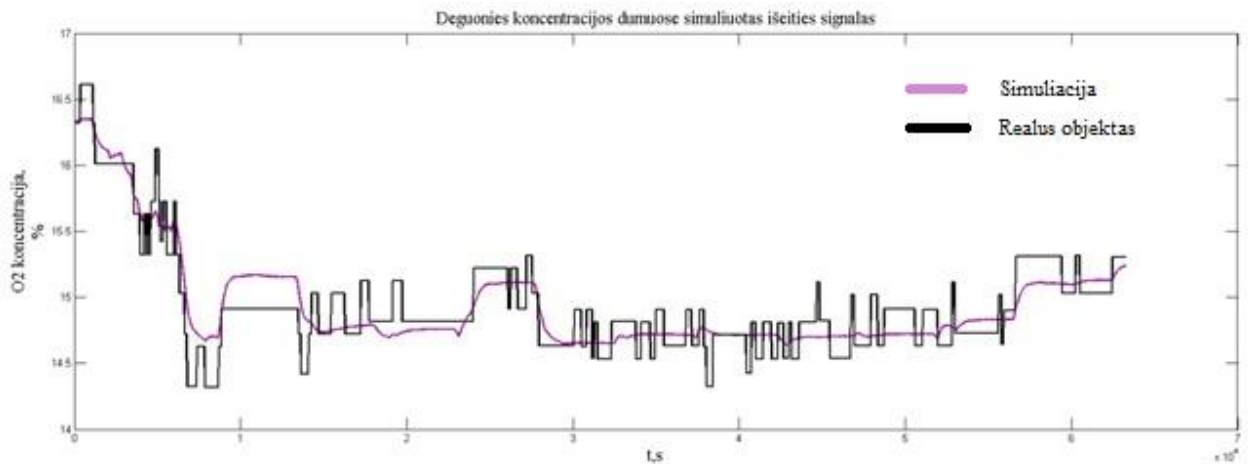
4.3.5 Deguonies koncentracijos dujų turbinos išėjime nelinijinis ARX modelis

Deguonies koncentracija dūmuose priklauso nuo to, kaip gerai įvykęs degimo procesas, kurį nusako lambda koeficientas. Teorinio tobulo degimo proceso koeficientas – 1. Reikšmei esant <1>, degimo procesas nėra tobulas. Šis koeficientas tiesiogiai priklauso nuo išmatuoto kuro ir oro santykio, paduodamo į degimo kamerą, lyginant su teoriniu naudojamu kuro ir oro santykiu. Nuo šio santykio priklauso, kokie cheminiai procesai įvyks degimo kameroje ir dujų turbinos išmetime. Taigi šiuo atveju, O₂ koncentracijos dūmuose, modelis paskaičiuota pagal oro ir gamtinių dujų srautų santykį. O₂ koncentracijos dūmuose nelinijinio modelio įvesties reikšmės lygios AFR:

$$\text{AFR} = \frac{\text{Oros_srautas_t/h}}{\text{Gamtinių_dujų_srautas_t/h}}$$

Žinant oro ir gamtinių dujų srautų į degimo kamerą santykį, paskaičiuota antros eilės (dviejų polių) O₂ nelinijinė modelio funkcija su vienos sekundės uždelsimu.

Šios nelinijinio modelio funkcijos *Ident* įrankiu paskaičiuotas tikslumas - 55,6 proc. Sąlyginai mažas funkcijos tikslumas atsispinti tik parametro dinamikoje, kuri, pasikeitus oro ir kuro santykiui, nuolatos švytuoja, o dujų turbinos modelio sudarymui svarbu vidutinės deguonies reikšmės tikslumas.



4.3 pav. *Ident* įrankiu gauto modelio ir realaus objekto duomenų palyginimas kreivių išraiška.

4.4 KCB dujų turbinos matematinio modelio struktūra

KCB dujų turbinos matematinis modelis sudarytas *Matlab* programinio paketo *Simulink* aplinkoje. Modelis susideda [priedas 2] iš įvesties parametru, vidinių skaičiavimų blokų ir išeities parametru.

Įvesties parametrai - tai KCB aktyviosios galios užduotis, kuri įvedama į modelį šiam pasiekus bazinę stabilią apkrovą - 200 MW. Tolimesni įvesties parametrai - gamtinių dujų cheminė sudėtis: metanas, etanas, propanas, pentanas, butanas, iso butanas, iso pentanas, anglies dvideginis, azotas bei kitos mažą koncentraciją turinčios dujos. Visa gamtinių dujų cheminė sudėtis turi sudaryti 100 procentinių punktų, kitu atveju šalia įvesties parametru esantis teisingos duomenų įvesties ekranas atvaizduos loginį nulį. Tai reikš, jog emisijų skaičiavimo bloko išvesties parametrai bus neteisingi. Įvesties parametrai svarbūs tuo, kad nuo jų priklauso išeities parametru vertės.

Vidinių skaičiavimų blokuose vyksta parametru valdymo algoritmu realizacija. Šie blokai yra trys: dujų turbinos srautu ir galios valdymo blokas [priedas 3], dujų turbinos emisijų skaičiavimo blokas [priedas 4] ir gamtinių dujų kaloringumo valdymo blokas [priedas 5]. Šiuose blokuose apdorojami įvesties parametrai naudojant ankščiau įvardintus funkcinius modelius ir tam tikrą logiką, kurios metu išskaičiuojamos tarpinių parametru vertės. Vidinių skaičiavimų blokai svarbūs tuo, kad visi skaičiavimai, naudojant įvesties duomenis, atliekami būtent šiuose blokuose, iš kurių gaunamos išeities parametru reikšmės.

Išeities parametrai tai: KCB aktyviosios galios reikšmė, oro srauto reikšmė, dūmu temperatūros reikšmė, gamtinių dujų srauto reikšmė, dūmu srauto dujų turbinos išmetime reikšmė, slėgio dujų turbinoje reikšmė, dujų turbinos kompresoriaus mentelių kampo padėtis, lambda

koeficiento reikšmė, deguonies koncentracijos dujų turbinos išmetime reikšmė, perteklinio oro reikšmė, anglies monoksido koncentracijos dūmuose reikšmė, anglies dvideginio koncentracijos dūmuose reikšmė, azoto koncentracijos reikšmė bei gamtinių dujų žemutinė šiluminė vertė. Išėjties parametrai priklauso nuo įvesties parametru. Gauti parametrai - tai išskaičiuotos realaus objekto parametru vertės, kurios su tam tikra paklaida turi atitikti realaus objekto charakteristikas esant darbiniam režimui. Paklaida tarp realaus ir matematiškai aprašyto objektu bus nustatinėjama kitame, t.y. ketvirtame, skyriuje.

4.4.1 Dujų turbinos srautų ir galios skaičiavimo blokas

Šis blokas susideda iš penkiu perdavimo funkciju, kurios valdo gamtiniu duju srauta, KCB aktyviosios galios reikšme, duju turbinos kompresoriaus menteliu padeti ir dumu srauta duju turbinos išmetime. Taip pat šis blokas susideda iš loginiu bei matematiniu aritmetiniu elementu.

Prie loginiu elementu galima priskirti perjungiklius, kurie parenka viena arta kita reziama, priklausomai nuo parametro reikšmes. Kaip pavyzdį galima pateikti duju turbinos kompresoriaus menteliu padeties perjungikli, kuris parenka, kurią iš dviejų perdavimo funkciju turétume laikyti tinkama tolesniems skaičiavimams. Šioje situacijoje viskas priklauso nuo duju srauto, kuris nusako, kuri perdavimo funkcija tuo momentu bus tikslesne. Jeigu srautas mažesnis nei 40 t/h, naudojama perdavimo funkcija, kuria skaičiuojamas kompresoriaus menteliu kampas, kai srautas mažesnis nei 40 t/h, ir atvirkščiai.

Kitas svarbus loginis elementas - parametro vertes ribotuvi. Jie skirti apriboti parametro išduodama vertę. Jie naudojami prie beveik kiekvieno bloko įvesties ir išvesties taško. Parametro vertė ribojama tam tikroje skalėje, kurioje parametro vertes įtaka tolesniam procesui žinoma ir priimtina. Parametru minimali ir maksimali ribotuvo vertes buvo nustatomos pagal minimalia ir maksimalia realių parametru reikšmes modelio sudarinėjimo metu, tik prie maksimalios ribotuvo reikšmes buvo pridedama nuo 10 proc. iki 20 proc. maksimalios parametro vertes.

4.1. lentelė. Dujų turbinos srautų ir galios skaičiavimo bloko parametro vertės ribotųjų reikšmės

Parametras	Minimali parametro riba	Maksimali parametro riba
KCB aktyviosios galios užduotis	200 MW	450 MW
KCB aktyviosios galios vertė	0 MW	500 MW
Dūmų srautas dujų turbinos išmetime	0 t/h	3000 t/h
Gamtinių dujų srautas	0 t/h	110 t/h
Oro srautas	0 t/h	2900 t/h

4.4.2 Gamtinių dujų kaloringumo skaičiavimo blokas

Šis blokas skirtas gamtinių dujų kaloringumui skaičiuoti, todėl susideda iš matematinių aritmetinių elementų. Taip pat šiame bloke yra realizuojama įvedamų parametų patikra. Kadangi įvedinėjant dujų cheminę sudėtį nurodoma kiekvieno elemento koncentracija procentais kubiniam metrui, sudėjus visų elementų pasiskirstymą turime gauti šimtą procentų. Jei gauname daugiau arba mažiau nei šimtas, reiškia, jog duomenys įvesti neteisingai.

Kiekvienas gamtinių dujų struktūros cheminis elementas turi savo savitą žemutinę ir aukštutinę šiluminę vertę. Šiuo atveju naudojama žemutinė elemento šiluminė vertė. Šios reikšmės yra konstantos, jos nekinta. Šios konstantos paskaičiuotos prie 20 °C ir atmosferinio slėgio 1.01325 bar. Įvertinus šias sąlygas, žinant kiekvieno gamtinių dujų cheminio elemento koncentraciją bei dujų masės ir tūrio santykį, galima paskaičiuoti šių dujų kaloringumą MJ/m³. Gamtinių dujų kaloringumo apskaičiavimo formulė, kuri realizuota šiame bloke:

$$\text{Cal} = \frac{\text{constLHV}_{\text{element 1}} * \left(\frac{\text{dujų _ masė}}{\text{dujų _ tūri}}\right) * \text{koncent}_{\text{element 1}}}{100} + \frac{\text{constLHV}_{\text{element n}} * \left(\frac{\text{dujų _ masė}}{\text{dujų _ tūri}}\right) * \text{koncent}_{\text{element n}}}{100} + \dots$$

Pirminė ir atskaitinė gamtinių dujų kaloringumo reikšmė - 31,4739 MJ/m³. Kaloringumas svarbus, nes nuo jo priklauso dujų turbinos srautų ir galios bei emisijų valdymas.

Šiame bloke naudojamas tik vienas parametro vertės ribotuvus – gamtinių dujų kaloringumo reikšmei.

4.2. lentelė. Gamtinių dujų kaloringumo bloko parametro vertės ribotuvų reikšmės

Parametras	Minimali parametro riba	Maksimali parametro riba
Gamtinių dujų kaloringumas	25 MJ/m ³	40 MJ/m ³

4.4.3 Emisijų skaičiavimo blokas

Šis blokas skirtas apskaičiuoti cheminių elementų koncentracijas dūmuose bei degimo proceso kokybės vertinimui. Blokas susideda iš vieno nelineinio modelio, kuris skirtas apskaičiuoti deguonies koncentracijai dujų turbinos išmetime, taip pat į bloką įeina anglies monoksido, anglies dvideginio ir azoto koncentracijų skaičiavimai.

Anglies monoksido, esančio dujų turbinos išmetime, išskaičiavimas atliktas pasitelkiant žemiau esančia perteklinio oro kiekio formulę [25]:

$$\text{Perteklinis Oras \%} = \frac{\text{O}_2\% - \frac{\text{CO}\%}{2}}{20,9 - (\text{O}_2\% - \frac{\text{CO}\%}{2})} * 100$$

Anglies dvideginio, esančio dujų turbinos išmetime, skaičiavimo formulė [25]:

$$\text{CO}_2\% = \text{CO}_2(\text{maksimalus}) * \frac{(20,9 - \text{O}_2\text{išmatuotas})}{20,9}$$

Azoto, esančio dujų turbinos išmetime, skaičiavimo formulė [26]:

$$\text{N}_2\% = 100\% - \text{O}_2\% - \text{CO} - \text{CO}_2$$

Perteklinis oras dujų turbinos išmetime išskaičiuojamas iš žemiau pateiktos formulės [25]:

$$\lambda = \frac{\text{Perteklinis Oras \%}}{100} + 1$$

Lambda koeficiento skaičiavimo formulė [25]:

$$\lambda = \frac{\text{AFR}_{\text{realus}}}{\text{AFR}_{\text{stachiometrinis}}}$$

Šiame bloke parametro vertės ribotuvai sudėti tik prie parametrų, kurių reikšmės simuliacijos pradžioje šokteli į aukštumas. Šie parametrai pateikiami 4.3 lentelėje.

4.3. lentelė. Emisijų skaičiavimo bloko parametro vertės ribotuvų reikšmės

Parametras	Minimali parametro riba	Maksimali parametro riba
Deguonis	0 %	21 %
Oro perteklius	0 %	450 %
Lambda	0	10

4.5 Matematinio modelio duomenų registravimas

Svarbūs išvesties ir įvesties parametrai yra registruojami. Visi parametrai registruojami vienodu laiko momentu, tačiau skirtingais intervalais. Matematinio modelio simuliacijos metu registruojami šie parametrai: KCB aktyviosios galio užduotis, KCB generuojamos aktyviosios galios reikšmė, oro srautas, gamtinių dujų srautas, dūmų srautas, dujų turbinos kompresoriaus mentelių padėtis, lambda koeficientas, oro perteklius, deguonies koncentracija, anglies monoksido koncentracija, anglies dvideginio koncentracija, azoto koncentracija, gamtinių dujų žemutinė šiluminė vertė. Šie parametrai registruojami ir archyvuojami *Matlab* darbalaukyje. Kiekvienos simuliacijos metu ant prieš tai buvusių archyvo duomenų užrašomi naujos simuliacijos duomenys.

4.6 Skyriaus apibendrinimas

1. Kuriant matematinį objekto aprašą, duomenys paleidžiant ar stabdant bloką nebuvo naudojami, kadangi šiuose darbo režimuose parametrų reikšmės pradeda švytuoti ir dėl to surasti dėsningumus bei juos aprašyti matematiškai itin sudėtinga. Tokiais atvejais gautos perdavimo funkcijos yra netikslios. Jos siekia iki 80 proc. tikslumo. Šie režimai, sudarant objekto modelį, buvo atmesti ir toliau naudojamas tik darbinis režimas, kai blokas dirba generuodamas nuo 200 MW iki 450 MW aktyviają galią.

2. Sudarytų parametrų perdavimo funkcijų tikslumas - nuo 90 proc. Nelinijinio modelio deguonies koncentracijai dūmuose apibūdinti tikslumas - 55 proc., tačiau toks tikslumas dujų turbinos matematinį modelį patenkina.

5. MODELIO PARAMETRŲ ADEKVATUMO TYRIMAS

Šiame skyriuje apžvelgiamas atliktas modelio parametrų adekvatumo tyrimas. Tyrimo eigoje buvo modeliuojami šeši kombinuoto ciklo dujų turbinos darbo režimai. Trys iš jų didinant ir trys - mažinant bloko galią. Kiekvienas bandymas kartojamas po tris kartus ir iš gautų rezultatų išvedamos vidutinės parametrų reikšmės, kurios naudojamos tolimesniuose skaičiavimuose. Kiekvienas simuliacijos režimas parinktas pagal turimus realaus objekto duomenis. Stengtasi atkurti sąlygas, prie kurių buvo registruojami duomenys, ir iširti, koks gautų duomenų tikslumas, lyginant su realaus objekto duomenimis. Tyrimas įgalins įvertinti tiksliausią simuliacijos režimą, kuris bus naudojamas tolimesniame eksperimente keičiant tiekiamų gamtinių dujų struktūrą.

Prieš pradėdant modeliuoti kombinuoto ciklo dujų turbinos veikimo procesą, šis privalo pasiekti darbinę bloko apkrovą – 200 MW, kadangi perdavimo funkcijos buvo sudarytos nuo 200 MW iki 450 MW diapazone. Tokiu atveju simuliuojant bus gaunami tikslesni duomenys. Grįžtant prie tyrimo, kiekvienu atveju, siekiant gauti kuo tikslesnius duomenis, modelis buvo nustatomas į pradinę eksperimento aktyviosios galios vertę, kuri buvo visais atvejais didesnė nei bazinis apkrovimas, ir tik procesui nusistovėjus buvo įvedamas šuolinis aktyviosios galios užduoties pokytis. Taip pat kai kurie parametrai buvo priimami kaip konstantos: dujų temperatūra dujų turbinos išmetime lygi 650⁰ C ir slėgis dujų turbinos kompresoriuje - 20 bar.

Simuliuotos reikšmės registruotos tokiu pačiu intervalu – 9,2s, kaip realaus objekto duomenys. Taip buvo daroma tam, kad kuo tiksliau sulyginti realią ir simuliuotą kreives.

Iš atliktos literatūros apžvalgos, pasirinktas standartinio nuokrypio metodas, aprašyti simuliacijos ir realaus objekto duomenų tikslumui [27].

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}$$

Kur: σ = standartinis nuokrypis; n = imties dydis; i = imties vertės eilė; \hat{y} = realaus objekto vertė; y = simuliacijos vertė.

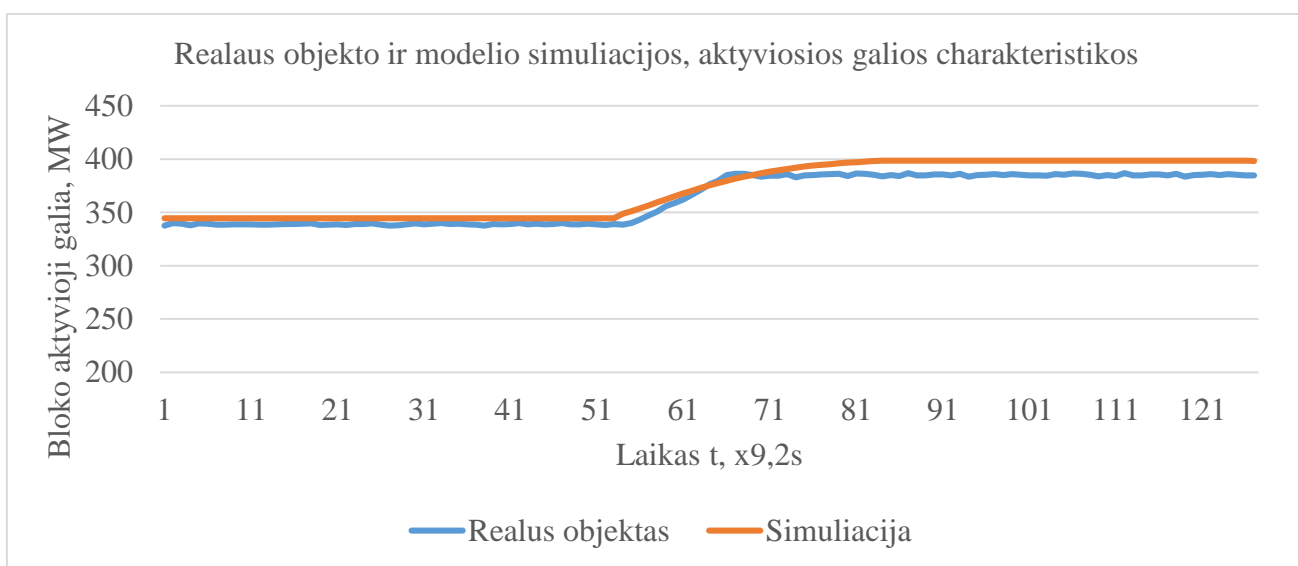
5.1 lentelė. Simuliacijos ir realaus objekto charakteringųjų kreivių standartinio nuokrypio bei įvestų šuolinių trikdžių reikšmių lentelė

Parametras	Aktyviosios galios užduoties kitimo amplitudė, MW											
	Nuo 233 iki 344		Nuo 338 iki 385		Nuo 355 iki 412		Nuo 432 iki 369		Nuo 412 iki 292		Nuo 293 iki 231	
	Parametro reikšmės pokytis	Standartinis nuokrypis, σ	Parametro reikšmės pokytis	Standartinis nuokrypis, σ	Parametro reikšmės pokytis	Standartinis nuokrypis, σ	Parametro reikšmės pokytis	Standartinis nuokrypis, σ	Parametro reikšmės pokytis	Standartinis nuokrypis, σ	Parametro reikšmės pokytis	Standartinis nuokrypis, σ
Aktyvioji galia, MW	111 MW	7.92955031	47 MW	4.427493469	57 MW	10.27288694	63 MW	9.867051597	120 MW	14.44479845	62 MW	13.72113464
Dūmų srautas dujų turbinos išmetime, t/h	504 t/h	66.75392925	300 t/h	34.74230567	353 t/h	52.93391696	388 t/h	42.24995091	623 t/h	47.51766715	260 t/h	78.22358083
Dujų turbinos kompresoriaus mentelių kampas, °	18°	2.728895043	12°	1.45170872	13°	2.11194199	14,5°	1.794170045	24°	2.509016651	7°	3.402520283
Gamtinių dujų srautas į dujų turbinos degimo kamerą, t/h	14 t/h	0.971310745	5 t/h	0.636289931	7 t/h	0.53872383	7 t/h	0.930916729	15 t/h	1.480110167	8 t/h	1.201737201

Lentelėje 5.1 pateikiami gauti simuliacijų rezultatai. Kaip minėta ankstesnėje pastraipoje, lentelėje matome kiekvieno simuliuoto darbo režimo rezultatų palyginimą su realaus objekto duomenimis. Pateikiami keturių pagrindinių parametru atitikties skaičiavimai: kombinuoto ciklo aktyviosios galios parametras, dūmų srautas dujų turbinos išmetime, dujų turbinos kompresoriaus mentelių kampas bei gamtinių dujų srautas į degimo kamerą. Iš šių parametru perdavimo funkcijų išskaičiuojami visi kiti modelyje esantys parametrai, todėl būtina išanalizuoti, kada standartinis nuokrypis yra didžiausias, kada - mažiausias, kaip šis priklauso nuo bloko apkrovos užduoties pokyčio.

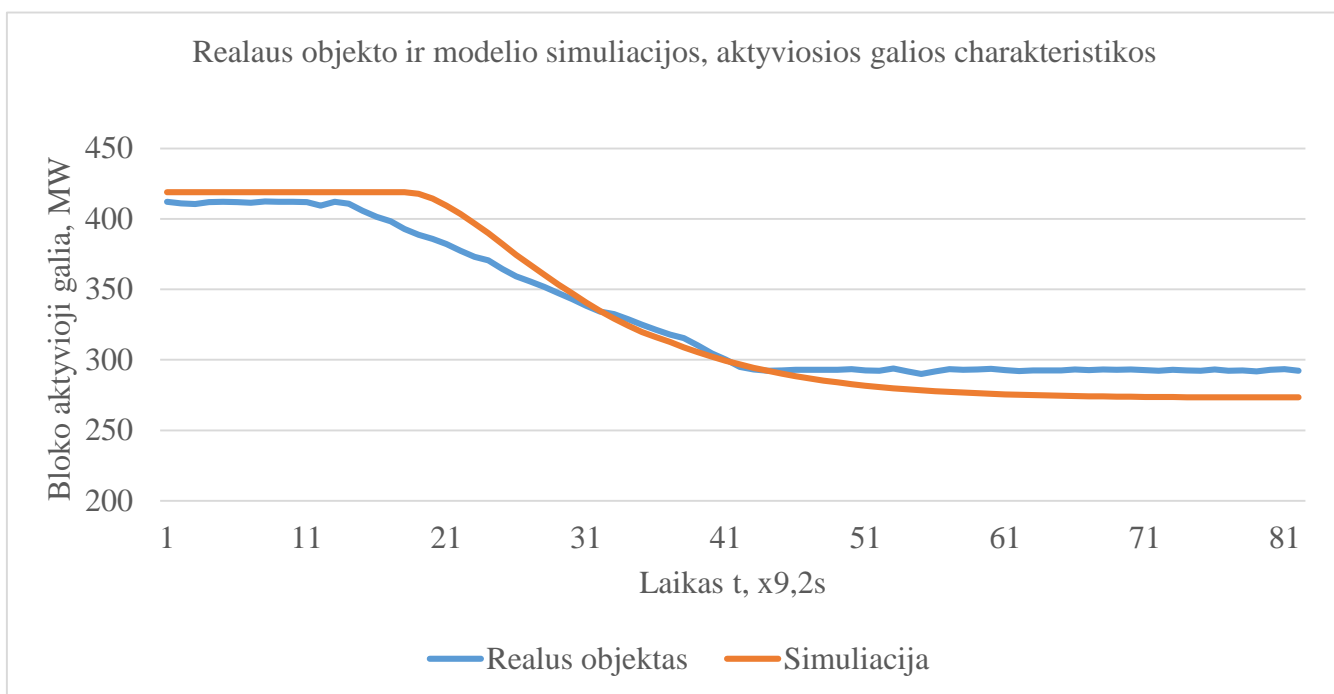
Toliau bus pateikiamos kiekvieno parametro simuliacijos metu gautos kreivės su mažiausiu ir didžiausiu standartiniu nuokrypiu. Atrenkant geriausius ir blogiausius gautus rezultatus nebuvo vertinama šuolinio užduoties pokyčio dydis ir parametro vertės pasikeitimas procentais.

Žemiau (5.1 pav.) pateikiamos bloko aktyviosios galios realaus objekto ir simuliacijos metu gautos kreivės. Simuliacijos kreivė gauta keičiant bloko galios užduoties vertę nuo 338 MW iki 385 MW. Šiuo atveju gautas mažiausias aktyviosios galios standartinis nuokrypis nuo realaus objekto duomenų $\sigma = 4,427$. Šios simuliacijos metu buvo atliekamas mažiausias galios užduoties pokytis, todėl tai galėtų būti viena iš priežasčių, kodėl gautas mažiausias verčių nuokrypis nuo realių duomenų. Vienas iš esminių faktorių yra tai, jog užduoties pokytis yra šuoliškas, todėl galima teigti, kad modeliuojama sistema bandoma streso sąlygomis. Atsižvelgiant į tai, šiuo atveju gauti duomenys yra gana tikslūs ne tik nusistovėjusio proceso, tačiau ir pereinamojo proceso metu.



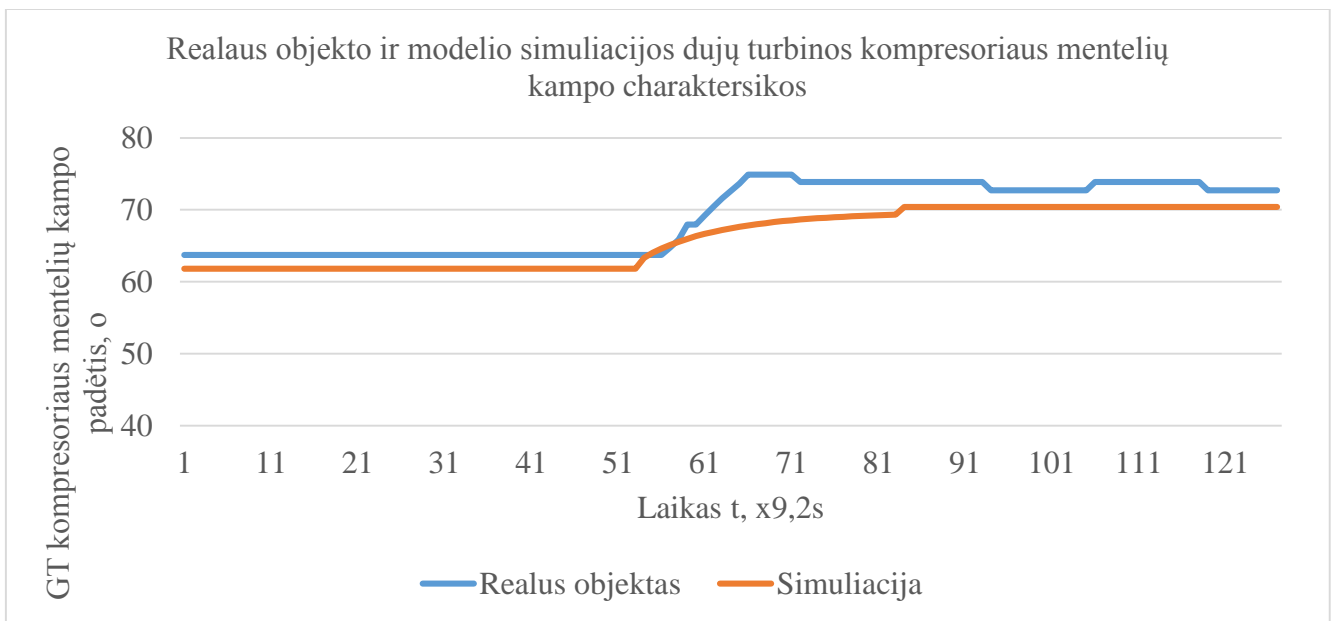
5.1 pav. Bloko aktyviosios galios, realaus objekto ir simuliacijos, verčių palyginimas (338 MW - 385 MW)

Paveiksle 5.2 pateikiama bloko aktyviosios galios simuliacijos kreivė su gautu didžiausiu standartiniu nuokrypiu $\sigma = 14,444$. Simuliacija buvo atliekama mažinant bloko apkrovimą nuo 412 MW iki 292 MW. Galios užduoties pokytis, kaip ir visais modeliavimo atvejais šiame darbe, buvo atliekamas šuoliškai. Šioje simuliacijoje gautas didžiausias nuokrypis, kadangi aktyviosios galios užduoties pokytis buvo vienas didžiausių – 120 MW, kas sąlygojo didesnius nuokrypius nuo realaus objekto verčių.



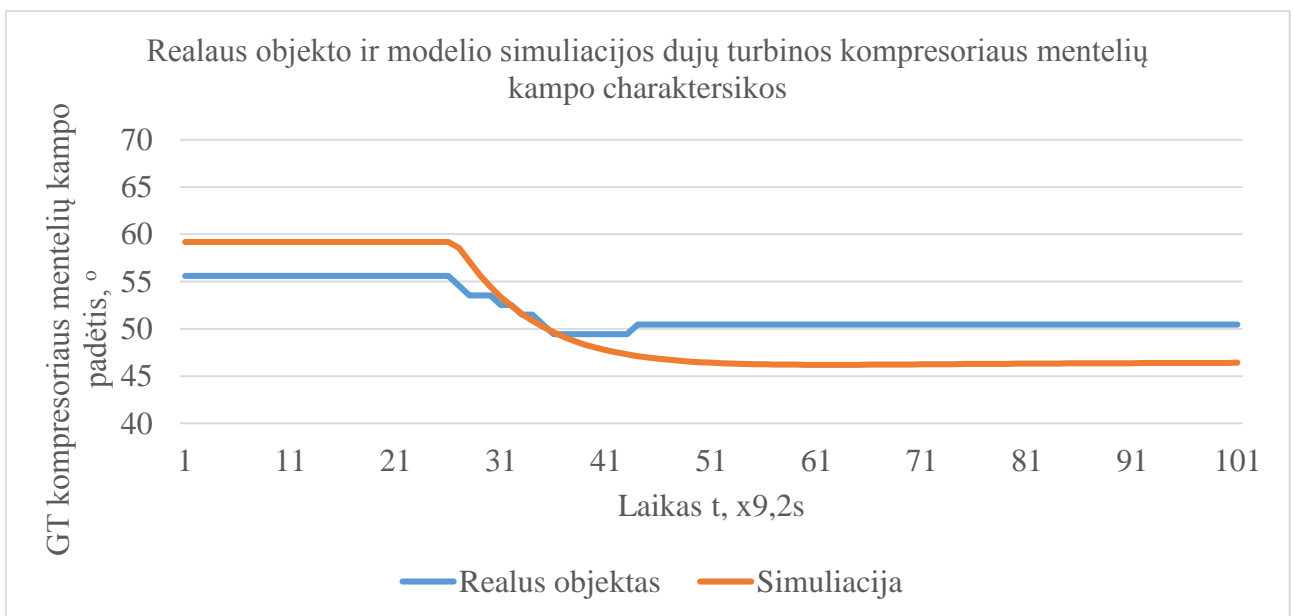
5.2 pav. Bloko aktyviosios galios, realaus objekto ir simuliacijos, verčių palyginimas (412 MW - 292 MW)

Toliau (5.3 pav. ir 5.4 pav.) paveiksluose atvaizduojamos dujų turbinos kompresoriaus mentelių kampo verčių simuliuotos ir realaus objekto kreivės. Paveiksle 5.3 pateikiama simuliacijos kreivė su mažiausiu standartiniu nuokrypiu $\sigma = 1,451$. Kaip ir bloko aktyviosios galios simuliacijos kreivė, taip ir dujų turbinos kompresoriaus mentelių kampo kreivės geriausi rezultatai gauti keičiant bloko aktyviosios galios užduotį nuo 338 MW iki 385 MW. Vėlgi, gauti tikslesni duomenys dėl įvesto užduoties šuolio dydžio, kuris buvo mažiausias visų bandymų metu. Lyginant realaus objekto kreivę su simuliacijos kreive, galima teigti, jog pastaroji pasiekia reikiamą mentelių atidarymo kampą tolygiau ir be švytavimų. Tokią realaus objekto kreivę galėjo lempiti veiksniai, kurie nebuvo įvertinti sudarinėjant matematinį modelį.



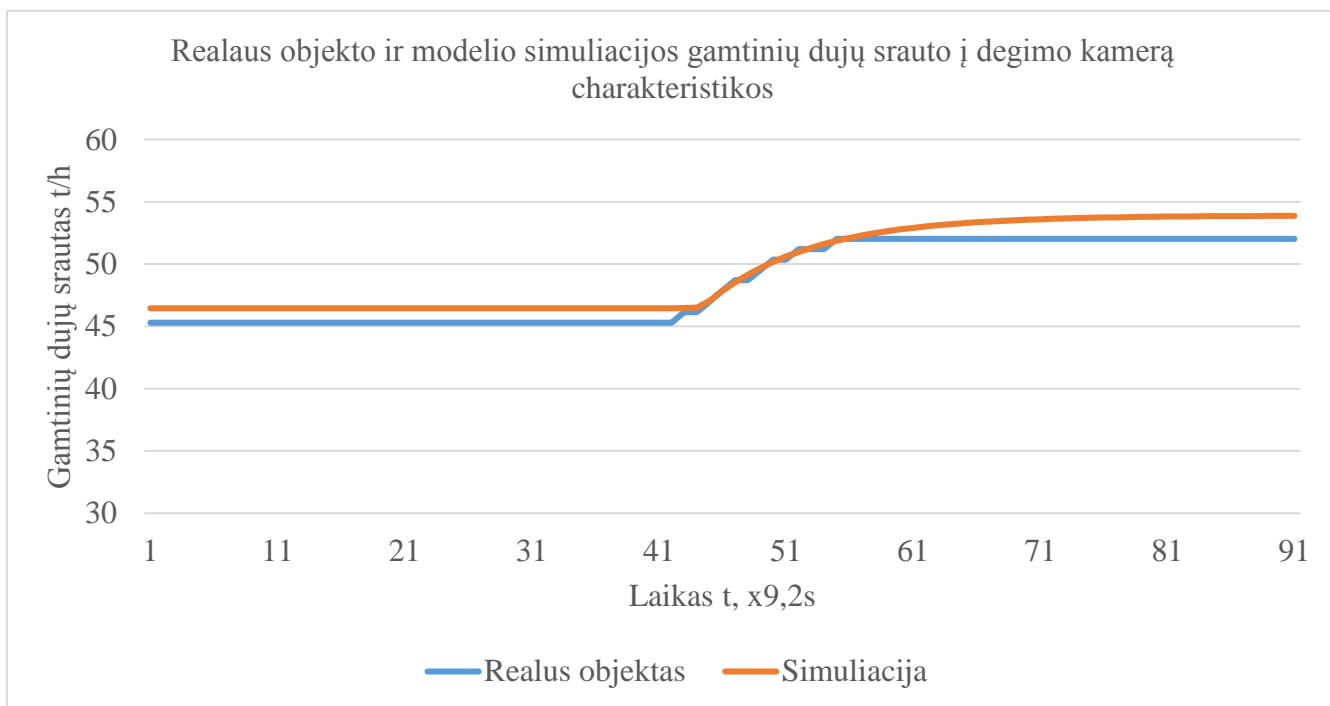
5.3 pav. Dujų turbinos kompresoriaus mentelių realaus objekto ir simuliacijos padėties palyginimas (338 MW - 385 MW)

Paveiksle 5.4 matome dujų turbinos kompresoriaus mentelių kampo simuliuotą kreivę su didžiausiu standartiniu nuokrypiu, lyginant visus šešis bandymus - $\sigma = 3,402$. Šiuo atveju simuliacija vyko keičiant bloko apkrovimą nuo 293 MW iki 231 MW. Dideli netikslumai atsirado dėl nusistovėjusios reikšmės paklaidos, todėl galima teigti, jog šiame diapazone dujų turbinos kompresoriaus mentelių padėties perdavimo funkcija nėra ypač tiksli.

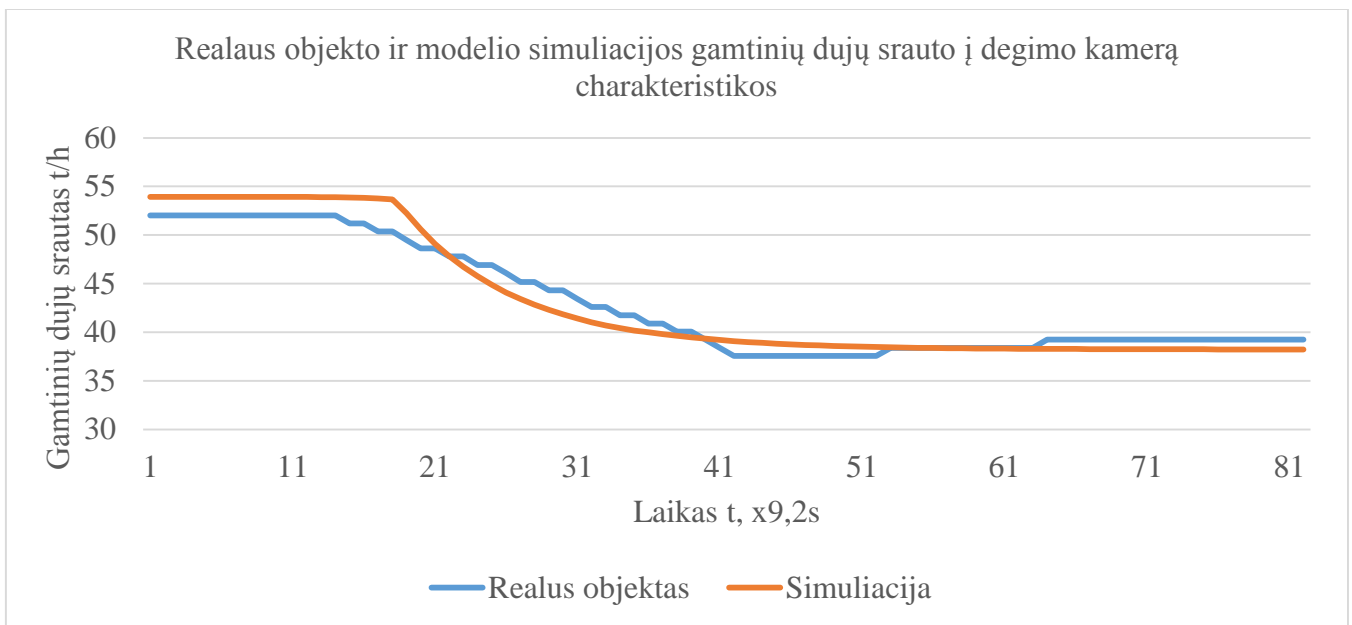


5.4 pav. Dujų turbinos kompresoriaus mentelių realaus objekto ir simuliacijos padėties palyginimas (293 MW - 231 MW)

Įvertinkime 5.5 ir 5.6 paveiksluose esančias gamtinių dujų srauto į degimo kameras tiksliausių ir netiksliausių simuliacijos verčių kreives. Paveiksle 5.5 atvaizduota tiksliausia (iš atliktų simuliacijų) gamtinių dujų srauto kreivė, kurios standartinis nuokrypis $\sigma = 0,538$, kai tuo tarpu netiksliausios gamtinių dujų srauto kreivės (5.6 pav.) standartinis nuokrypis $\sigma = 1,480$. Pirmu atveju bandymas atliktas keičiant bloko aktyviosios galios užduotį nuo 355 MW iki 412 MW, o antru atveju - nuo 412 MW iki 292 MW. Tiksliausios gamtinių dujų kreivės atveju šuolinės reikšmės skirtumas nuo nusistovėjusios - 57 MW, o netiksliausiu atveju - 120 MW. Taigi netikslūs duomenys, kaip aktyviosios galios netiksliausiu reikšmių atveju, gauti į simuliaciją įvedus didelį šuolinį žingsnį.

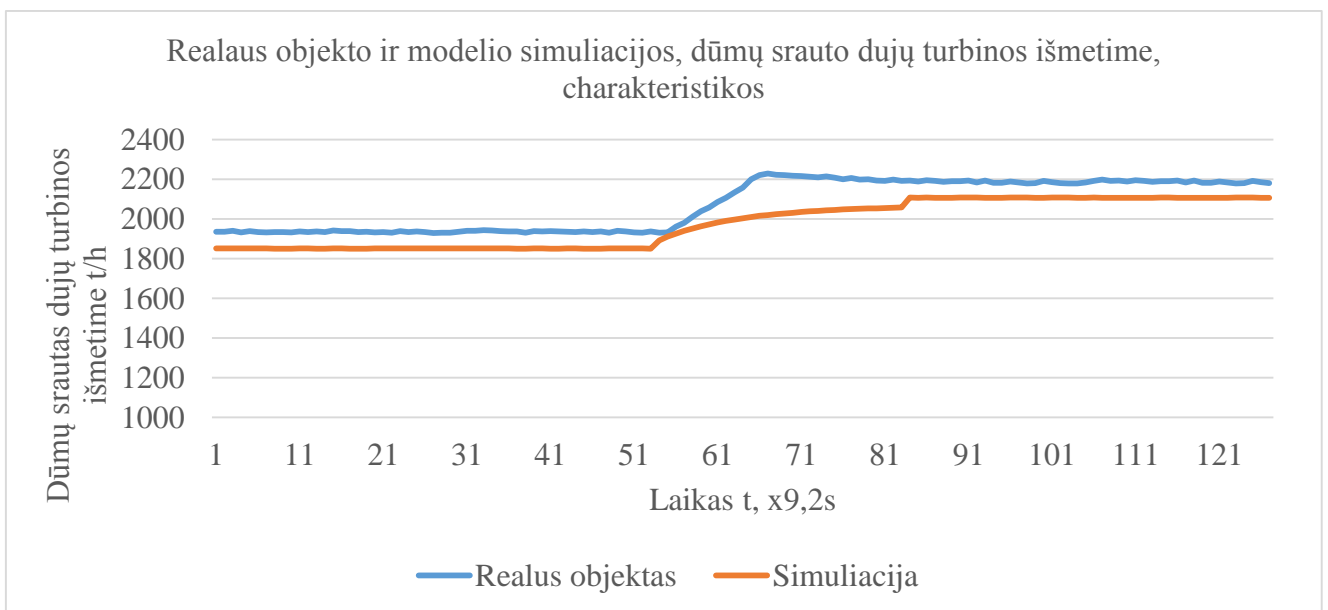


5.5 pav. Dujų turbinos dujų srauto į degimo kamerą realaus objekto ir simuliacijos verčių palyginimas (355 MW - 412 MW)



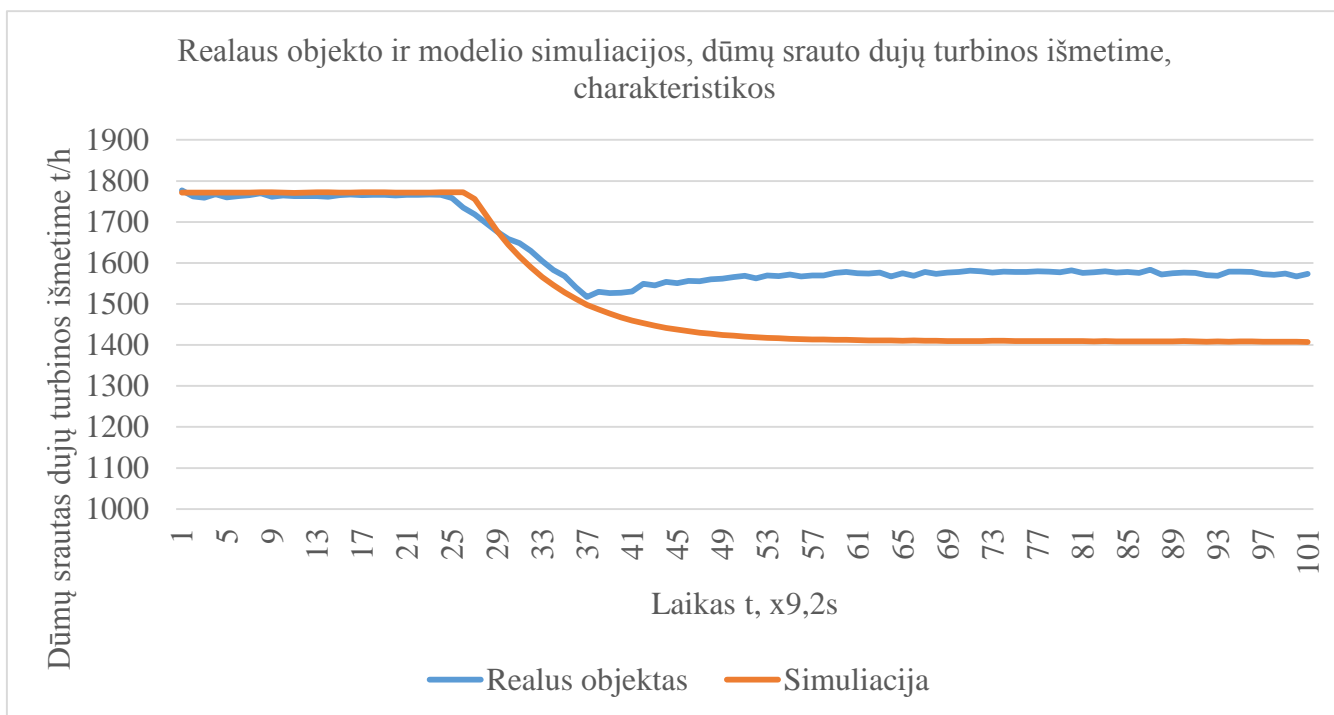
5.6 pav. Dujų turbinos dujų srauto į degimo kamerą realaus objekto ir simuliacijos verčių palyginimas (412 MW - 292 MW)

Paskutinis parametras, kurio kreivės aptariamos – dūmų srautas dujų turbinos išmetime. Paveiksle 5.7 matome kreivę su mažiausiu standartiniu nuokrypiu $\sigma = 34,742$ t/h. Analizuojant simuliacijos kreivę ir lyginant šią su realaus objekto kreive matome, jog simuliacijos metu vertės link užduotos vertės artėja lėčiau nei realaus objekto. Taigi modelio perdavimo funkcija yra lėtesnė, tačiau taip išvengiama parametro švytavimų.



5.7 pav. Dūmų srauto dujų turbinos išmetime, realaus objekto ir simuliacijos, verčių palyginimas (338 MW - 385 MW)

Paveiksle 5.8 pateikta netiksliausia simuliacijos, dūmų srauto dujų turbinos išmetime, kreivė. Šios standartinis nuokrypis - $\sigma = 78,223$ t/h. Pagrindinis šios simuliacijos didelis standartinis nuokrypis atsirado dėl to, jog simuliacijos kreivė, įvedus šuolinės charakteristikos užduoties pokytį, nespėjo nusistovėti. Problema - per ilgas reakcijos laikas. Modeliuojant procesą šiame diapazone, reikėtų atkreipti į šį faktorių dėmesį ir keisti bloko aktyviosios galios užduotį iš lėto, žingsniais.



5.8 pav. Dūmų srauto dujų turbinos išmetime, realaus objekto ir simuliacijos, verčių palyginimas (293 MW - 231 MW)

5.1 Simuliacijų metu išskaičiuoti parametrai

Atliekant matematinio objekto modelio parametrų adekvatumo tyrimą, iš pagrindinių parametrų, kurie buvo aprašyti praeitame paragrafe, buvo išskaičiuoti kiti modelio rodmenys. Šie rodmenys bus naudojami kitame skyriuje, kur bus atliekamas gamtinių dujų įtakos dujų turbinos parametrų tyrimas. Taip pat atliekant simuliaciją buvo naudojama 5.2 lentelėje aprašyta gamtinių dujų struktūra.

5.2 lentelė. Gamtinių dujų struktūra naudota modelio adekvatumo tyrimo metu

Elementas	Proporcija, %
Metanas	96,195
Etanas	2,173
Propanas	0,621

Pentanas	0,014
Butanas	0,000
Isobutanas	0,079
Isopentanas	0,014
CO ₂	0,100
Kitos dujos	0,804

Simuliacijų metu, atliekant modelio parametų adekvatumo tyrimą, gamtinių dujų struktūra bei sąlygos, kuriomis jos tiekiamos, nebuvo keistos. Priimta, jog šios dujos į degimo kamerą tiekiamos 20° C temperatūros ir 35 bar slėgiu. Lentelėje 5.3 atvaizduoti parametrai gauti su simuliacijos paklaida ir yra išskaičiuoti naudojant 4.4.3 skyriuje esančias formules.

5.3 lentelė. Simuliacijos metu išskaičiuotų parametų reikšmės

Parametras	Išskaičiuota parametro reikšmė					
Bloko aktyviosios galios užduotis, MW	344	385	412	369	292	231
Oro srautas, t/h	1838,72	2057,82	2202,69	1972,31	1728,57	1367,27
O ₂ kiekis, %	14,40	14,39	14,39	14,39	14,86	14,86
Lambda koeficientas	2,3755	2,3754	2,3755	2,3999	2,6307	2,6895
Perteklinis oras, %	137,55	137,54	137,55	137,54	163,07	162,95
CO kiekis, %	4,596	4,596	4,595	4,596	3,818	3,825
CO ₂ kiekis, %	0,0311	0,0311	0,0311	0,0311	0,0288	0,2888
N ₂ kiekis, %	80,972	80,973	80,974	80,972	81,287	81,280
GD LHV, MJ/m ³	31,4738	31,4738	31,4738	31,4738	31,4738	31,4738

5.2 Skyriaus apibendrinimas

1. Atliekant objekto simuliaciją buvo gautos šešios kiekvieno parametro charakteringosios kreivės. Šios sulygintos su realaus objekto duomenimis. Pateiktos po dvi kiekvieno parametro realaus objekto ir simuliacijos, mažiausio bei didžiausio standartinio nuokrypio kreivės. Vertinant gautus rezultatus, aiškiai matosi, jog esant mažiausiam aktyviosios galios užduoties pokyčiui nuo

nusistovėjusios vertės, gaunami mažiausi standartiniai nuokrypiai.

2. Dujų turbinos matematinio modelio reikšmės simuliacijos metu nusistovi po apytikriai 15000s (apytikriai 250 minučių). Praėjus šiam pradiniam laikotarpiui, galima keisti įvesties parametrus ir stebėti, kaip elgsis sistema.

3. Pastebėta, kad didinat simuliuojamos dujų turbinos apkrovimą, gerėja degimo kokybės rodikliai: lambda koeficientas, perteklinio oro kiekis bei deguonies koncentracija dujų turbinos išmetime. Šių rodiklių reikšmės mažėja.

4. Deguonies kiekio dujų turbinos išmetime reikšmė priklauso nuo perdavimo funkcijos, kuri paskaičiuota pagal oro ir dujų srauto santykį. Kadangi AFR reikšmingai nepasikeičia, todėl deguonies kiekis dujose apytikriai vienodas.

5. Iš visų šešių simuliacijų su mažiausiomis standartinėmis paklaidomis išrinktas simuliacijos bloko galios intervalas, kurio aktyviosios galios užduotis keičiama nuo 338 MW iki 385 MW. Kadangi šiame diapazone simuliacijos vertės yra arčiausiai realaus objekto duomenų, todėl bandymui, kurio metu tiriama gamtinių dujų struktūros įtaka proceso parametrų, pasirinktas būtent šis bloko apkrovimo diapazonas.

6. MATEMATINIO MODELIO TYRIMAS PAKITUS TIEKIAMŲ GAMTINIŲ DUJŲ STRUKTŪRAI

Šiame skyriuje atliekamas tyrimas, kurio eigoje išsiaiškinsime, kokią įtaką proceso parametrų turės pakeista tiekiamų gamtinių dujų struktūra į kombinuoto ciklo jėgainės dujų turbinos degimo kameras. Praeitame skyriuje ištyrėme modelio paklaidas tam tikruose diapazonuose. Įvertinę bandymą, kurio rezultatai buvo geriausi, bandysime atkartoti bandymą, laikydamiesi to pačio bloko aktyviosios galios šuolinės užduoties įvedimo – nuo 338 MW iki 385 MW. Taip pat nekeisime jokių kitų parametrų, išskyrus gamtinių dujų struktūrą. Gauti tyrimo rezultatai įvertinami su tam tikra paklaida ir teigiamos išvados.

Pakeistų gamtinių dujų sudėtį galime matyti 6.1 lentelėje. Tiekiamų gamtinių dujų technologiniai parametrai išlaikyti tie patys, kaip ir modelio adekvatumo tyrimo metu.

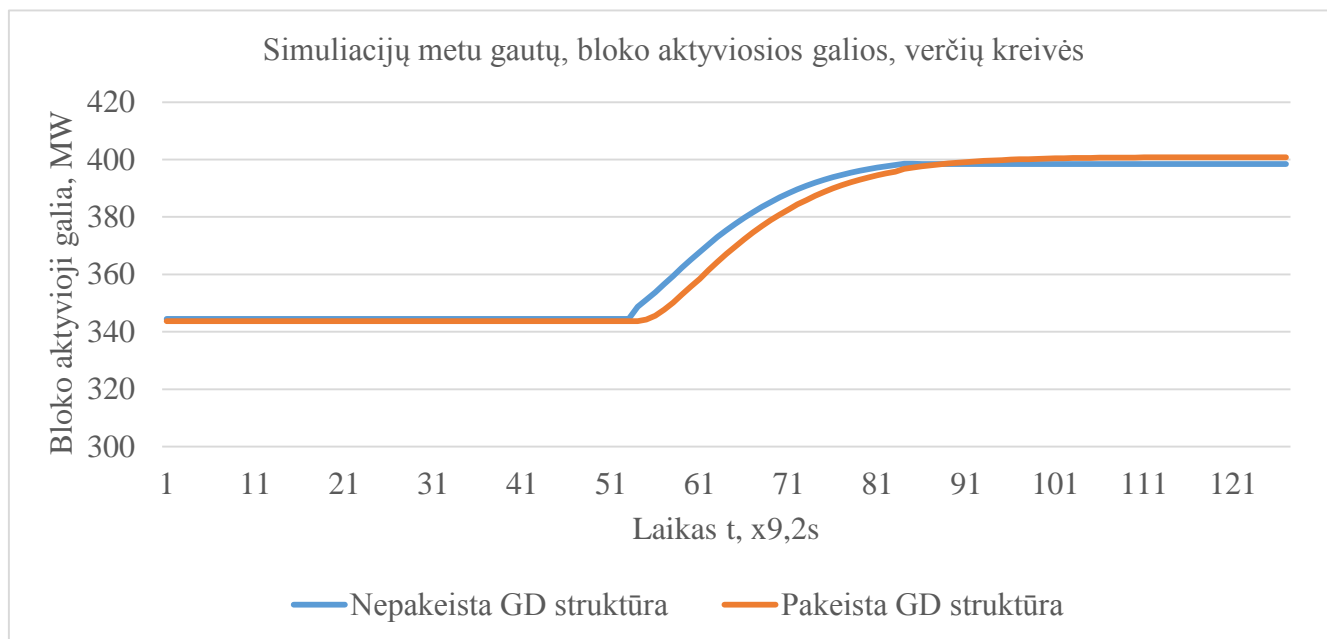
6.1 lentelė. Gamtinių dujų struktūra naudota modelio adekvatumo tyrimo metu.

Elementas	Proporcija, %
Metanas	91,500
Etanas	4,000
Propanas	1,000
Pentanas	0,014
Butanas	0,750
Isobutanas	0,079
Isopentanas	0,014
CO ₂	2,000
Kitos dujos	0,643

6.2 lentelė. Simuliacijos, naudojant realaus objekto dujų struktūra ir simuliacijos naudojant pakeistą dujų struktūra, reikšmių standartinio nuokrypio paskaičiavimo lentelė

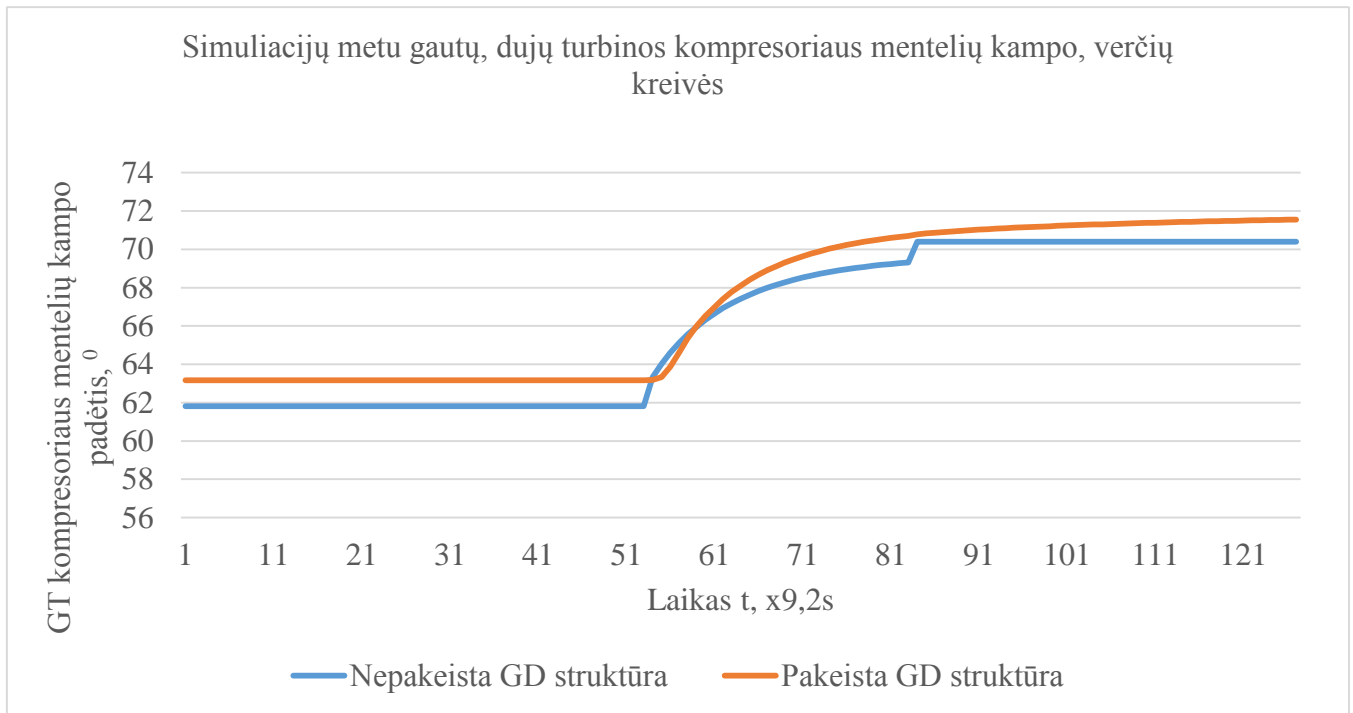
Parametras	Aktyviosios galios užduoties kitimo amplitudė, MW	
	Nuo 338 iki 385	
	Parametro reikšmės pokytis	Standartinis nuokrypis, σ
Aktyvioji galia, MW	47 MW	3,203305572
Dūmų srautas dujų turbinos išmetime, t/h	300 t/h	16,17058822
Dujų turbinos kompresoriaus mentelių kampas, °	12°	0,43563014
Gamtinių dujų srautas į dujų turbinos degimo kamerą, t/h	5 t/h	0,344080064

Kaip matome lentelėje 6.2, iš simuliacijų standartinio aktyviosios galios nuokrypio $\sigma = 3,2033$ MW bei 6.1 paveiksle atvaizduojamų kreivių pereinamojo proceso laikotarpiu reikšmės išsiskyrė. Būtent šioje vietoje ir susidarė didžiausi verčių išsiskyrimai. Nusistovėjus darbo režimui, aktyviosios galios momentinė vertė susilygino.



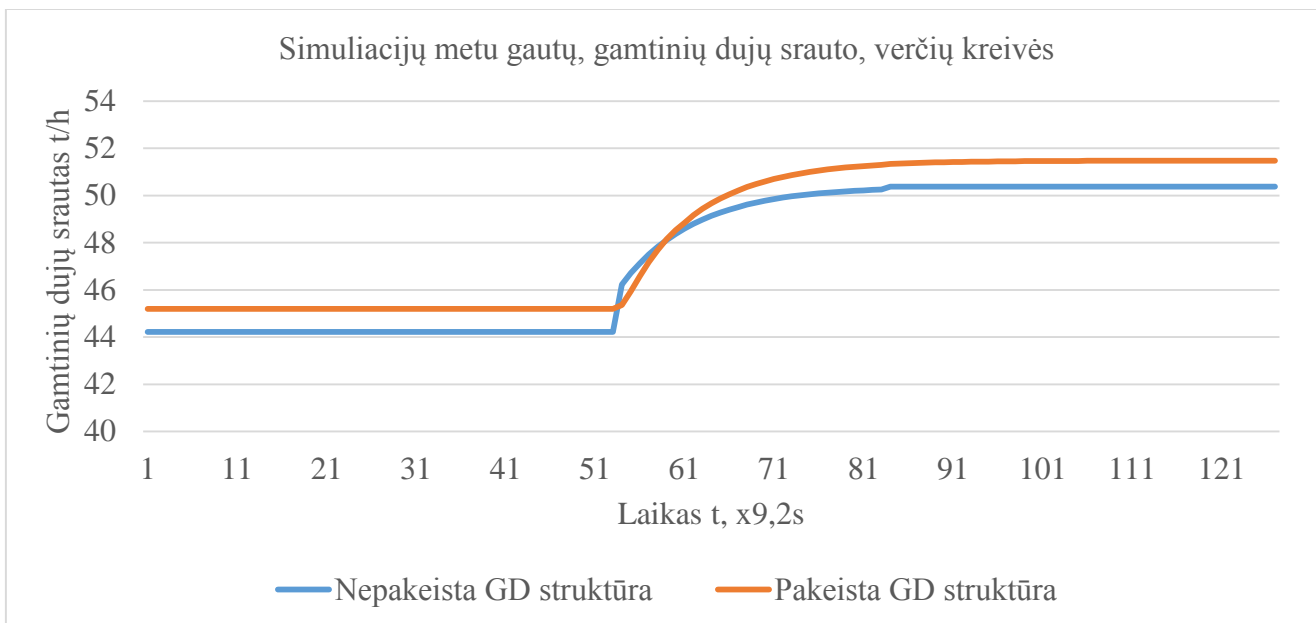
6.1 pav. Bloko aktyviosios galios, simuliacijų su skirtingomis gamtinių dujų struktūromis, verčių palyginimas

Kadangi pakeista gamtinių dujų struktūra, todėl pasikeitė dujų ir oro srautai. Oro srautas pritaikomas prie tiekiamo kuro kiekio. Oro srautas reguliuojamas dujų turbinos kompresoriaus mentelių kampu. Tarp simuliacijų kreivių standartinis nuokrypis $\sigma = 0,4356^\circ$, tačiau skirtingai nei aktyviosios galios atveju, šis atsirado nuo padidėjusio oro srauto poreikio, kurio nusistovėjusi reikšmė didesnė nei simuliacijos su nepakeista dujų struktūra.



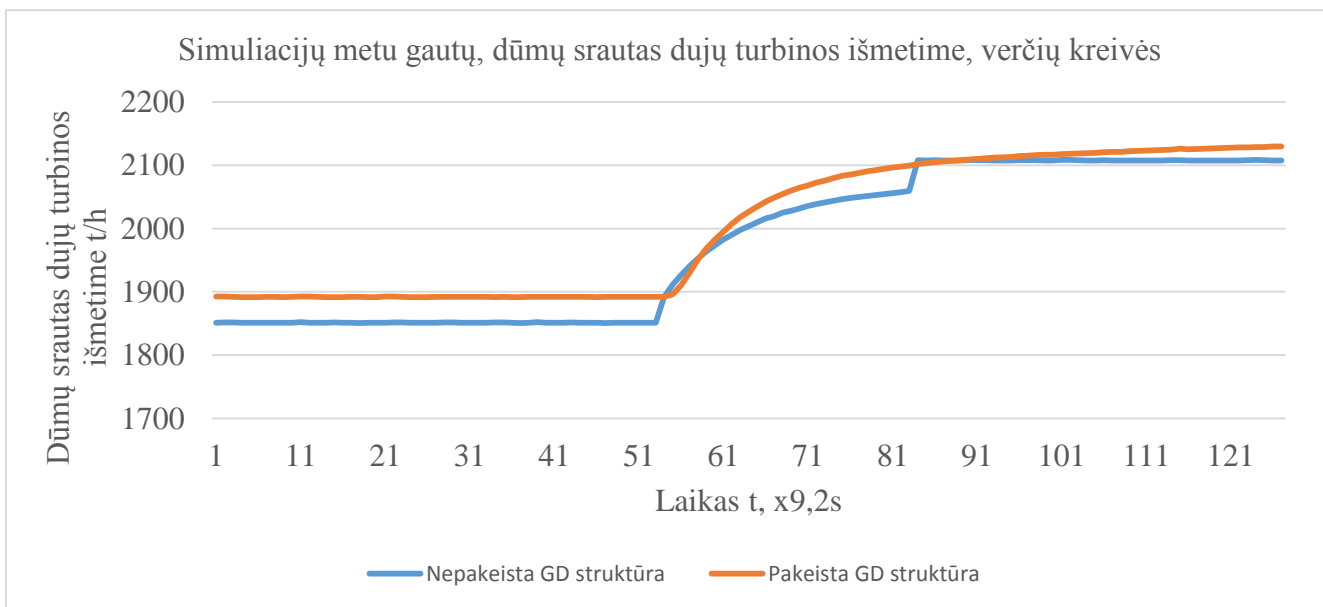
6.2 pav. Dujų turbinos kompresoriaus mentelių kampo, simuliacijų su skirtingomis gamtinių dujų struktūromis, verčių palyginimas

Vienas iš pagrindinių parametrų, kuriems daro įtaką gamtinių dujų struktūra, yra gamtinių dujų srautas į degimo kameras. Šiuo atveju iš kreivių (6.3 pav.) matome, jog pasikeitus dujų kaloringumui į mažesnę pusę, dujų srautas išaugo. Taip įvykti turėjo dėl to, jog norint pasiekti tą pačią galią su mažiau kaloringu kuru, reikalingas didesnis šio kuro kiekis. Taip pat iš šių kreivių galima teigti, jog pereinamojo proceso dinamiškumas nepakito. Dujų srautas turėjo įtakos ir padidėjusiam oro srauto kiekiui.



6.3 pav. Gamtinių dujų srauto į dujų turbiną, simuliacijų su skirtingomis gamtinių dujų struktūromis, verčių palyginimas

Paveiksle 6.4 atspindi pakitęs oro ir gamtinių dujų srautas. Puikiai matosi, jog pakitus dujų kaloringumui, pakito srautai dujų turbinos išmetime. Srautas išaugo. Dūmų srautas dujų turbinos išmetime yra proceso pasikeitimo pasekmė. Didžiausią įtaką šiam parametrai turėjo oro srautas, kadangi oro srautas į degimo kamerą turi būti didesnis nei gamtinių dujų srautas. Standartinis nuokrypis tarp šių kreivių - $\sigma = 16,17$ t/h.



6.4 pav. Dūmų srauto dujų turbinos išmetime, simuliacijų su skirtingomis gamtinių dujų struktūromis, verčių palyginimas

Atlikus modelio simuliaciją, gautos parametų vertės surašytos 6.3 lentelėje, kurioje atsispindi ne tik simuliacijos su pakeista gamtinių dujų struktūra, bet ir modelio adekvatumo tyrimo metu gauti parametrai, kurie registruoti tomis pačiomis sąlygomis, tik su realaus objekto tiekiamų gamtinių dujų struktūra. Sulyginami parametrus, galime teigti, jog bloko aktyviosios galios reikšmė nusistovėjo apytiksliai vienodai, tačiau išsiskyrė oro bei dujų srautai į degimo kamerą. Tai sumažėjusio gamtinių dujų kaloringumo pasekmė. Tokie parametrai kaip: perteklinis oras, O₂, CO, N₂, beveik nepakito. Svarbu tai, jog nekito lambda koeficientas. Tai reiškia jog degimo procesas dujų turbinoje pasikeitus dujų struktūrai nesutrinka ir yra išlaikomas toks pat kuro ir oro santykis.

6.3 Lentelė. Simuliacijos metu išskaičiuotų parametų reikšmės

Parametras	Išskaičiuota parametro reikšmė (nusistovėjęs KCB darbo režimas ties aktyviosios galios užduotimi 385MW)	
	Nepakeista GD struktūra [5.2 Lentelė]	Pakeista GD struktūra [6.1 Lentelė]
Aktyvioji galia, MW	391,51	391,47
Oro srautas, t/h	2057,82	2103,71
GD srautas, t/h	50,36	51,47
O ₂ kiekis, %	14,39	14,4
Lambda koeficientas	2,3754	2,3756
Perteklinis oras, %	137,54	137,56
CO kiekis, %	4,596	4,590
CO ₂ kiekis, %	0,0311	0,622
N ₂ kiekis, %	80,973	80,382
GD LHV, MJ/m ³	31,4738	30,7969

6.1 Skyriaus apibendrinimas

1. Pakeitus gamtinių dujų struktūra, išskaičiuotas dujų kaloringumas $30,7969 \text{ MJ/m}^3$, kuris yra mažesnis už modeliui sudarinėti naudojamą dujų kaloringumą (realiam objektui tiekiamų dujų kaloringumas).

2. Pasikeitęs gamtinių dujų kaloringumas turėjo įtakos dujų ir oro srautams, kurie padidėjo, tačiau nežymiai. Taip įvyko dėl matematiname modelyje įgyvendintos dujų srauto korekcijos pagal išskaičiuotą dujų kaloringumą. Priešingu atveju valdymo grandims esant atviro tipo, dujų struktūros pokytis neturėtų jokios įtakos sistemai, tačiau galios ir išmetimo parametrai pakistų.

3. Emisijoms darė įtaką gamtinėse dujose esantis CO_2 kiekis, kuris lėmė dujų turbinos išmetime padidėjusį anglies dvideginio kiekį nuo 0,0311 proc. iki 0,622 proc. Taip pat įtakos turi gamtinėse dujose esantis azoto kiekis, tačiau į matematinį modelio aprašą šis nebuvo įtrauktas. Pastarasis darė įtaką azoto kiekiui dujų turbinos išmetime.

4. Lambda koeficientas bei oro perteklius nepasikeitė, todėl aišku, jog degimo procesui pasikeitę srautai įtakos neturėjo. Buvo išlaikomas toks pat oro ir kuro santykis. Tai reiškia, jog sistema automatiškai neprisiderina prie pasikeitusio dujų kaloringumo ir bando realizuoti galios užduotį per srautų į degimo kamerą didinimą.

IŠVADOS

1. Iš atliktos Rankino, Braitono bei kombinuoto ciklų analizės išsiaiškinta, jog sujungiant garo ir dujų turbinos ciklus į kombinuotą ciklą, galima išgauti iki 60 proc. daugiau elektros energijos iš to paties kuro kiekio, lyginant dujų ir garo turbinas atskiruose blokuose.

2. Dujų turbinų matematiniai modeliai, kurie įgyvendinti įvairiose platformose, dažniausiai pateikiami kaip juodosios dėžės („black – box“). Todėl matematinės lygtys ir naudojami algoritmai paprastam vartotojui neprieinami, kadangi gamintojas nenori atskleisti savo produkto ypatybių. Šis faktorius įgalino atlikti projektą, kurio metu buvo sukurtas ir išbandytas matematinis dujų turbinos modelis.

3. Pagal duomenis, gautus iš realaus objekto valdymo sistemos, sukurtos parametų perdavimo funkcijos, kurių tikslumas svyruoja nuo 91,58 proc. iki 94,3 proc., išskyrus O₂ perdavimo funkciją, kurios tikslumas siekia 55,6 proc. Naudojantis gautomis perdavimo funkcijomis, išskaičiuoti emisijų bei srautų parametrai. Vykdamat matematinio modelio adekvatumo tyrimą, paskaičiuoti parametų standartiniai nuokrypiai. Aktyviosios galios didžiausias standartinis nuokrypis - $\sigma = 13,7211$ MW, o mažiausias - $\sigma = 4,4274$ MW. Dujų turbinos kompresoriaus mentelių kampo didžiausias standartinis nuokrypis - $\sigma = 3,4025^\circ$, o mažiausias - $\sigma = 1,4517^\circ$. Gamtinių dujų srauto į degimo kamerą didžiausias standartinis nuokrypis - $\sigma = 1,4801$ t/h, o mažiausias - $\sigma = 0,5387$ t/h. Dūmų srauto dujų turbinos išmetime didžiausias standartinis nuokrypis - $\sigma = 78,2235$ t/h, o mažiausias - $\sigma = 34,7423$ t/h. Tyrimo simuliacijų metu naudojama gamtinių dujų struktūra tokia pati, kaip ir realaus objekto duomenų registravimo metu. Analizuojant bandymo metu gautus duomenis, nustatyta, jog iš šešiuose aktyviosios galios diapazonuose atliktų bandymų geriausi rezultatai gauti aktyviosios galios užduoties šuoliui esant nuo 338 MW iki 385 MW.

4. Remiantis sudaryto matematinio modelio adekvatumo tyrimo rezultatais atliktas tyrimas, keičiant simuliuojamo objekto gamtinių dujų struktūrą. Šio bandymo atveju naudojama gamtinių dujų struktūra lėmė mažesnę išskaičiuotą šiluminę vertę (30,7969 MJ/m³), lyginant su gamtinių dujų energetine verte modelio adekvatumo tyrimo metu (31,4738 MJ/m³). Tai sąlygojo dujų srauto į degimo kameras padidėjimą nuo 50,36 t/h iki 51,47 t/h ir oro srauto - nuo 2057,82 t/h iki 2103,71 t/h. Perteklinis oro kiekis išliko nepakitęs - 137,5 t/h. Kuro ir oro santykis degimo kameroje išliko vienodas abejose simuliacijose - 2,375. Emisijas paveikė gamtinėse dujose esantis CO₂ ir N₂. Kiekvieno iš šių elementų kiekis gamtinių dujų struktūroje nulėmė emisijų reikšmes. Padidėjęs kure esančio anglies dvideginio kiekis atsispindės padidėjusiu šio cheminio junginio kiekiu dūmuose. Šiuo

atveju kure esančiam CO₂ kiekiui pasikeitus nuo 0,1 proc. iki 2 proc., dūmuose esanti anglies dvideginio koncentracija padidėjo nuo 0,0311 proc. iki 0,622 proc. Tarp atliktų simuliacijų gauti parametrų standartiniai nuokrypiai. Aktyviosios galios standartinis nuokrypis - $\sigma = 3,2033$ MW. Dujų turbinos kompresoriaus mentelių kampo standartinis nuokrypis - $\sigma = 0,4356^\circ$. Gamtinių dujų srauto į degimo kamerą standartinis nuokrypis - $\sigma = 0,3440$ t/h. Dūmų srauto dujų turbinos išmetime standartinis nuokrypis - $\sigma = 16,1705$ t/h.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

Straipsnis iš internetinės svetainės

1. Šiluminis variklis. [žiūrėta 2016-04-01] Prieiga per internetą: <<http://mokslasplius.lt/naujienos/2011/02/06/galb%C5%ABt-ma%C5%BEiausias-%C5%A1iluminis-variklis>>;

Literatūrinis šaltinis

2. Halliday, Resnick & Walker. Fundamentals of Physics, 5th edition. John Wiley & Sons, 1997. Chapter 21, Entropy and the Second Law of Thermodynamics;

Straipsnis iš internetinės svetainės

3. Rankine ciklas. [žiūrėta 2016-04-01] Prieiga per internetą: <http://www.babylon-software.com/definition/Rankine_ciklas/Other>;

Straipsnis iš internetinės svetainės

4. Mario Guadalajara Saiz. Rankine cycle with post-heating using refrigerator thermalmachine (Tec-Ratio cycle). [žiūrėta 2016-04-01] Prieiga per internetą: <<http://tec-ratio.com/pdf/Memory.pdf>>;

Straipsnis iš internetinės svetainės

5. Thermodynamics and Propulsion. 3,7 Braytons Cycle. [žiūrėta 2016-04-01] Prieiga per internetą: <<http://web.mit.edu/16.unified/www/SPRING/propulsion/notes/node27.html>>;

Straipsnis iš internetinės svetainės

6. Bechtel. Constant volume combustion: the ultimate gas turbine cycle. [žiūrėta 2016-04-01] Prieiga per internetą: <http://www.bechtel.com/getmedia/367ca810-e570-48a6-95ea-2fe930c2581e/Gulen-PulseDetArticle_GTW_Nov-Dec2013/>;

Literatūrinis šaltinis

7. Petras Švenčianas, Arvydas Adomavičius. Inžinerinė termodinamika. KTU leidykla „Technologija“, 2011.;

Paveikslas iš internetinēs svetainēs

8. Brayton Cycle. [žiūrēta 2016-04-03] Prieiga per internetu:
<https://en.wikibooks.org/wiki/Jet_Propulsion/Thermodynamic_Cycles>;

Straipsnis iš internetinēs svetainēs

9. Brayton cycle. [žiūrēta 2016-04-03] Prieiga per internetu:
<<http://www.mhlt.uwaterloo.ca/courses/me354/lectures/pdf/c8.pdf>>;

Literatūrinis šaltinis

10. El-Wakil. Power Plant Technology, McGraw-Hill, New York, 1984;

Straipsnis iš internetinēs svetainēs

11. Power generation handbook. Chapter 12 – Gas turbine combustors. [žiūrēta 2016-04-03] Prieiga per internetu:
<<http://www.albadronline.com/oldsite/books/POWER%20GENERATION%20HANDBOOK/Power%20Generation%20Handbook-Part2.pdf>>;

Straipsnis iš internetinēs svetainēs

12. Fred Landis. Gas-turbine engine. [žiūrēta 2016-04-11] Prieiga per internetu:
<<http://www.britannica.com/technology/gas-turbine-engine>>;

Straipsnis iš internetinēs svetainēs

13. Office of Fossil Energy. How gas turbine power plants work. [žiūrēta 2016-04-11] Prieiga per internetu: <<http://energy.gov/fe/how-gas-turbine-power-plants-work>>;

Straipsnis iš internetinēs svetainēs

14. Albany State University. Study on steam turbines. [žiūrēta 2016-03-11] Prieiga per internetu:
<<https://www.coursehero.com/file/p15ocnn/There-are-four-processes-in-the-Rankine-cycle-each-changing-the-state-of-the/>>;

Straipsnis iš internetinēs svetainēs

15. Vapour & combined power cycle. Rankine cycle: The ideal cycle for vapour power cycles. [žiūrēta 2016-04-11] Prieiga per internetu: <<http://sounak4u.weebly.com/vapour--combined-power-cycle.html>>;

Straipsnis iš internetinēs svetainēs

16. Power Generation. Combined-cycle power plant – how it works. [žiūrēta 2016-03-14] Prieiga per internetu: <<https://powergen.gepower.com/resources/knowledge-base/combined-cycle-power-plant-how-it-works.html>>;

Straipsnis iš internetinēs svetainēs

17. Jaime López. Combined Cycle Plant for Power Generation: Introduction. [žiūrēta 2016-02-20] Prieiga per internetu: <<http://www.wartsila.com/energy/learning-center/technical-comparisons/combined-cycle-plant-for-power-generation-introduction>>;

Paveikslas iš internetinēs svetainēs

18. Enggcyclopedia. Process design. Combined Cycle Power Plant. [žiūrēta 2016-04-12] Prieiga per internetu: <<http://www.enggcyclopedia.com/2011/12/combined-cycle-power-plant/>>;

Informacija iš internetinēs svetainēs

19. „Metso DNA“ ģmonēs paskirstyto valdymo sistema. [žiūrēta 2016-04-12] Prieiga per internetu: <http://alab.ee/edu/system/files/kristina.vassiljeva/courses/ISS0065/2013_Autumn/materials/Process%20Control%20System.pdf>;

Informacija iš internetinēs svetainēs

20. „General Electric“ ģmonēs paskirstyto valdymo sistema. [žiūrēta 2016-03-18] Prieiga per internetu: <<http://www.geautomation.com/products/mark-vie>>;

Informacija iš internetinēs svetainēs

21. „Emerson“ ģmonēs paskirstyto valdymo sistema. [žiūrēta 2016-02-21] Prieiga per internetu: <<http://www.slideshare.net/waleedmahmoud1881975/41-ovation-dcs-2007>>;

Informacija iš internetinės svetainės

22. „Siemens“ įmonės paskirstyto valdymo sistema. [žiūrėta 2016-03-12] Prieiga per internetą: <<http://cryptome.org/0003/siemens-pcs7.pdf>>;

Informacija iš internetinės svetainės

23. „ABB“ įmonės paskirstyto valdymo sistema. [žiūrėta 2016-04-15] Prieiga per internetą: <<http://new.abb.com/control-systems/system-800xa/800xa-dcs>>;

Skaidrės ir paveikslai iš internetinės svetainės

24. M. Binkis, R. Šeinauskas. Paskirstytų sistemų projektavimas 2008 [žiūrėta 2016-03-11] Prieiga per internetą: <http://kopustas.elen.ktu.lt/studentai/lib/exe/fetch.php?media=paskirstytu_sistemu_projektavimas.ppt>;

Straipsnis iš internetinės svetainės

25. Combustion analysis basics 2004. [žiūrėta 2016-03-05.] Prieiga per internetą: <http://www.tsi.com/uploadedFiles/_Site_Root/Products/Literature/Handbooks/CA-basic-2980175.pdf>;

Literatūrinis šaltinis

26. K. Gimbutis, K. Kujatis. Šiluminė technika, Vilnius 1993, p 161;

Straipsnis iš internetinės svetainės

27. Researchgate. How to Evaluate Models: Observed vs. Predicted or Predicted vs. Observed? Article in Ecological Modelling 216(3-4):316-322. September 2008. [žiūrėta 2016-04-20] Prieiga internete: <https://www.researchgate.net/publication/230692926_How_to_Evaluate_Models_Observed_vs_Predicted_or_Predicted_vs_Observed>;

PRIEDAI

Priedas 1. SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS

KCB – kombinuoto ciklo blokas;

KC – kombinuotas ciklas;

AFR – iš angl. Kalbos ‘air to fuel ratio’. Oro ir kuro santykis;

ŠUGG – šilumą utilizuojantis garo generatorius;

DCS arba DC – iš angl. Kalbos ‘distributed control system’. Paskirstyto valdymo sistemos;

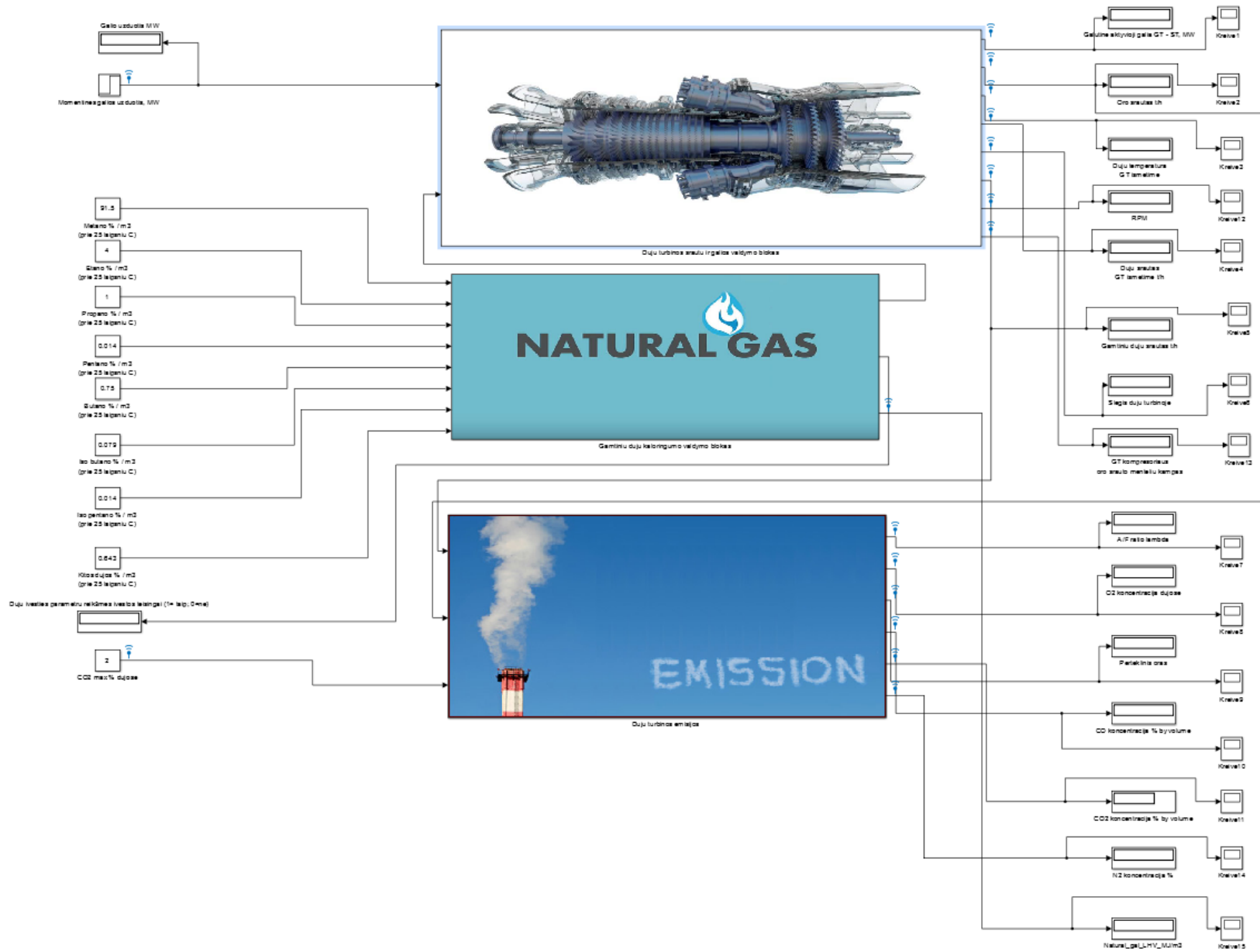
CO₂ – cheminė anglies dvideginio formulė;

CO – cheminė anglies monoksido formulė;

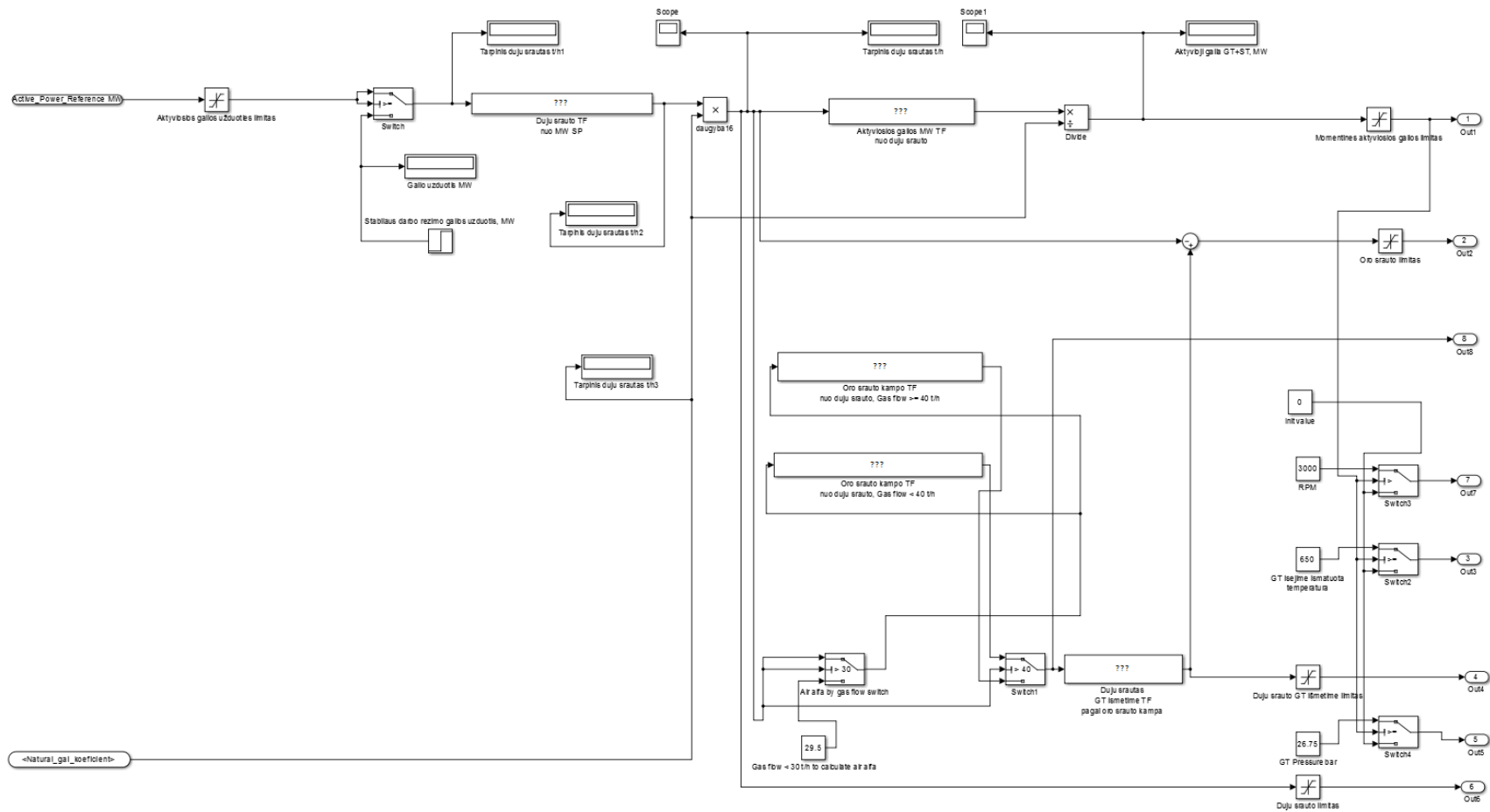
N₂ – cheminė azoto formulė;

TF – iš angl. Kalbos ‘Transfer function’. Perdavimo funkcija.

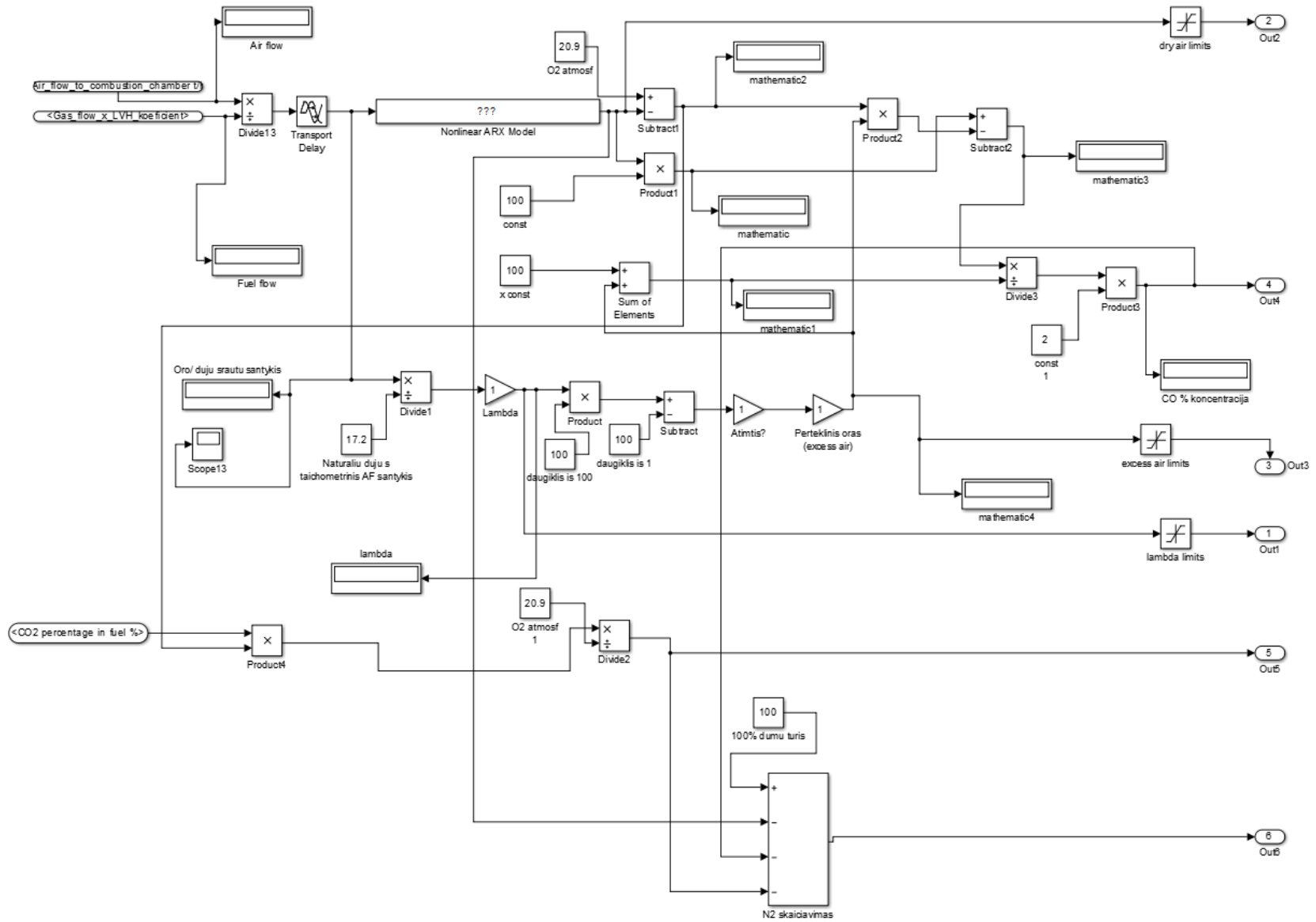
Priedas 2. Kombinuoto ciklo bloko dujų turbinos *Simulink* modelis



Priedas 3. Dujų turbinos srautų ir galios valdymo *Simulink* modelis



Priedas 4. Dujų turbinos emisijų skaičiavimų *Simulink* modelis



Priedas 5. Dujų turbinos gamtinių dujų kaloringumo skaičiavimų *Simulink* modelis

