



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

**Virginijus Vasylius**

**KOGENERACINĖS ELEKTRINĖS DALYVAVIMO DAŽNIO**  
**REGULIAVIME TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Doc. dr. Audrius Jonaitis

**KAUNAS, 2018**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**  
**ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA**

**KOGENERACINĖS ELEKTRINĖS DALYVAVIMO DAŽNIO  
REGULIAVIME TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas  
Energinės technologijos ir ekonomika (kodas 621E30004)

**Vadovas**

(parašas) Doc. dr. Audrius Jonaitis  
(data)

**Recenzentas**

(parašas) Doc. dr. Inga Konstantinavičiūtė  
(data)

**Projektą atliko**

(parašas) Virginijus Vasylius  
(data)

**KAUNAS, 2018**



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Virginijus Vasylius

(Studento vardas, pavardė)

Energijos technologijos ir ekonomika, 621E30004

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Kogeneracinės elektrinės dalyvavimo dažnio reguliavime tyrimas“

### AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 18 m. gegužės 22 d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Virginijaus Vasyliaus** baigiamasis projektas tema „Kogeneracinės elektrinės dalyvavimo dažnio reguliavime tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

\_\_\_\_\_  
(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

\_\_\_\_\_  
(parašas)

Vasylius, Virginijus. Kogeneracinės elektrinės dalyvavimo dažnio reguliavime tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Audrius Jonaitis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

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

Reikšminiai žodžiai: elektros energetikos sistema, garo turbinos modelis, kogeneracinės elektrinės modelis, dažnio reguliavimas.

Kaunas, 2018. 60 p.

## **SANTRAUKA**

Magistro baigiamajame darbe atliktas kogeneracinės elektrinės dalyvavimo dažnio reguliavime tyrimas. Apibūdintas bei pagrįstas šios temos aktualumas ir svarba dabartinėje bei būsimoje elektros energetikos sistemoje. Šiam tyrimui atlikti apžvelgta esama literatūra bei pateikti pagrindiniai modeliavimo principai. Remiantis šiais modeliavimo principais sumodeliuota elektrinės garo turbina ir pagrindinio reguliavimo vožtuvas, pateikti pastovios galios, pastovaus slėgio bei koordinuoto reguliavimo valdymo režimų modeliai. Taip pat šiame darbe išnagrinėtas elektrinės generuojamos galios kitimas esant šuoliniam dažnio pokyčiui minėtų valdymo režimų metu bei nustatyta, kuris režimas tinkamiausias dalyvaujant elektros energetinės sistemos dažnio reguliavime.

Vasylius, Virginijus. Analysis of the Combined Heat and Power Plant Participation in the Frequency Control: Master's thesis in Energy Technologies and Economics / supervisor doc. dr. Audrius Jonaitis; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Department of Electric Power Systems.

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

Keywords: power system, team turbine model, combined heat and power plant model, frequency control.

Kaunas, 2018. 60 p.

## **SUMMARY**

This paper investigates combined heat and power plant participation in the frequency control. The paper also describes the relevance and importance of this topic in the current and future electricity system. For this analysis, the current literature and the main principles of modeling were reviewed. Based on these modeling principles, an electric steam turbine and a main regulating valve were simulated, as well as models of constant power, constant pressure and coordinated control regimes. Also, in this work the power generation changes in the case of a jump-frequency change during the mentioned control regimes are analyzed and it is determined which control regime is best suited in the control of the frequency of the power system.

# TURINYS

SANTRUMPOS .....	10
ĮVADAS .....	11
1. TEMOS AKTUALUMO PAGRINDIMAS .....	12
1.1. AEI naudojimo skatinimas Lietuvoje ir Europoje .....	12
1.2. ES energetikos politika, direktyva 2009/28/EB dėl skatinimo naudoti atsinaujinančių išteklių energiją bei Atsinaujinančių išteklių energetikos įstatymas .....	12
1.3. Lietuvos biokuro potencialas .....	13
1.4. Lietuvos elektros energetikos sistemos sinchronizacija su KET bei ENTSO-E asociacijos vaidmuo .....	14
1.5. Kogeneracija ir jos efektyvumas .....	16
2. ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMOS PIRMINIS DAŽNIO REGULIAVIMAS, ESAMA SITUACIJA BEI ENTSO-E REIKALAVIMAI .....	18
3. ŠILUMINIŲ ELEKTRINIŲ VALDYMO REŽIMŲ BEI DALYVAVIMO DAŽNIO REGULIAVIME MODELIAVIMAS .....	21
3.1. Automatinio valdymo sistemos grandis ir jos perdavimo funkcija .....	21
3.2. Garo turbinų modeliavimas .....	22
3.3. Turbinos reguliatorių modeliavimas .....	28
3.4. Agregatų valdymo režimų modeliavimas .....	29
3.5. Agregatų dalyvavimo dažnio reguliavime modeliavimas .....	34
4. KOGENERACINĖS JĖGAINĖS DALYVAVIMO PIRMINIAME DAŽNIO REGULIAVIME TYRIMAS .....	37
4.1. Kogeneracinės jėgainės apibūdinimas: įranga, pagrindiniai komponentai .....	37
4.2. Garo turbinos modelis .....	38
4.3. Turbinos pagrindinio valdymo vožtuvo modelis .....	38
4.4. Jėgainės reakcijos į šuolinį dažnio pokytį tyrimas .....	39
4.4.1. Pastovios galios valdymo režimas .....	39
4.4.2. Pastovaus slėgio valdymo režimas .....	41
4.4.3. Koordinuoto reguliavimo režimas .....	42
4.5. Turbinų reguliatorių įtaka pirminiam dažnio reguliavimui .....	44
IŠVADOS .....	47
LITERATŪRA .....	48
PRIEDAI .....	51
1 Priedas. Dažnio išlaikymo rezervų charakteristikos įvairiose sinchroninėse zonose .....	52
2 Priedas. Ribos ir reikalavimai, taikomi keičiantis dažnio išlaikymo rezervais .....	53
3 Priedas. Kogeneracinės jėgainės blokinė schema .....	54
4 Priedas. Kogeneracinės jėgainės sklypo planas .....	55
5 Priedas. Pastovios galios valdymo režimo modelis .....	56

6 Priedas. Pastovaus slėgio valdymo režimo modelis .....	57
7 Priedas. Koordinuoto reguliavimo režimo modelis .....	58
8 Priedas. Jėgainės reguliatorių įtaka pirminiam dažnio reguliavimui keičiantis sistemos parametrams .....	59

## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Tradicinės ir kogeneracinės elektrinės palyginimas .....	16
3.1 pav. Automatinio valdymo sistemos grandies vaizdas.....	21
3.2 pav. Garo turbinos cilindro schema.....	22
3.3 pav. Garo turbinos su tarpiniu garo perkaitintuvu technologinė schema .....	23
3.4 pav. Garo indo schema .....	24
3.5 pav. Klasikinės komponuotės vieno veleno garo turbinos dinaminio modelio struktūrinė schema	26
3.6 pav. Supaprastinta vieno veleno garo turbinos dinaminio modelio struktūrinė schema .....	27
3.7 pav. Supaprastinta garo turbinos pagrindinio reguliavimo vožtuvo valdymo struktūrinė schema .....	29
3.8 pav. Generatorinio agregato pastovaus slėgio režimo modeliavimo schema .....	32
3.9 pav. Generatorinio agregato koordinuoto valdymo režimo modeliavimo schema .....	33
3.10 pav. Perdavimo funkcija, apibūdinanti ryšį tarp rotoriaus greičio ir sukimo momentų.....	34
3.11 pav. Perdavimo funkcija, apibūdinanti ryšį tarp rotoriaus greičio ir mechaninės bei elektrinės galios pokyčių .....	35
3.12 pav. Perdavimo funkcija, apibūdinanti ryšį tarp rotoriaus greičio ir mechaninės galios bei nuodadžnio nepriklausančios apkrovos pokyčių.....	36
3.13 pav. Supaprastinta turbinos regulatoriaus sistema .....	36
4.1 pav. Garo turbinos modelis .....	38
4.2 pav. Turbinos pagrindinio valdymo vožtuvo modelis.....	39
4.3 pav. Pastovios galios valdymo režimo modelis .....	39
4.4 pav. Turbinos galios kitimas reaguojant į dažnio pokytį pastovios galios valdymo režimo metu... 40	
4.5 pav. Pastovaus slėgio valdymo režimo modelis.....	41
4.6 pav. Turbinos galios kitimas reaguojant į dažnio pokytį pastovaus slėgio valdymo režimo metu .. 42	
4.7 pav. Koordinuoto reguliavimo režimo modelis.....	43
4.8 pav. Turbinos galios kitimas reaguojant į dažnio pokytį koordinuoto reguliavimo režimo metu ... 44	
4.9 pav. Turbinų regulatorių įtakos sistemos dažniui modelis.....	45
4.10 pav. Turbinos regulatorių įtaka sistemos dažniui atsiradus galios disbalansui .....	45
4.11 pav. Elektrinės generuojamos galios pokytis atsiradus galios disbalansui .....	46



## LENTELIŲ SĄRAŠAS

4.1 lentelė. Temperatūrinis grafikas .....	37
--	----

## **SANTRUMPOS**

AEI – atsinaujinantys energijos ištekliai,

CŠT - centralizuotas šilumos tiekimas,

ES – Europos Sąjunga,

ENTSO-E - Europos elektros perdavimo sistemos operatorių asociacija (angl. European Network of Transmission System Operators for Electricity),

EES – elektros energetikos sistema,

KET – kontinentinės Europos tinklas.

## IVADAS

Dėl nuolatinio žmonių skaičiaus pasaulyje didėjimo yra manoma, kad jau 2050 m. šis skaičius turėtų būti didesnis nei 12 milijardų. Sparčiai besivystant ekonomikai, energijos poreikis neišvengiamai auga bei 2050 m. turėtų išaugti keletą kartų.

Vis intensyvesnis iškastinių energetinių išteklių naudojimas norint patenkinti didėjančią energijos poreikį, veda į ekologinę katastrofą bei, žinoma, šių išteklių stoką. Todėl didesnis dėmesys bei investicijos yra skiriamos atsinaujinantiems energijos šaltiniams. Naudojant atsinaujinančius energijos šaltinius būtų mažinama planetos tarša bei prisidedama prie ES aplinkosaugos direktyvų įgyvendinimo. Pagal Europos Parlamento ir Tarybos Direktyvą 2009/28/EB dėl skatinimo naudoti atsinaujinančių išteklių energiją, Lietuva turi užtikrinti, kad 2020 m. atsinaujinančių išteklių energijos dalis patenkintų viso energijos poreikio ne mažiau kaip 23 procentus.

Efektyvus sprendimas šiam tikslui pasiekti yra biokuro kogeneracinės elektrinės. Šiose elektrinėse gaminama dviejų rūšių energija – elektros ir šilumos, todėl kogeneracinės jėgainės efektyvumas gali pasiekti 90 proc. ar daugiau nuo sudeginamo kuro energetinės vertės. Tuo pačiu taip prisidedama prie planetos taršos mažinimo, nes biokuras pripažįstamas atsinaujinančiu energijos ištekliu.

Taip pat ateityje numatomas kogeneracinių elektrinių pajėgumų augimas Baltijos šalių elektros energetikos sistemoje, o tai svarbu žinant, jog šią sistemą ketinama sinchronizuoti su Kontinentinės Europos tinklu ir pirminis dažnis nebebus reguliuojamas IPS/UPS sistemoje.

Būtent dėl minėtų priežasčių šio baigiamojo magistrinio darbo tikslas – sudaryti kogeneracinės elektrinės turbinos regulatoriaus dinaminis modelius ir ištirti galimybę dalyvauti dažnio reguliavime.

Tikslui pasiekti išsikelti šie darbo uždaviniai:

- 1) Išnagrinėti kogeneracinių elektrinių plėtros galimybes ir galimą įtaką elektros energetikos sistemai;
- 2) Išnagrinėti elektros energetikos sistemos dažnio reguliavimo reikalavimus;
- 3) Sudaryti šiluminių elektrinių valdymo režimų modeliavimo metodiką;
- 4) Sudaryti kogeneracinės elektrinės turbinos regulatoriaus modelius, leidžiančius analizuoti įvairius valdymo režimus;
- 5) Ištirti kogeneracinės elektrinės reakciją į dažnio pokytį ir nustatyti regulatorių įtaką pirminiam dažnio reguliavimui.

# 1. TEMOS AKTUALUMO PAGRINDIMAS

## 1.1. AEI naudojimo skatinimas Lietuvoje ir Europoje

Atsinaujinančių energijos išteklių naudojimas tampa vis dažnesnė ir aktualesnė tema Europoje bei Lietuvoje. Šie ištekliai mažina iškastinio kuro naudojimą, šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetimą bei įvairina energijos tiekimą. Taip pat iškastinio kuro rinka pastaraisiais metais yra itin nestabili (ypač naftos ir dujų), o tai skatina vis labiau atsigręžti į atsinaujinančius energijos išteklius.

Tiek ES, tiek Lietuvos energetikos politika yra aiškiai orientuota į tris pagrindinius tikslus: energijos tiekimo saugumą, tvarią plėtrą bei efektyvią konkurenciją, kuri vartotojams garantuotų mažesnes energijos išteklių kainas. Šie tikslai apibrėžti Lietuvos nacionalinėje energetinės nepriklausomybės strategijoje, Atsinaujinančių išteklių energetikos įstatyme bei kituose teisės aktuose, kurie atspindi ES norminių dokumentų, Energijos chartijos sutarties, Jungtinių tautų bendrosios klimato kaitos konvencijos, Kioto protokolo ir kt. teisės aktų nuostatas. Todėl toliau šiek tiek detalčiau apibūdinta ES bei Lietuvos energetikos politika.

## 1.2. ES energetikos politika, direktyva 2009/28/EB dėl skatinimo naudoti atsinaujinančių išteklių energiją bei Atsinaujinančių išteklių energetikos įstatymas

Atsinaujinančių energijos išteklių naudojimas, energetikos sektoriaus poveikio aplinkai mažinimas bei energijos vartojimo efektyvumo didinimas yra vieni iš pagrindinių Europos sąjungos pastarųjų metų energetikos politikos tikslų. Taip pat siekiant įgyvendinti Europos vadovų tarybos iškeltus ambicingus tikslus: iki 2020 m. šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetimą sumažinti 20 procentų, o iki 2050 m. – 80 – 95 procentus, buvo priimta eilė direktyvų ir reglamentų [1]. Viena iš aktualiausių kovojant su klimato kaita yra direktyva 2009/28/EB dėl skatinimo naudoti atsinaujinančių išteklių energiją.

Europos Parlamento ir Tarybos direktyva 2009/28/EB dėl skatinimo naudoti atsinaujinančių išteklių energiją (toliau – Direktyva 2009/28/EB), kuri buvo priimta 2009 m. balandžio 23 d., yra vienas iš pirmųjų Europos Sąjungos institucijų bandymų nustatyti atsinaujinančių energijos išteklių suvartojimo taisykles. Šia direktyva siekiama, jog iš atsinaujinančių energijos išteklių gaunamos energijos suvartojimas sudarytų ne mažiau kaip 20 procentų visos Europos sąjungoje sunaudojamos energijos [2].

Be konkrečių atsinaujinančių energijos išteklių rodiklių nustatymo, direktyvoje dėmesys skiriamas ir atsinaujinančių energijos išteklių naudojimui CŠT sektoriuje skatinti. Direktyvoje reikalaujama:

- 1) Europos sąjungos valstybių ūkio subjektai rekonstruodami, projektuodami ar statydami gyvenamosios paskirties ar pramoninius pastatus užtikrintų, kad diegiami elektros energijos, šildymo ar aušinimo įrenginiai naudotų atsinaujinančių išteklių energiją. Centralizuotai tiekiant šilumą ir vėsumą atsinaujinančių energijos išteklių naudojimas turėtų būti taip pat užtikrinamas.
- 2) Statybos reglamentai ir kodeksai bei kiti panašų poveikį turintys dokumentai iki 2014 metų pabaigos būtų papildyti kapitališkai atnaujinamuose pastatuose naudojamais minimaliais atsinaujinančių energijos išteklių kiekiais. Vienas iš pagrindinių aspektų yra tai, jog leidžiama, kad šie minimalūs kiekiai būtų užtikrinami centralizuotai tiekiant šilumą ir vėsumą. Tačiau šios energijos gamyboje didelę dalį turi sudaryti atsinaujinantys energijos ištekliai [1].

Atsinaujinančių energijos išteklių įstatymas, kuris buvo priimtas 2011 metais Lietuvos Respublikos Seime, buvo vienas iš pirmųjų siekiant įgyvendinti Europos sąjungos direktyvą 2009/28/EB bei skatinant atsinaujinančių energijos išteklių naudojimą Lietuvoje. Šiuo įstatymu siekiama, kad 2020 m. iš atsinaujinančių energijos išteklių gaminamos energijos dalis nuo bendro galutinio šalies energijos suvartojimo sudarytų ne mažiau nei 23 procentus, o elektros energetikos sektoriuje ši dalis sudarytų ne mažiau kaip 20 procentų. Šį tikslą būtų galima pasiekti efektyviai vartojant energiją bei skatinant naudoti pažangiausias atsinaujinančių energijos išteklių technologijas. Taip pat įstatymu pabrėžiama, jog vis platesnis ir dažnesnis šių išteklių naudojimas energijos gamybai yra labai svarbus tikslas valstybės energetikos politikoje.

Pagal dabartines prognozes bei vis didėjantį atsinaujinančių energijos išteklių naudojimą energijos gamyboje, 2020 metais Lietuva planuoja viršyti šį tikslą ir vis plačiau yra kalbama apie bendradarbiavimo galimybes su kitomis Europos Sąjungos valstybėmis. Todėl 2017 metais Lietuva ir Liuksemburgas pasirašė bendradarbiavimo sutartį. Šia dvišale sutartimi numatoma, jog Lietuva perleis savo viršytą atsinaujinančių energijos išteklių rodiklio kiekį Liuksemburgui, kuris dėl ribotų resursų bei geografinės padėties nustatyto tikslo pasiekti nepajėgus.

### **1.3. Lietuvos biokuro potencialas**

Biokuro potencialas Lietuvoje yra ganėtinai didelis. Viena iš pagrindinių biokuro rūšių naudojama tiek pramonėje, tiek energetikoje yra kietasis biokuras (malkinė mediena, medžio pramonės atliekos, miško kirtimo atliekos ir kt.). Skaičiuojama, jog vien iš miško kirtimo atliekų galima surinkti 731 tūkst. t. medienos. Taip pat kaimyninės Latvijos ir Lietuvos miškuose atkuriant ir išsaugant esamus miško išteklius galima surinkti 1927 tūkst. t medienos kurui.

Įvertinus nuo 2020 metų iki 2025 metų energetikoje galimus panaudoti medienos biokuro išteklius, gaunama apie 8,63 mln. kubinių metrų medienos. Toks kiekis medienos prilygsta 1,48 mln. tne (tonų naftos ekvivalento).

Nacionalinėje energetinės nepriklausomybės strategijoje pabrėžiama, jog Lietuvos energijos gamyboje reikšmingiausias pozicijas užima vėjo ir biokuro ištekliai. Taip pat numatoma, jog iki 2050 metų ne mažiau kaip 14 procentų Lietuvoje suvartojamas elektros energijos bus pagaminta iš biokuro išteklių didelio efektyvumo kogeneracinėse jėgainėse.

Nors vis didesnis dėmesys yra skiriamas biokuro išteklių naudojimo skatinimui Lietuvoje, tačiau atsižvelgiama ir į tvaraus ir subalansuoto miškų išteklių naudojimo užtikrinimą. Stengiamasi griežtai reglamentuoti ir kontroliuoti, jog šie ištekliai būtų naudojami racionaliai, nepaveikiant kitų ekosistemų ir išsaugant biologinę įvairovę.

#### **1.4. Lietuvos elektros energetikos sistemos sinchronizacija su KET bei ENTSO-E asociacijos vaidmuo**

Istoriškai susiklostė, jog mūsų šalies elektros energetikos sistema priklauso IPS/UPS sistemai. Ši sistema dar jungia Rusijos, Baltarusijos, Estijos, Latvijos bei kitų šalių sistemas. Todėl Lietuvos elektros energetikos sistema negali savarankiškai dirbti ir Europos energetikos žemėlapyje Lietuva kartu su Latvija ir Estija vis dar yra izoliuotas nuo likusios Europos.

Europos Sąjungoje šiuo metu yra skiriamas didelis dėmesys šios izoliuotos energetinės salos, kurią sudaro Lietuvos, Latvijos ir Estijos energetikos sistemos, panaikinimui, o vienas iš svarbiausių strateginių tikslų, keliamų Lietuvos elektros energetikos sektoriui – Lietuvos EES sujungimas su kontinentinės Europos tinklais (KET) darbui sinchroniniu režimu. Šiuo būdu tiek Lietuva, tiek Latvija ir Estija būtų visaverčiai integruotos į Europos elektros rinką.

KET sudaro daug ir įvairių elektros energetikos sistemų, todėl yra poreikis, kad visose jose būtų vienodos valdymo taisyklės ir darbo principai. Siekdama tai įtvirtinti ENTSO-E (angl. *European Network of Transmission System Operators for Electricity*) kuria tinklo kodeksus. Šie tinklo kodeksai apibrėžia ir nustato bendras KET priklausančių sistemų valdymo taisykles.

ENTSO-E organizacija buvo įsteigta 2008 m. gruodžio 19 d. Šiai asociacijai priklauso Europos perdavimo sistemos operatoriai iš 42 šalių bei tokios buvusios asociacijos kaip UCTE, NORDEL, BALTSO. ENTSO-E organizacijai taip pat priklauso Norvegija, Šveicarija, Airija ir Jungtinė Karalystė.

Taip pat labai svarbu pabrėžti ENTSO ir ACER organizacijų bendradarbiavimą. Šios organizacijos nuolat keičiasi informacija bei rūpinasi tinklo veiklos koordinavimu. Taip pat ENTSO rengia 10 metų tinklo investicijų planų, kurį peržiūri ACER bei pateikia pastabas. 10 metų tinklo investicijų planas yra rengiamas kas dvejus metus.

ENTSO-E paruoštus tinklo kodeksus galima išskirti į tris grupes: Rinkos kodeksai, Sistemos valdymo kodeksai bei Prijungimo kodeksai.

Kiekvienas tinklo kodeksas yra neatsiejama pastangų užbaigti vidinės Europos Sąjungos energijos rinkos sukūrimą dalis bei priemonė pasiekti Europos Sąjungos „20-20-20“ energetikos tikslus:

- 1) Sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetamus kiekius lyginant su 1990 metais ne mažiau 40 procentų;
- 2) Pasiiekti, jog ne mažiau 27 procentai nuo galutinio energijos suvartojimo sudarytų iš atsinaujinančių energijos išteklių gaunama energija;
- 3) Sutaupyti ne mažiau 27 procentus energijos lyginant su įprastu energijos suvartojimo scenarijumi;

ENTSO-E paruoštų Rinkos kodeksų rūšys:

- Pralaidumų paskirstymo ir perkrovų valdymo tinklo kodeksas (CACM, angl. *Capacity Allocation & Congestion Management*) nustato tarp sisteminių pralaidumų paskirstymo ir skaičiavimo bei valdymo taisykles.
- Išankstinio galių paskirstymo tinklo kodeksas (FCA, angl. *Forward Capacity Allocation*) reglamentuoja tarp sisteminių galių paskirstymą ateityje bei sudaro galimybes apsidrausti rinkos dalyviams.
- Elektros energijos balansavimo tinklo kodeksas (EB, angl. *Electricity Balancing*) nustato bendras taisykles elektros energijos balansavimo rinkai. Šis kodeksas taip pat apibūdina galios rezervų pirkimą, jų aktyvavimą bei atsiskaitymą už suteiktas paslaugas.

Sistemos valdymo kodeksai:

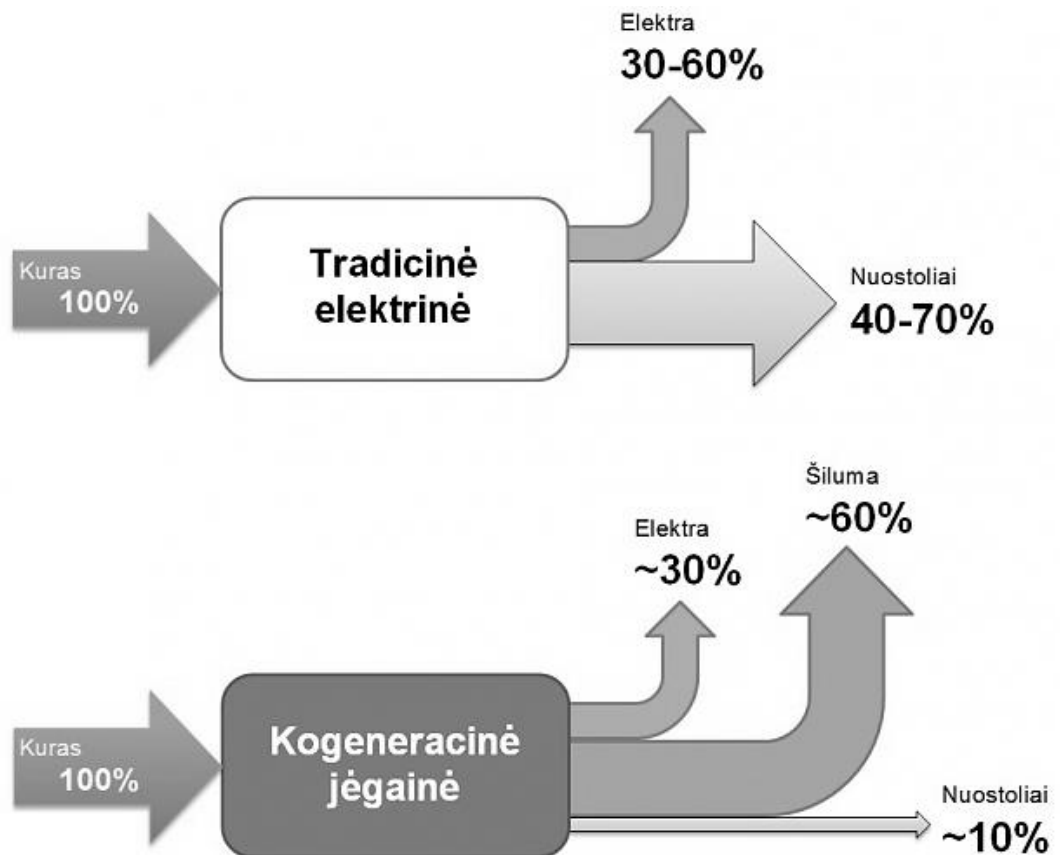
- Sistemos valdymo tinklo kodeksas (SO, angl. *System Operations*) nustato bendras sistemų valdymų taisykles, kurios reikalingos patikimam ir stabiliam sistemos darbui.
- Avarijų prevencijos ir likvidavimo tinklo kodeksas (ER, angl. *Emergency and Restoration*) taip pat reikalingas patikimam elektros energijos tiekimui užtikrinti. Šis kodeksas nustato esmines ir pagrindines taisykles likviduojant įvykusias avarijas.

Prijungimo kodeksai:

- Reikalavimų gamintojams tinklo kodeksas (RfG, angl. *Requirements for Generators*) apibrėžia taisykles ir reikalavimus generuojančių šaltinių įrangai.
- Vartotojų prijungimo tinklo kodeksas (DCC, angl. *Demand Connection Code*) nustato naujų vartotojų prisijungimo sąlygų reikalavimus.
- Aukštos įtampos nuolatinės srovės tinklo kodeksas (HVDC, angl. *High Voltage Direct Current Connections*) reglamentuoja dar ganėtinai mažai žinomus aukštos įtampos nuolatinės srovės įrangos reikalavimus [3].

## 1.5. Kogeneracija ir jos efektyvumas

Kogeneracija yra apibūdinama kaip elektros ir šilumos gamyba vieno technologinio proceso metu. Šio technologinio proceso metu kuro panaudojimo efektyvumas yra didesnis lyginant su tradicinėmis elektrinėmis (1.1 pav.). Tradicinėse elektrinėse kuro išnaudojimo efektyvumas yra nuo 30 iki 60 procentų, kai kogeneracinėse elektrinėse siekia 90 procentų ir nuostoliai sudaro tik 10 procentų.



1.1 pav. Tradicinės ir kogeneracinės elektrinės palyginimas [4]

Taip pat efektyviau panaudojant kurą yra mažinama aplinkos tarša šalinamais degimo produktais, o vieno technologinio proceso metu gaminti ir elektros, ir šilumos energiją yra ekonomiškai naudinga, nes gamyba tampa pigesnė.

Kondensacinės ir kogeneracinės elektrinių šilumos panaudojimo koeficientai yra išreiškiami tokiomis lygtimis [5]:

$$\eta_{KE} = \frac{E}{BQ_z^n} \quad (1.1)$$



$$\eta_{KOE} = \frac{E + Q}{BQ_{\frac{z}{z}}^n} \quad (1.2)$$

Čia:

$E$  – elektrinė galia, kW;

$Q$  – šiluminė galia, kW;

$B$  – sudeginamo kuro kiekis, kg/s;

$Q_{\frac{z}{z}}^n$  – žemutinė kuro degimo šiluma, kJ/kg.

Kondensacinėje elektrinėje gaminama tik elektros energija, todėl aukščiau esantis  $\eta_{KE}$  koeficientas nusako kiekybinį kondensacinės elektrinės energetinį efektyvumą. Kogeneracinėje elektrinėje, kaip ir buvo minėta, gamina dviejų rūšių energija ir pateiktas koeficientas  $\eta_{KOE}$  tik iš dalies nusako jėgainės energetinį efektyvumą, nes šilumos ir elektros energija yra nelygiavertės.

Kogeneracinės jėgainės suteikia galimybę padidinti energetinį saugumą diversifikuojant elektros energijos gamybos šaltinius bei juos decentralizuojant. Taip pat kogeneracija taikoma labai įvairiose srityse, pradedant nuo centralizuoto šilumos tiekimo ir baigiant ten, kur reikia šiluminės energijos garo ar perkaitinto vandens pavidalu: tai naftos, chemijos, maisto, popieriaus pramonė. Šiuo atveju jėgainė projektuojama pagal šilumos poreikį, nes elektros poreikis paprastai mažesnis.

## 2. ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMOS PIRMINIS DAŽNIO REGULIAVIMAS, ESAMA SITUACIJA BEI ENTSO-E REIKALAVIMAI

Pirminis reguliavimas yra apibūdinamas kaip stabilizuojantis automatinis aktyviosios galios balanso užtikrinimas per sekundžių laikotarpį valdymo rajono ar sinchroniškai dirbančios elektros energetikos sistemos mastu. Elektrinių generatoriai, turintys į dažnio nuokrypį reaguojančius reguliatorius, aktyviai dalyvauja vykdydami pirminį reguliavimą. Taip pat nuo sistemos dažnio priklausančių apkrovų galios atlieka pirminį reguliavimą, tačiau toks reguliavimas jau vadinamas pasyviu.

Elektros energetikos sistemos patikimam darbui labai svarbu, jog elektros generacija būtų adekvati ir energetikos sistemos generatorių galių suma būtų didesnė nei apkrovų galių ir didžiausio veikiančio generatoriaus galios suma.

Svarbiausi parametrai, nuo kurių priklauso dažnio nuokrypio kitimas bei dinamika:

- Generatoriaus ir turbinos inercijos momentas  $J$  arba atitinkama laiko pastovioji  $H$ .
- Greičio reguliatoriaus parametrai (pvz., greičio reguliatoriaus statizmas, elektrohidraulinio servomechanizmo laiko pastovioji, sklendės greičio riba ir pan.).
- Elektros linijų leistinoji galia. Dėl silpnų elektros perdavimo linijų leistinosios galios avarinės automatikos arba dažnio reguliatorių atsakas gali būtų uždelstas.
- Sistemos apkrovos slopinimo koeficientas. Tai pasireiškia tuo, jog apkrovų priklausomybės nuo dažnio gali būti skirtingos.

Taip pat dažnio kitimo dinamikai įtaką daro dažnio reguliatorių nustatymai, darbo laikas, relinės ir avarinės automatikos nustatymai, elektros sistemos struktūra, elektrinių tipas bei elektrinių generuojamos galios priklausomybė nuo su pertrūkiais dirbančių šaltinių ir pan.

Pirminė dažnio reguliavimo sistema yra pajėgi suvaldyti tokį maksimalų galios nuokrypį, kuris lygus [6]:

$$\Delta P = P_N \left( \frac{\Delta f_{maks}}{f_N \cdot S} + \frac{\Delta f_{maks} \cdot D}{f_N} \right) \quad (2.1)$$

Čia:

$S$  – greičio reguliatorių statizmas,

$\Delta f_{maks}$  – maksimalus leistinas dažnio nuokrypis nuo vardinės vertės,

$D$  – apkrovos slopinimo koeficientas,

$f_N$  – vardinis dažnis,

$P_N$  – vardinė generatorių galia.

Kad elektros energetikos sistema veiktų patikimai, reikalingi šie galios rezervai:

1. Pirminio rezervo paslauga. Sinchroninės zonos elektros energetikos sistemoje įvykus gedimui ar trikdžiui elektrinės, kurios užtikrina pirminio rezervo paslauga, trūkstamą elektros energijos kiekį turi pateikti per 30 sekundžių. Šį rezervą gali užtikrinti tik dirbančios elektrinės ir jis turi būti prieinamas 12 valandų.
2. Antrinio rezervo paslauga. Šis rezervas turi būti užtikrinamas per 15 minučių. Šiuo metu Lietuvoje antrinio rezervo paslaugą teikia Kruonio hidroakumuliacinė elektrinė, kurios rezervuaras ištuštėja per 12 valandų ir kuri antrinį rezervą gali pateikti tik per 2 minutes. 2018 m. antrinio avarinio galios rezervo numatoma užsakyti vidutiniškai 400 MW per valandą. Nustatant šio rezervo poreikį yra atsižvelgiama į didžiausią galimą trikdį, kas šiuo atveju yra „NordBalt“ gedimo galimybė.
3. Tretinio rezervo paslauga. Tretinio rezervo paslaugą teikiančios elektrinės turi pateikti šį rezervą per 12 valandų bei tiekimą užtikrinti mažiausiai 10 parų. Lietuvos elektros energetikos sistemai 2018 m. reikės 483 MW tretinio galios rezervo. Šis rezervas yra įsigyjamas aukciono būdu, kuris organizuojamas kartą metuose. 2018 metų aukciono laimėtojai yra „Orlen Lietuva“, „Panevėžio energija“, „Kauno termofikacijos elektrinė“ ir „Lietuvos energijos gamyba“.

Šiuo metu Lietuvos elektros energetikos sistema yra sujungta su Nepriklausomų valstybių sąjungos (NVS) Šiaurės vakarų elektros energetikos sistema. Baltijos šalių elektros energetikos sistemos dažnį centralizuotai valdo ir koordinuoja dispečerinė Maskvoje, o pirminį dažnio reguliavimą atlieka Rusijos elektros energetikos sistemos generatoriai. Pirminio dažnio reguliavimo rezervas palaikomas IPS/UPS sistemoje siekia 1200 MW. Minėtoje NVS elektros energetikos sistemoje veikia Volgos hidroelektrinių kaskada, turinti įtakos Lietuvos energetikos sistemos dažnio reguliavimui. Ją sudaro aštuonios hidroelektrinės, kurių suminė galia 8600 MW. Lietuvos elektros energetikos sistema palaiko tarp sisteminių srautų saldo leistinose ribose ( $\pm 50$  MW nuo suplanuotos valandinės vertės) ir taip netiesiogiai prisideda prie dažnio valdymo.

Galios rezervai Kontinentinės Europos tinklo sinchroninėje zonoje yra užtikrinami pagal ENTSO-E (Europos perdavimo sistemos operatorius – elektrai) taisykles. Elektros energetikos sistemoje reikiami pirminiai galios rezervai yra palaikomi bendrai, o dažnio reguliavimas atliekamas visai zonai. Pirminio rezervo dalis apskaičiuojama pagal šalies elektros energijos suvartojimą bei elektrinių generuojamą energiją ir kiekviena šalis turi užtikrinti savo sistemos viduje tam tikrą minėto rezervo dalį.

Pagal ENTSO-E paruoštą elektros energijos perdavimo sistemos eksploatavimo kodeksą pirminio dažnio reguliavimo paslaugą teikiantys nauji ar modernizuoti generatoriai turi atitikti šias nuostatas:

1. Nejautrumo zona turi būti ne didesnė už 10 mHz.
2. Laikas, per kurį turi būti suaktyvintas dažnio išlaikymo rezervas, 30s.
3. Regulatoriaus neveikimo zona turi turėti galimybę būti pakeisti  $\pm 200$  mHz.

Kitose sinchroninėse zonose dažnio išlaikymo rezervo charakteristikos šiek tiek skiriasi (1 priedas).

Perdavimo sistemos operatorius nusprendžia ir nustato generatorių statizmo koeficientus. Statizmo koeficientas turi būti nustatomas pagal sistemoje esančius reikalavimus (nuo 2 iki 12 procentų).

Taip pat pagal ENTSO-E taisykles generatoriai, teikiantys pirminio galios rezervo paslaugą, turi šį rezervą pateikti per 30 sekundžių (pusę šio rezervo turi pateikti per pirmąsias 15 sekundžių).

Kiekvienas žemyninės Europos sinchroninės zonos perdavimo sistemos operatorius turi užtikrinti, kad dažnio išlaikymo rezervo reagavimas atitiktų šiuos reikalavimus [7]:

a) pirminio galios rezervo aktyvinimas prasidėtų kuo greičiau po dažnio nuokrypio ir nebūtų dirbtinai vėlinamas;

b) jei dažnio nuokrypis ne mažesnis kaip 200 mHz, bent 50 % viso pirminio galios rezervo turi būti pateikta ne vėliau kaip po 15 sekundžių;

c) jei dažnio nuokrypis ne mažesnis kaip 200 mHz, 100 % viso pirminio galios rezervo turi būti pateikta ne vėliau kaip po 30 sekundžių;

d) jei dažnio nuokrypis ne mažesnis kaip 200 mHz, pirminio galios rezervo aktyvinimas turi didėti bent tiesiškai nuo 15 iki 30 sekundžių ir

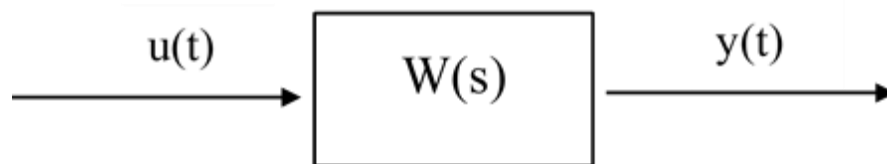
e) jei dažnio nuokrypis mažesnis kaip 200 MHz, susijęs aktyvintas pirminio galios rezervo pajėgumas turi būti proporcingas a-d punktuose nurodytai dinamikai laiko atžvilgiu.

### 3. ŠILUMINIŲ ELEKTRINIŲ VALDYMO REŽIMŲ BEI DALYVAVIMO DAŽNIO REGULIAVIME MODELIAVIMAS

Elektros energetikos sistemos šiluminių elektrinių pagrindiniai įrenginiai, dalyvaujantys generuojant elektros energiją: generatorius, turbina, katilas, kuro sistema ir jų reguliatoriai.

#### 3.1. Automatinio valdymo sistemos grandis ir jos perdavimo funkcija

Automatinio valdymo sistemos grandimi vadinamas įtaisas, elementas ar elektrinė schema, kuri reaguoja į išorinį signalą  $u(t)$  vadinamą įėjimo signalu arba poveikiu, suformuoja nuo jo priklausantį išėjimo signalą  $y(t)$ , dar vadinamą grandies reakcija. Šie signalai yra laiko  $t$  funkcijos. Grandies vaizdas parodytas 3.1 pav.



3.1 pav. Automatinio valdymo sistemos grandies vaizdas

Matematiškai išreikštas funkcinis ryšys tarp grandies įėjimo signalo  $u(t)$  ir išėjimo signalo  $y(t)$  yra grandies lygtis arba grandies matematinis modelis:

$$y(t) = f[u(t)] \quad (3.1)$$

Bendru atveju tiesinei grandžiai aprašyti naudojama diferencialinė lygtis, kurios bendroji išraiška tokia:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m u}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} u}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{du}{dt} + b_0 u \quad (3.2)$$

Taikydami (3.2) lygčiai, kai jos kintamųjų pradinės sąlygos lygios nuliui, Laplaso transformaciją, gauname:

$$\begin{aligned} a_n s^n y(s) + a_{n-1} s^{n-1} y(s) + \dots + a_1 s y(s) + a_0 y(s) = \\ = b_m s^m u(s) + b_{m-1} s^{m-1} u(s) + \dots + b_1 s u(s) + b_0 u(s) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Ši algebrinė lygtis yra (3.2) lygties Laplaso vaizdas. Čia signalai  $y(s)$  ir  $u(s)$  yra jau ne laiko  $t$ , o kompleksinio kintamojo  $s$  funkcijos ir yra vadinami signalų  $y(t)$  ir  $u(t)$  vaizdais. Iš (3.3) lygties išreiškę  $y(s)$  ir  $u(s)$  santykį, gauname reiškinį, vadinamą grandies perdavimo funkcija ir žymimą  $W(s)$ :

$$W(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (3.4)$$

Iš (3.4) lygties seka, kad išėjimo signalo vaizdas yra lygus įėjimo signalo vaizdai  $u(s)$ , padaugintam iš grandies perdavimo funkcijos  $W(s)$ :

$$y(s) = u(s) \cdot W(s) \quad (3.5)$$

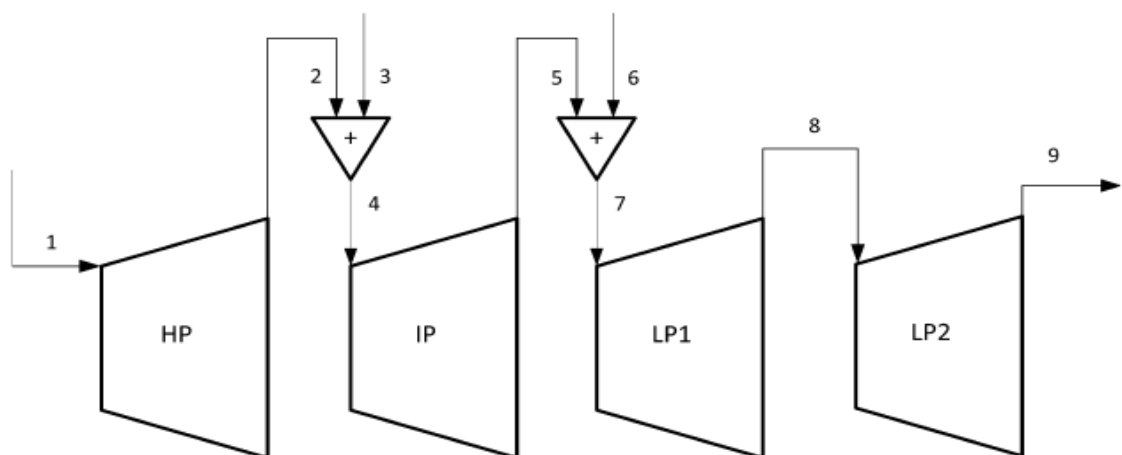
Taigi, grandies perdavimo funkcija  $W(s)$  yra išėjimo ir įėjimo signalų vaizdų santykis, esant nulinėms pradinėms sąlygoms.

### 3.2. Garo turbinų modeliavimas

Dažniausiai šiluminės elektrinės būna su dviejų tipų garo turbinomis:

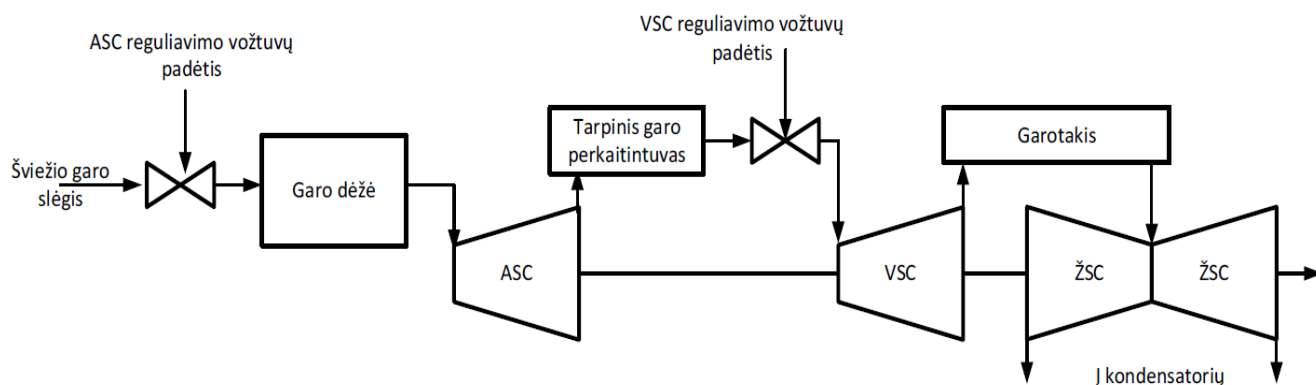
- Kondensacinėmis. Šios turbinos neturi tarpinio garo nuėmimo.
- Termofikacinėmis. Šios turbinos turi tarpinį garo nuėmimą, kuris panaudojamas šildymui ir (arba) pramonei.

3.2 paveikslėlyje pateiktoje garo turbinos schemeje matyti, jog pagrindiniai garo turbinos elementai yra aukšto, vidutinio ir žemo slėgio cilindrai [8, 9]:



3.2 pav. Garo turbinos cilindru schema

Iš aukšto slėgio cilindro į garo perkaitintuvą pateikęs garas yra perkaitinamas ir grąžinamas į vidutinio slėgio cilindrą. Garo turbinos tarpinio garo perkaitintuvo ar vidutinio slėgio cilindro gali ir neturėti. Tokiu atveju, garas iš aukšto slėgio cilindro keliauja tiesiai į žemo slėgio cilindrą. [10].



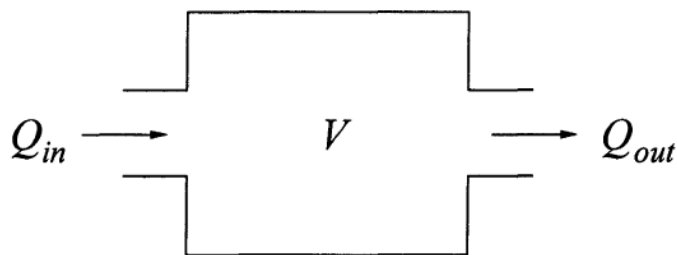
3.3 pav. Garo turbinos su tarpiniu garo perkaitintuvu technologinė schema [10]

Garo turbinos tiesinis matematinis modelis tiriant pereinamuosius procesus yra sudarytas iš šešių dalių, matomų 3.3 paveikslėlyje. Kiekviena ši dalis turi sau būdingą matematinę išraišką. Matematinės išraiškos sudėtis priklauso nuo toje dalyje vykstančių dinaminų procesų, o bendra šių išraiškų visuma nusako garo turbinos tiesinio matematinio modelio išraišką.

Dažniausiai garo turbinose būna keturi reguliavimo vožtuvai:

- 1) Pagrindinis stabdymo vožtuvas, kuris normalaus režimo metu būna atviras ir yra skirtas avariniam turbinos stabdymui;
- 2) Pagrindinis valdymo vožtuvas, kurį dažniausiai sudaro keletas lygiagrečiai arba nuosekliai dirbančių valdymo vožtuvų. Garo srautas turbinoje normalaus režimo metu yra reguliuojamas būtent šio vožtuvo.
- 3) Perkaitintuvo uždarymo vožtuvas;
- 4) Vidutinio slėgio valdymo vožtuvas, kuris reguliuoja bei valdo garo nuėmimų slėgį ar turbinos mechaninę galią pagreitėjimo atveju [10].

Prieš pradėdant daugiau gilintis į garo turbinų modelius, svarbu suprasti garo indo (3.4 pav.) laiko pastoviosios išraišką bei lygtį, kuria aprašomas šio garo indo tūris.



3.4 pav. Garo indo schema

Garo indą galima aprašyti tokia lygtimi [11, 12]:

$$\frac{dW}{dt} = V \cdot \frac{d\rho}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (3.6)$$

Čia:

$W$  – garo kiekis inde (kg),

$Q_{in}$  – įeinantis garo srautas (kg/s),

$Q_{out}$  – išeinantis garo srautas (kg/s),

$V$  – garo indo tūris ( $m^3$ ),

$\rho$  – garo tankis ( $kg/m^3$ )

$t$  – laikas (s).

Įvertinant tai, jog garo srautas iš garo indo yra proporcingas to indo slėgiui:

$$Q_{out} = P \cdot \frac{Q_0}{P_0} \quad (3.7)$$

Čia:

$P$  – garo slėgis inde (kPa),

$P_0$  – vardinis garo slėgis (kPa),

$Q_0$  – vardinis garo srautas iš indo (kg/s).

Jei inde temperatūra yra pastovi, tai:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{dP}{dt} \frac{\partial \rho}{\partial P} \quad (3.8)$$

Garo tankio pokytis nuo slėgio gali prie tam tikros temperatūros būti nustatomas iš garo lentelių.



Tada lygtis (3.6) gali būti išreiškiama:

$$Q_{in} - Q_{out} = V \frac{dP}{dt} \frac{\partial p}{\partial P} = V \frac{\partial p}{\partial P} \frac{P_0}{Q_0} \frac{dQ_{out}}{dt} \quad (3.9)$$

Priėmus, jog:

$$T_v = V \frac{\partial p}{\partial P} \frac{P_0}{Q_0} \quad (3.10)$$

Čia:

$T_v$  – garo indo laiko pastovioji (s).

Gaunama:

$$Q_{in} - Q_{out} = T_v \frac{dQ_{out}}{dt} \quad (3.11)$$

Pritaikius Laplaso transformaciją:

$$Q_{in} - Q_{out} = T_v \cdot s \cdot Q_{out} \quad (3.12)$$

Galiausiai garo indo tūris aprašomas aperiodinės grandinės perdavimo lygtimi [13]:

$$\frac{Q_{out}}{Q_{in}} = \frac{1}{1 + s \cdot T_v} \quad (3.13)$$

Garas, patekęs į turbiną, plečiasi ir šiluminė energija yra verčiama mechaniniu darbu. Todėl garo turbinos galia yra lygi suminei aukšto, vidutinio ir žemo slėgio cilindų galiai. Taip pat cilindru tekančio garo srautas yra proporcingas to cilindro galiai ir įsivedus galios proporcingumo koeficientus gaunama:

$$P_T = P_A + P_V + P_{\check{z}} = Q_A \cdot K_A + Q_V \cdot K_V + Q_{\check{z}} \cdot K_{\check{z}} \quad (3.14)$$

Čia:

$P_A, P_V, P_{\check{z}}$  – aukšto, vidutinio ir žemo slėgių cilindų galios (santykiniais vienetais),

$Q_A, Q_V, Q_{\check{z}}$  – aukšto, vidutinio ir žemo slėgių cilindų garo srautai (santykiniais vienetais),

$K_A$ ,  $K_V$ ,  $K_Z$  – aukšto, vidutinio ir žemo slėgių cilindrų galios proporcingumo koeficientai (santykiniais vienetais).

Jei garo turbina yra be tarpinio garo nuėmimo, priimama, jog visų cilindrų srautai yra lygūs ir garo turbinos (3.14) lygtis supaprastėja:

$$P_T = Q_T(K_A + K_V + K_Z) \quad (3.15)$$

Čia:

$Q_T$  – turbinos garo srautas (santykiniais vienetais).

Aukšto slėgio cilindro garo srautas normaliu režimu yra vienodas su turbinos garo srautu ( $Q_T = Q_A$ ).

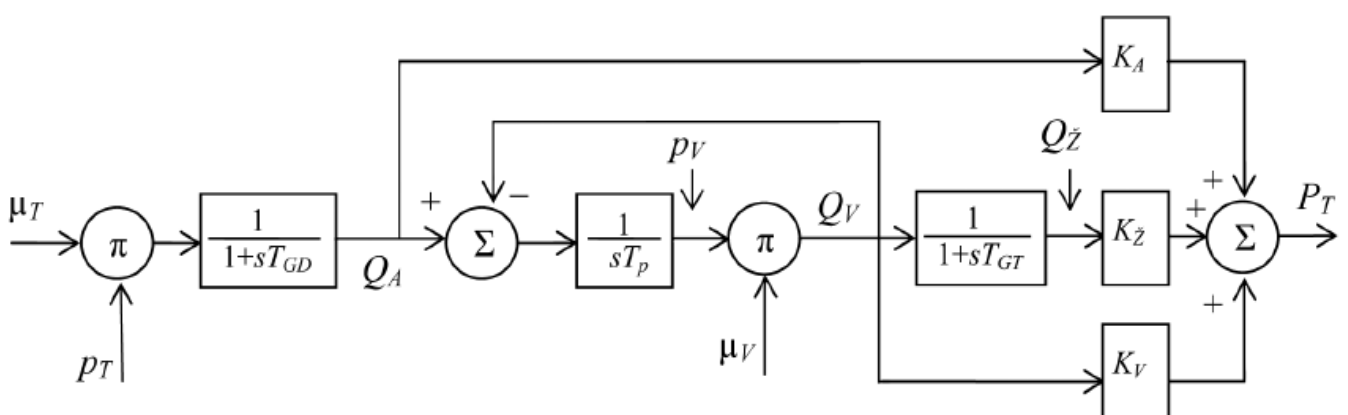
Turbinos garo perkaitintuvas, garotakis ir garo dėžė taip pat labai svarbūs ir vykstant pereinamiesiems procesams, nes jie įtakoja turbinos garo srautą ir galios dinamiką. Garo turbinos, sudarytos iš aukšto, vidutinio ir žemo slėgio cilindrų, tarpinio garo perkaitintuvo, garotakio bei garo dėžės dinaminio modelio struktūrinė schema pateikta 3.5 pav.

3.5 paveikslėlyje pateikta turbina yra klasikinė, turinti tik vieną veleną. Minėtame paveikslėlyje:

$p_T$ ,  $p_V$ ,  $\mu_T$ ,  $\mu_V$  – garo slėgiai turbinos įėjime ir tarpiniame garo perkaitintuve bei pagrindinio reguliavimo vožtuvo ir vidutinio slėgio reguliavimo vožtuvų plotai;

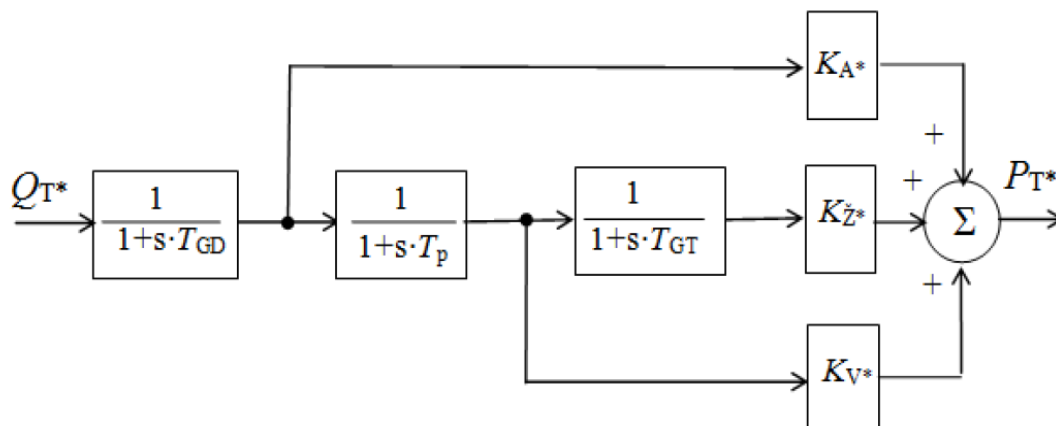
$T_{GD}$ ,  $T_P$ ,  $T_{GT}$  – garo dėžės, tarpinio garo perkaitintuvo ir garotakio tarp vidutinio ir žemo slėgio cilindrų laiko pastoviosios;

$Q_A$ ,  $Q_V$ ,  $Q_Z$  – aukšto, vidutinio ir žemo slėgio turbinos cilindrų garo srautai.



3.5 pav. Klasikinės komponentės vieno veleno garo turbinos dinaminio modelio struktūrinė schema [14]

Santykinų vienetų sistemoje į turbiną patenkantis garo srautas yra aprašomas kaip slėgio ir pagrindinio valdymo vožtuvo sandauga. Supaprastina garo turbinos dinaminio modelio struktūrinė schema pateikta 3.6 pav.



3.6 pav. Supaprastinta vieno veleno garo turbinos dinaminio modelio struktūrinė schema [17]

Kadangi garo srautas yra tiesiogiai proporcingas turbinos galiai, tai turbinos su tarpiniu garo nuėmimu vardinę galią galime išreikšti kaip garo srauto ir entalpijos pokyčio sandaugą [16]:

$$P_{TN} = Q_{TN} \cdot \Delta h_{pN} \quad (3.16)$$

Čia:

$\Delta h_{pN}$  – entalpijos pokytis neidealios politropinio garo plėtimosi turbinoje metu.

Toks pat principas gali būti taikomas ir tarpinio nuėmimo garo srauto atitinkančiai galiai rasti:

$$P_{nu} = Q_{nu} \cdot \Delta h_{pnu} \quad (3.17)$$

Čia:

$\Delta h_{pnu}$  – entalpijos pokytis,

$Q_{nu}$  – nuimamo garo srautas.

Santykiniais dydžiais:

$$P_{nu*} = Q_{nu*} \cdot \Delta h_{nu*} = \frac{Q_{nu}}{Q_{TN}} \cdot \frac{\Delta h_{pnu}}{\Delta h_{pTN}} \quad (3.18)$$

Jei turbina turi daugiau nei vieną tarpinę garo nuėmimo liniją, bendra santykinė tarpinius garo srautus atitinkanti galia randama susumuojant visas tarpinių garo srautų galias:

$$P_{nu*} = \sum_{i=1}^N P_{nu*i} \quad (3.19)$$

Garo turbinai su tarpiniu garo perkaitintuvu modeliuojant trumpalaikius pereinamuosius yra naudotinas tiesinis matematinis modelis. Šio turbinos perdavimo funkcija yra lygi galios ir garo srauto, kuris normaliu režimu yra lygus turbinos garo srautui, santykiui ir aprašoma žemiau esančia lygtimi [18]:

$$W_T = \frac{P_T}{Q_T} = \frac{K_V(1 + T_{GT} \cdot s) + K_{\check{z}} + K_A(1 + T_P \cdot s)(1 + T_{GT} \cdot s)}{(1 + T_{GT} \cdot s)(1 + T_P \cdot s)(1 + T_{GT} \cdot s)} \quad (3.20)$$

Čia:

$T_{GD}$  – garo dėžės laiko pastovioji (s),

$T_P$  – tarpinio garo perkaitintuvo laiko pastovioji (s),

$T_{GT}$  – garotakio tarp vidutinio slėgio ir žemo slėgio cilindrų laiko pastovioji (s),

$K_A$  – turbinos aukšto slėgio cilindro santykinė galia,

$K_V$  – turbinos vidutinio slėgio cilindro santykinė galia,

$K_{\check{z}}$  – turbinos žemo slėgio cilindro santykinė galia.

### 3.3. Turbinos reguliatorių modeliavimas

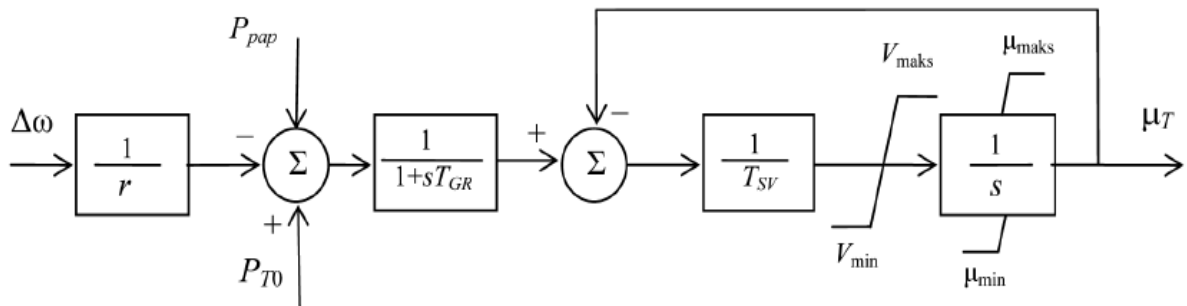
Turbinos galią galima reguliuoti greičio reguliatoriaus arba turbinos valdymo mechanizmo pagalba. Greičio reguliatorius reaguoja į veleno greičio nuokrypį nuo tam tikros užduotos vertės, o minėtasis valdymo mechanizmas keičia turbinos darbo tašką. Atsižvelgiant į turbinos galią bei veleno sukimosi greičio pokytį galima nusakyti pagrindinio valdymo vožtuvo plotą. 3.7 pav. pateiktoje suprastintoje garo turbinos pagrindinio reguliavimo vožtuvo valdymo struktūrinėje schemoje turbinos galia žymima  $P_{T0}$ , o veleno greičio pokytis  $\Delta\omega$ . Turbinos reguliatoriaus statizmas  $r$ , servovariklio ir greičio reguliatoriaus laiko pastoviosios  $T_{SV}$ ,  $T_{GD}$  turi didelę įtaką pereinamuoju procesu. Nuo jų priklauso reguliavimo vožtuvo eigos pobūdis. Sudarant matematinį garo turbinos greičio reguliavimo sistemos modelį, servovariklis bei reguliatorius yra apibūdinami inertine arba integravimo grandimi su tiesioginiu neigiamu grįžtamuoju ryšiu. Taip pat 3.7 pav. pavaizduotoje schemoje  $V_{maks}$ ,  $V_{min}$ ,  $\mu_{maks}$ ,

$\mu_{min}$  apibūdina pagrindinio reguliavimo vožtuvo darinėjimosi greičių bei šio vožtuvo ploto maksimalias ir minimalias vertes.

Antros eilės perdavimo funkcija yra naudojama turbinos greičio reguliavimo procesų tiesiniam matematiniam modeliui aprašyti:

$$W_{GR} = \frac{\mu_T}{P_{T0} - \Delta\omega/r} = \frac{1}{T_{GR} \cdot T_{SV} \cdot r \cdot s^2 + (T_{GR} + T_{SV}) \cdot r \cdot s + 1} \quad (3.21)$$

Turbinos darbo tašką, t.y. galią  $P_{T0}$ , keičiančiam turbinos valdymo mechanizmui gali būti sudaromas panašus modelis. Šis turbinos darbo taškas keičiamas atsižvelgiant į nustatytą galios vertę ir papildomus signalus, gaunamus dėl slėgio ar galios reguliavimo bei EES centrinio regulatoriaus [14].



3.7 pav. Suprastinta garo turbinos pagrindinio reguliavimo vožtuvo valdymo struktūrinė schema [14, 15]

### 3.4. Agregatų valdymo režimų modeliavimas

Generatorinio agregato valdymo režimai yra skirstomi:

1. Pastovios galios režimas,
2. Pastovaus slėgio režimas,
3. Koordinuoto reguliavimo režimas.

Minėtų režimų modeliavimo metu svarbūs ir katilo šiluminiai procesai, kurie būna gerokai lėtesni ir nedinamiški. Garo katilo sugebėjimas akumuliuoti šilumą daro didelę įtaką į turbiną patenkančio garo slėgio dinamikai, o šis gebėjimas akumuliuoti šilumą yra apibūdinamas katilo šilumine laiko pastoviąja  $T_K$  [14].

Modeliuojant garo katilą yra sudaromi kiekvienos jo dalies matematiniai modeliai. Garo katilo dalių pagrindiniai modeliai yra:

1. Garo katilo šiluminės akumuliacijos modelis,
2. Kuro reguliavimo sistemos modelis,

### 3. Kuro degimo proceso modelis.

Išsprendus ganėtinai sudėtingą garo katilo ir būgno masių balanso, tūrio balanso ir energijos balanso lygtį laiko pastoviosios atžvilgiu gali būti gauti analitinė katilo šiluminė laiko pastovioji  $T_K$ . Šioje išraiškoje garo katilo ir būgno įšotinto vandens ir garo masės yra proporcingos pagrindinėms dedamosioms, o vyraujanti dedamoji proporcinga vandens masei, todėl garo katilo šiluminė laiko pastovioji priklauso nuo įšotinto vandens masės ir vienai didėjant, kita taip pat didėja.

Perdavimo funkcija  $W_{Kš}$ , aprašanti garo katilo šiluminės akumuliacijos modelį, yra pateikta žemiau:

$$W_{Kš} = \frac{P_K}{Q_T} = \frac{1}{s \cdot T_K} \quad (3.22)$$

Čia:

$T_K$  – yra garo katilo šiluminė laiko pastovioji (s),

$Q_T$  – garo srautas iš būgno (santykiniais vienetais),

$p_K$  – katilo garo slėgis (santykiniais vienetais).

Suminė garo katilo ir pirmojo perkaitintuvo laiko pastovioji gali būti nustatoma greitai pakeitus pagrindinio valdymo vožtuvo plotą ir tuo pačiu registruojant būgno slėgio kitimą. Minėtos laiko pastoviosios išraiška [13]:

$$T_K + T_{1P} = \frac{\Delta Q_T}{\left. \frac{dp}{dt} \right|_{t=0}} \quad (3.23)$$

Čia:

$\Delta Q_T$  – garo srauto iš būgno pokytis (santykiniais vienetais),

$dp/dt|_{t=0}$  – pradinis būgno slėgio kitimo greitis.

Taip pat pirmojo perkaitintuvo garo slėgio nuostoliai yra proporcingi garo srauto kvadratui:

$$\Delta p_{1P} = K_{1P} \cdot Q_T^2 \quad (3.24)$$

Čia:

$Q_T$  – garo srautas iš būgno (santykiniais vienetais),

$K_{1P}$  – proporcingumo koeficientas.

Proporcingumo koeficientą  $K_{1P}$  galima rasti iš vardinio režimo slėgių skirtumo tarp turbinos pagrindinio valdymo vožtuvo ir būgno ( $p_{KN} - p_{TN}$ ) ir vardinio garo srauto  $Q_{TN}$  kvadrato santykio:

$$K_{1P} = \frac{p_{KN} - p_{TN}}{Q_{TN}^2} \quad (3.25)$$

Garų katilo slėgio pokyčiui įtaką daro šilumos srautas iš garų katilo ir būgno į turbiną (garo srautas  $Q_T$ ) ir taip pat šilumos srautas iš liepsnos pakuroje į katilo sienų vandenį (kuro srautas  $Q_{kr}$ ). Garų katilo modelis supaprastintai aprašomas modeliuoti integravimo grandimi. Šis grandis apibūdina kaip keičiasi būgno slėgis priklausomai nuo garo ir kuro srautų kitimo.

Pasikeitus garų slėgiui katile, kuro padavimas taip pat pasikeičia, o kuro valdymo sistemos matematinis modelis aprašomas tokia perdavimo funkcija:

$$W_{KR} = \frac{Q_{kr}}{p_{Tužd} - p_T} = \frac{s \cdot K_{kr} + K_I}{s} \quad (3.26)$$

Čia:

$Q_{kr}$  – kuro srauto vertė (santykiniais vienetais),

$p_T$  – turbinos slėgio vertė (santykiniais vienetais),

$p_{Tužd}$  – turbinos slėgio užduotoji vertė (santykiniais vienetais),

$K_{kr}$  – regulatoriaus proporcinio kanalo stiprinimo koeficientas,

$K_I$  – regulatoriaus integralinio kanalo stiprinimo koeficientas.

Norint aprašyti kuro degimo procesą, garų katilo modelį reikia skaidyti į dvi dalis. Pirmoji dalis yra anksčiau aptartas katilo šiluminės akumuliacijos modelis, kita dalis – kuro degimo proceso modelis ( $W_D$ ). Pastarasis modelis apima kuro padavimo grynojo vėlavimo laiką  $T_D$  (s), kuro degimo metu perduodamos šilumos vamzdžiams inercijos laiko pastoviąją  $T_{kr}$  (s) bei vamzdžių perduodamos šilumos vandeniui ir garui inercijos laiko pastoviąją  $T_W$  (s):

$$W_D = \frac{e^{-s \cdot T_D}}{(1 + s \cdot T_{kr}) \cdot (1 + s \cdot T_W)} \quad (3.27)$$

Santykis tarp katilo slėgio  $p_K$  (santykiniais vienetais) ir kuro srauto  $m'_{kr}$  (santykiniais vienetais), kai katilo garo srautas yra pastovus, nusako garų katilo modelio perdavimo funkciją  $W_K$ :

$$W_K = \frac{p_K}{m'_{kr}} = \frac{e^{-s \cdot T_D}}{s \cdot T \cdot (1 + s \cdot T_{kr}) \cdot (1 + s \cdot T_W)} = \frac{1}{s^3 \cdot T_{K1} + s^2 \cdot T_{K2} + s \cdot T_K} e^{-s \cdot T_D} \quad (3.28)$$

$$\begin{cases} T_{K1} = T_{kr} \cdot T_W \cdot T_K \\ T_{K2} = T_K \cdot (T_{kr} + T_W) \end{cases}$$

Čia:

$T_K$  – katilo šiluminės inercijos laiko pastovioji (s),

$T_{kr}$  – kuro sistemos laiko pastovioji (s),

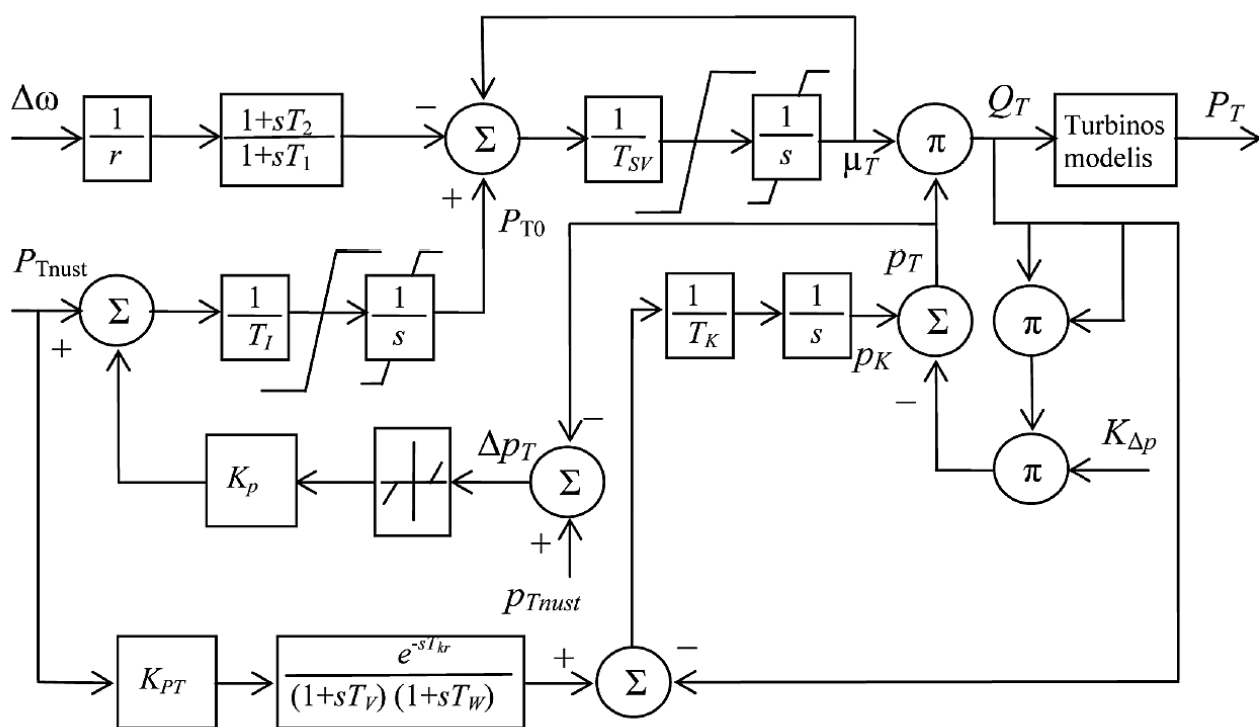
$T_D$  – grynojo vėlavimo laikas (s),

$T_W$  – katilo sienų šiluminės inercijos laiko pastovioji (s)

$p_K$  – katilo garo slėgis (santykiniais vienetais) [10].

Pastovios galios valdymo režime dalyvauja tik turbinos greičio reguliatorius. Agregato galia priklauso nuo į katilą paduodamo kuro srauto. Pasikeitus dažniui  $\Delta\omega$  dėl minėto turbinos greičio reguliatoriaus poveikio pasikeičia ir pagrindinio turbinos reguliavimo vožtuvo atsidarymo ploto pokytis  $\Delta\mu$ . Vožtuvas atsidarys daugiau, kai dažnis sumažės, todėl iš pradžių turbinos galia padidės, o paskui pradės kristi iki nustatytosios galios vertės. Taip atsitinka dėl to, jog pasikeitus garo srauto kiekiui į turbiną ir nekintant kuro padavimui bei katilo našumui, turbinos slėgis ima kristi. Todėl labai daug įtakos šiam procesui daro šiluminė katilo laiko pastovioji.

Pastovaus slėgio palaikymo režime (3.8 pav), kuris dar vadinamas turbinos sekimo arba reguliavimo „prieš save“ režimu, veikia du reguliatoriai.



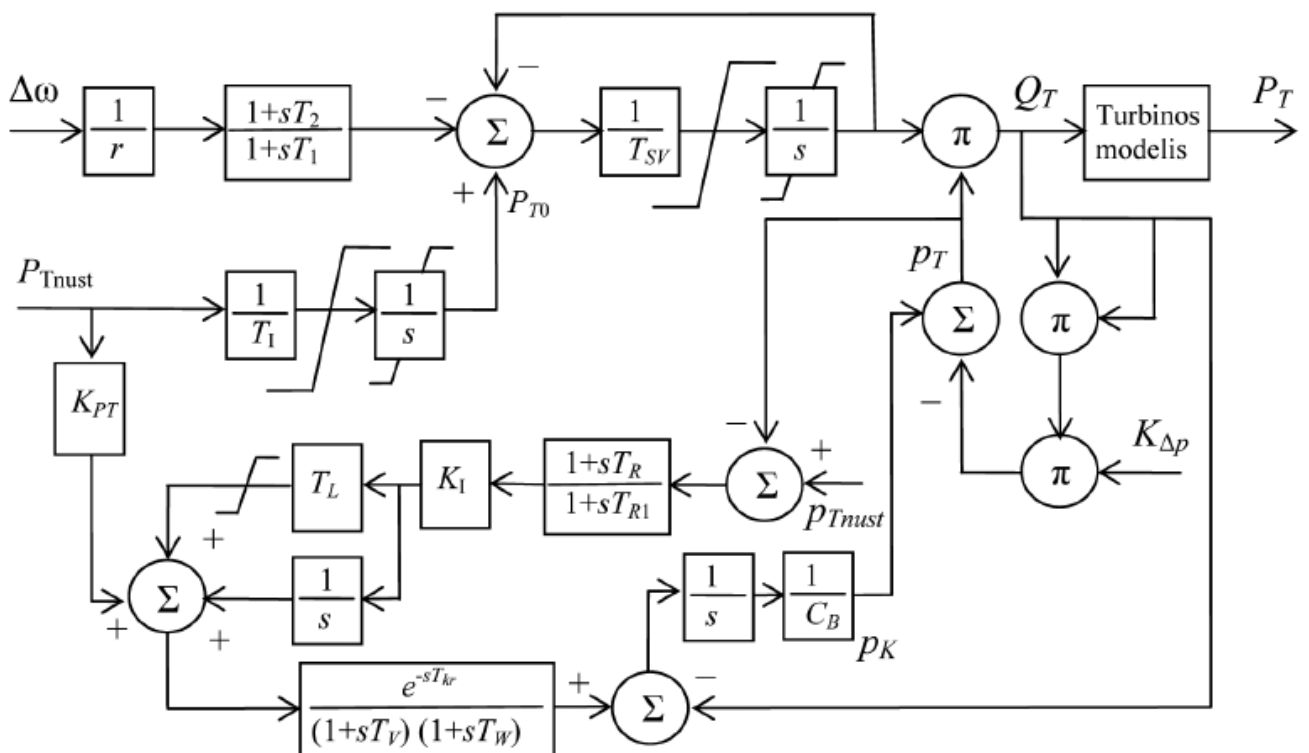
3.8 pav. Generatorinio agregato pastovaus slėgio režimo modeliavimo schema [14]



Agregato galia priklauso nuo katilo kuro regulatoriaus ir turbinos regulatoriaus. Pastarasis galią reguliuoja turbinos valdymo mechanizmo pagalba bei pagal turbinos slėgio nuokrypį nuo užduotos vertės keičia turbinos darbo tašką  $P_{T0}$ . Šis turbinos darbo taškas yra koreguojamas dvejomis grandimis per turbinos darbo taško keitimo pagalbinio variklio modelį: nejautrumo zonos grandimi, kuri modeliuoja leistinas slėgio nuokrypio ribas, ir proporcingumo koeficiento  $K_p$  grandimi. Toks valdymas sudaro beveik pastovų slėgį garo katile, nes turbinos valdymo vožtuvai reguliuoja būtent garo slėgį katile, o ne turbinos galią.

Koordinuoto reguliavimo režimo atveju veikia taip pat du regulatoriai, tik šiuo atveju agregato galia priklauso nuo turbinos regulatoriaus, o turbinos slėgio pokytį nuo užduotosios vertės keičia katilo kuro regulatorius, kuris veikia, kol turbinos slėgis atstatomas iki leistinų ribų. Taip pat šio režimo metu turbinos galios keitimo greitis yra suderinamas su tolydžiu kuro reguliavimu ir užtikrinamas stabilus katilo darbas.

Generatorinio agregato koordinuoto valdymo režimo modeliavimo schema parodyta 3.9 pav. Šioje schemoje kuro srauto koregavimo pagal turbinos slėgio nuokrypį regulatoriaus proporcinės grandies stiprinimo koeficientas yra  $K_I \times T_L$ , integravimo grandies –  $K_I$ , o fazinės korekcijos grandies laiko pastoviosios –  $T_R$  ir  $T_{R1}$  [14].

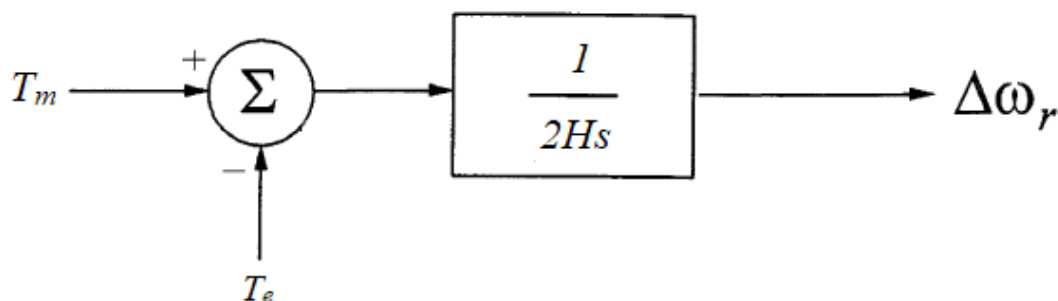


3.9 pav. Generatorinio agregato koordinuoto valdymo režimo modeliavimo schema [14]

### 3.5. Agregatų dalyvavimo dažnio reguliavime modeliavimas

Norint, jog elektros energetikos sistema tinkamai veiktų, dažnis joje turi būti pastovus. Sistemos dažnis priklauso nuo aktyviosios galios balanso, todėl atsiradus aktyviosios galios pokyčiui, keičiasi ir sistemos dažnis. Aktyviosios galios deficitas gali atsirasti, jei atsijungia koks nors generuojantis vienetas arba papildomai prijungiama apkrova. Kadangi sistemoje yra daug generuojančių vienetų, todėl kai kurie turi dalyvauti pirminiame dažnio reguliavime.

Atsiradęs apkrovos pokytis veikia ir generatoriaus elektrinį sukimo momentą  $T_e$ , todėl tai sukelia skirtumą tarp mechaninio  $T_m$  ir elektrinio sukimo momento bei rotoriaus greičio nukrypimą (3.10 pav.).



3.10 pav. Perdavimo funkcija, apibūdinanti ryšį tarp rotoriaus greičio ir sukimo momentų

3.10 paveikslėlyje  $H$  apibūdina inercijos pastoviąją.

Taip pat tiriant pereinamuosius elektros energetikos sistemos procesus sukimo momentus patogiau išreikšti mechanine ir elektrine galia.

Ryšys tarp sukimo momentų ir galios pateiktas apačioje:

$$P = \omega_r \cdot T \quad (3.29)$$

Įvertinus nukrypimą nuo pradinių verčių gaunama:

$$\begin{aligned} P &= P_0 + \Delta P \\ T &= T_0 + \Delta T \\ \omega_r &= \omega_0 + \Delta\omega_r \end{aligned} \quad (3.30)$$

Tada (3.29) lygties išraiška:

$$P_0 + \Delta P = (\omega_0 + \Delta\omega_r) \cdot (T_0 + \Delta T)$$

Atsižvelgiant į tai, jog:

$$\Delta P = \omega_0 \Delta T + T_0 \Delta\omega_r \quad (3.31)$$

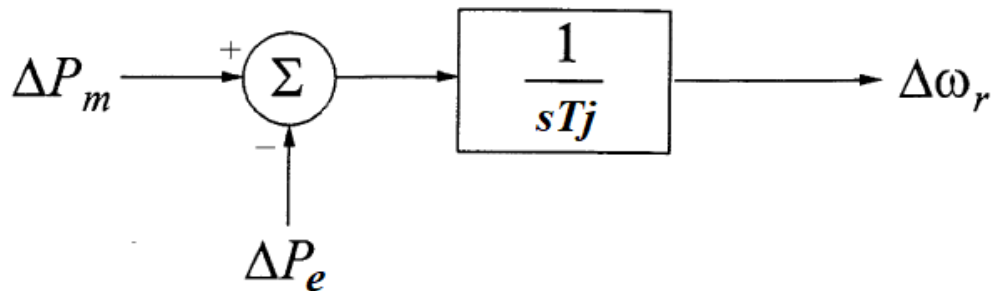
Gaunama tokia mechaninės ir elektrinės galių pokyčių skirtumo išraiška:

$$\Delta P_m - \Delta P_e = \omega_0 (\Delta T_m - \Delta T_e) + (T_{m0} - T_{e0}) \Delta\omega_r \quad (3.31)$$

Pastovioje būsenoje elektrinis ir mechaninis sukimo momentai yra lygūs, todėl:

$$\Delta P_m - \Delta P_e = \Delta T_m - \Delta T_e \quad (3.31)$$

Priėmus, jog  $Tj = 2H$ , 3.10 paveikslėlyje pateiktą perdavimo funkciją galima išreikšti:



3.11 pav. Perdavimo funkcija, apibūdinanti ryšį tarp rotoriaus greičio ir mechaninės bei elektrinės galios pokyčių

Elektros energetikos sistemos apkrova susideda iš daugybės įvairiausių prietaisų. Vienu prietaisų elektrinė galia nepriklauso nuo dažnio, tačiau kitų prietaisų elektrinė galia keičiasi su dažnio pokyčiu. Tarp šių prietaisų, kurių galia priklauso nuo dažnio kitimo, yra ventiliatoriai, siurbliai ir t.t. Todėl elektrinė galia gali būti išreiškiama:

$$\Delta P_e = \Delta P_L + D \Delta\omega_r \quad (3.31)$$

Čia:

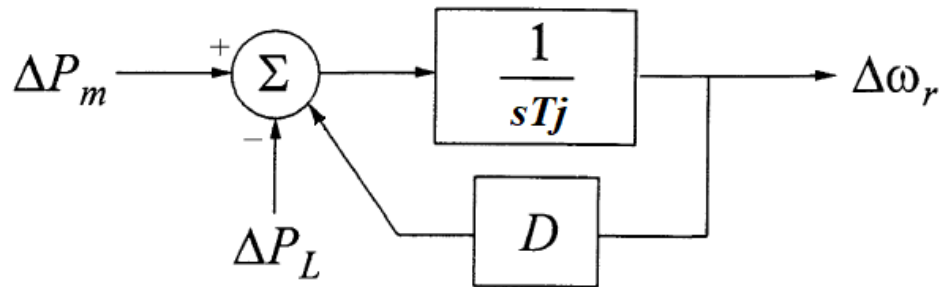
$\Delta P_L$  – nuo dažnio nepriklausantis apkrovos pokytis;

$D \Delta\omega_r$  – nuo dažnio priklausantis apkrovos pokytis;

$D$  – apkrovos slopinimo koeficientas.

Apkrovos slopinimo koeficientas apibūdina nuo dažnio priklausantį apkrovos kitimą. Jei šis koeficientas lygus 2, tai reiškia, jog dažnio pokytis 1 procentu sukelia 2 procentų apkrovos pokytį. Apkrovos slopinimo koeficiento tipinė reikšmė yra nuo 1 iki 2.

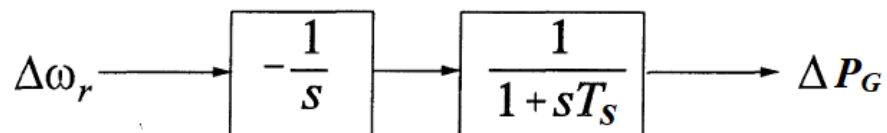
Todėl tokios sistemos perdavimo funkcijos išraiška pateikiama apačioje:



3.12 pav. Perdavimo funkcija, apibūdinanti ryšį tarp rotoriaus greičio ir mechaninės galios bei nuo dažnio nepriklausančios apkrovos pokyčių

Pasikeitus dažniui, atsijungus generuojančiam vienetui ar prisijungus papildomai apkrovai, pradeda veikti turbinos reguliatorius, kuris stengiasi šį dažnio pokytį stabilizuoti didindamas turbinos generuojamą galią.

Supaprastinta turbinos reguliatoriaus sistema pateikta 3.13 paveikslėlyje [10]. Šiame paveikslėlyje  $s$  yra generatoriaus statizmo koeficientas, o  $T_s$  – turbinos reguliatoriaus laiko pastovioji.



3.13 pav. Supaprastinta turbinos reguliatoriaus sistema

Generatoriaus statizmas yra apibūdinamas kaip generatoriaus galios dažninė charakteristika (galios nuokrypio priklausomybė nuo dažnio nuokrypio).

Turbinos reguliatoriaus esminė paskirtis yra pagrindinio valdymo vožtuvo atsidarymo ploto keitimas, nuo kurio priklauso ir turbinos greitis [20]

## 4. KOGENERACINĖS JĖGAINĖS DALYVAVIMO PIRMINIAME DAŽNIO REGULIAVIME TYRIMAS

### 4.1. Kogeneracinės jėgainės apibūdinimas: įranga, pagrindiniai komponentai

Kogeneracinę elektrinę sudaro tokie pagrindiniai komponentai:

- 1) Biokuro verdančio sluoksnio (angl. *fluidised bed*) garo katilas,
- 2) Kuro padavimo sistema,
- 3) Garo turbina su elektros generatoriumi,
- 4) Elektrostatiniai filtrai (ESF),
- 5) Išmetamųjų dūmų kondensaciniai įrenginiai,
- 6) Suspausto oro sistema,
- 7) Cheminio vandens paruošimo sistema,
- 8) Pelenų šalinimo sistema,
- 9) Cirkuliaciniai siurbiai.

Kogeneracinės elektrinės blokinė schema bei pagrindinių agregatų išsidėstymas pateikti 3 ir 4 prieduose.

Visa jėgainės elektrinė galia sudarys apie 80 MW, o šiluminė galia – apie 169 MW.

Kogeneracinė jėgainė dirbs žemiau pateiktu temperatūriniu grafiku:

4.1 lentelė. Centralizuotos šilumos tiekimo sistemos temperatūrinis grafikas

Lauko oro temperatūra	Termofikacinio vandens paros vidutinė		Lauko oro temperatūra	Termofikacinio vandens paros vidutinė	
	Paduodama temp.	Grįžtama temp.		Paduodama temp.	Grįžtama temp.
10	72	37	-7	93	50
9	72	37	-8	93	51
8	72	37	-9	99	52
7	72	38	-10	99	54
6	72	38	-11	99	55
5	72	38	-12	99	55
4	72	39	-13	109	55
3	72	39	-14	109	55
2	72	40	-15	115	56
1	77	41	-16	115	56
0	77	42	-17	115	57
-1	77	43	-18	115	57
-2	82	44	-19	115	58
-3	82	45	-20	115	58
-4	82	46	-21	115	58
-5	92	47	-22	115	59
-6	93	48	-23	115	60
-7	93	49	-24	115	60

Tokioje elektrinėje deginamo kuro šiluminė energija panaudojama vandens išgarinimo procesui. Susidaręs garas paduodamas į garo turbiną, kuri suka elektros generatorių – gaminama elektros energija. Panaudotas garas patenka į kondensatorių, jame garas kondensuojasi ir atiduoda šiluminę energiją termofikaciniam vandeniui. Susikondensavęs garas gražinamas atgal į katilą ir ciklas kartojamas. Papildoma šiluminė energija gaminama dūmų kondensaciniame ekonomaizeryje ir taip pat atiduodama termofikaciniam vandeniui.

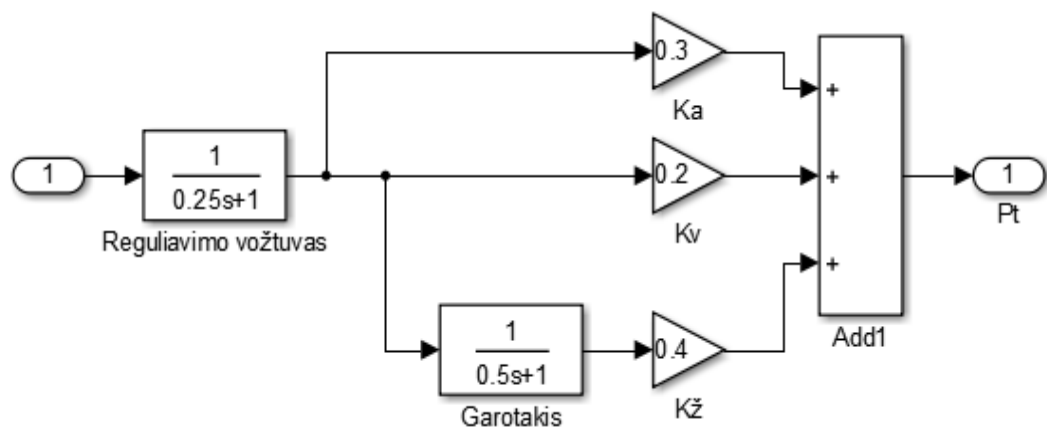
Tolesniuose skyriuose esantiems modeliams sudaryti bus naudojama MatLab SIMULINK dinaminio modeliavimo aplinka.

#### 4.2. Garo turbinos modelis

Garų turbinos modelis bei pagrindinio valdymo vožtuvo modeliai sudaryti pagal 3.2 ir 3.3 skyriuose aprašytus modeliavimo principus. Modeliuojama garo turbina yra su tarpiniu garo nuėmimu, todėl atskirų turbinos sekcijų santykinų galių suma nebus lygi vienetui ir bus mažesnė už vienetą:

$$K_A + K_V + K_{\dot{z}} + K_{nu} = K + K_{nu} = 1 \quad (4.1)$$

Priimama, jog apie 10 proc. garo srauto bus tiekama į tarpinį garo nuėmimą.



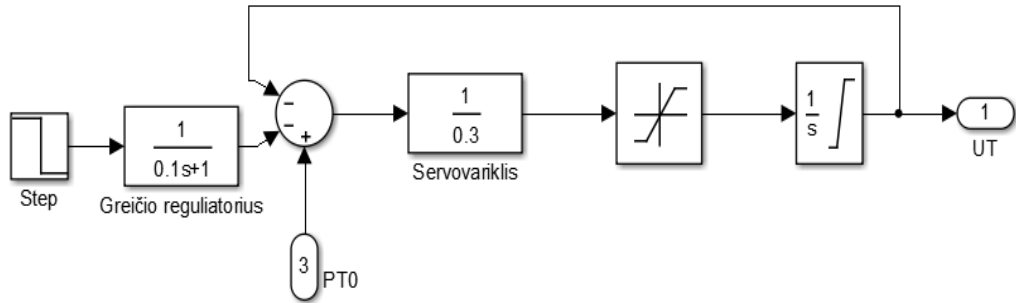
4.1 pav. Garo turbinos modelis

#### 4.3. Turbinos pagrindinio valdymo vožtuvo modelis

Turbinos pagrindinio valdymo vožtuvo dinaminis modelis pateiktas 4.2 pav. Šio modelio įėjimo signalas yra turbinos veleno greičio pokytis, o išėjimas – turbinos pagrindinio valdymo vožtuvo plotas.

Taip pat pateiktame modelyje matomas tik turbinos greičio reguliatorius, kuris reaguoja į veleno greičio nuokrypį nuo nustatytosios vertės. Katilo kuro bei turbinos reguliatoriai, kurie arba koreguoja

agregato galią, arba turbinos slėgio nuokrypį nuo nustatytosios vertės, priklausomai nuo valdymo režimo, bus pateikti sekančiuose skyriuose, kuriuose aprašomi pastovaus slėgio bei koordinuoto reguliavimo režimai.

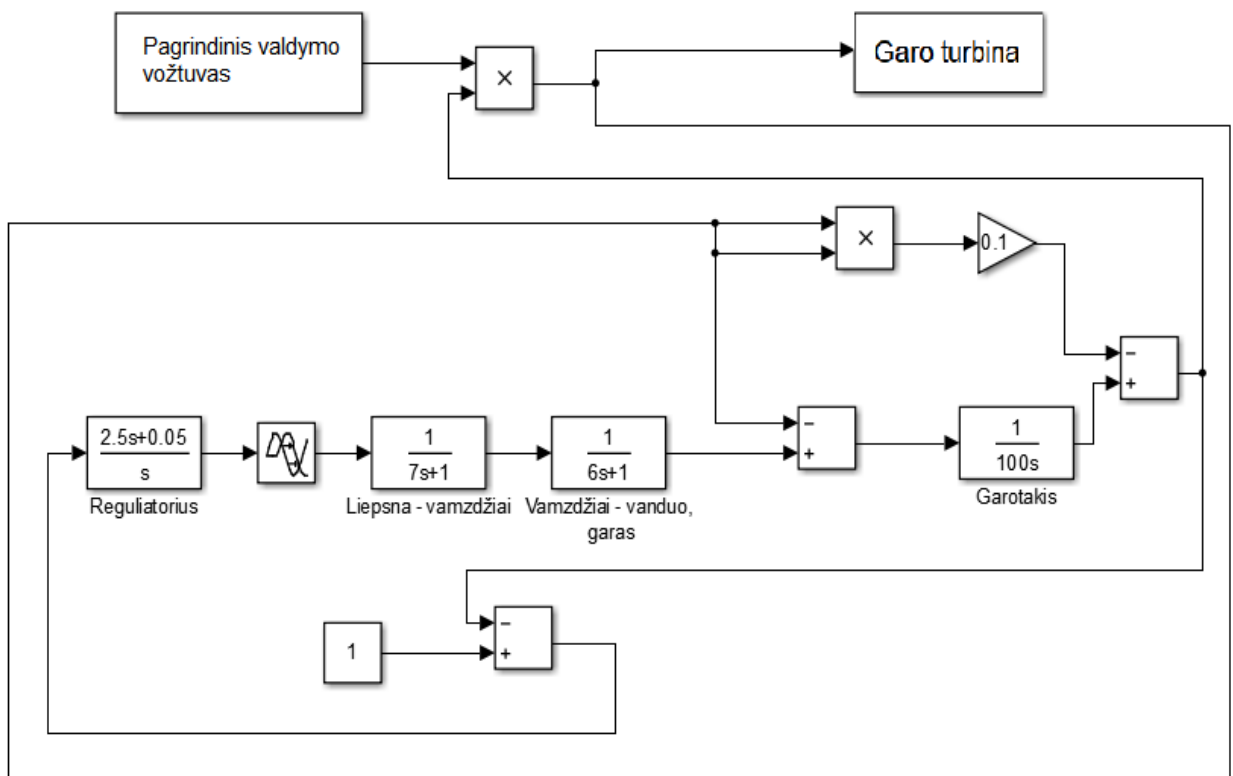


4.2 pav. Turbinos pagrindinio valdymo vožtuvo modelis

#### 4.4. Jėgainės reakcijos į šulinį dažnio pokytį tyrimas

##### 4.4.1. Pastovios galios valdymo režimas

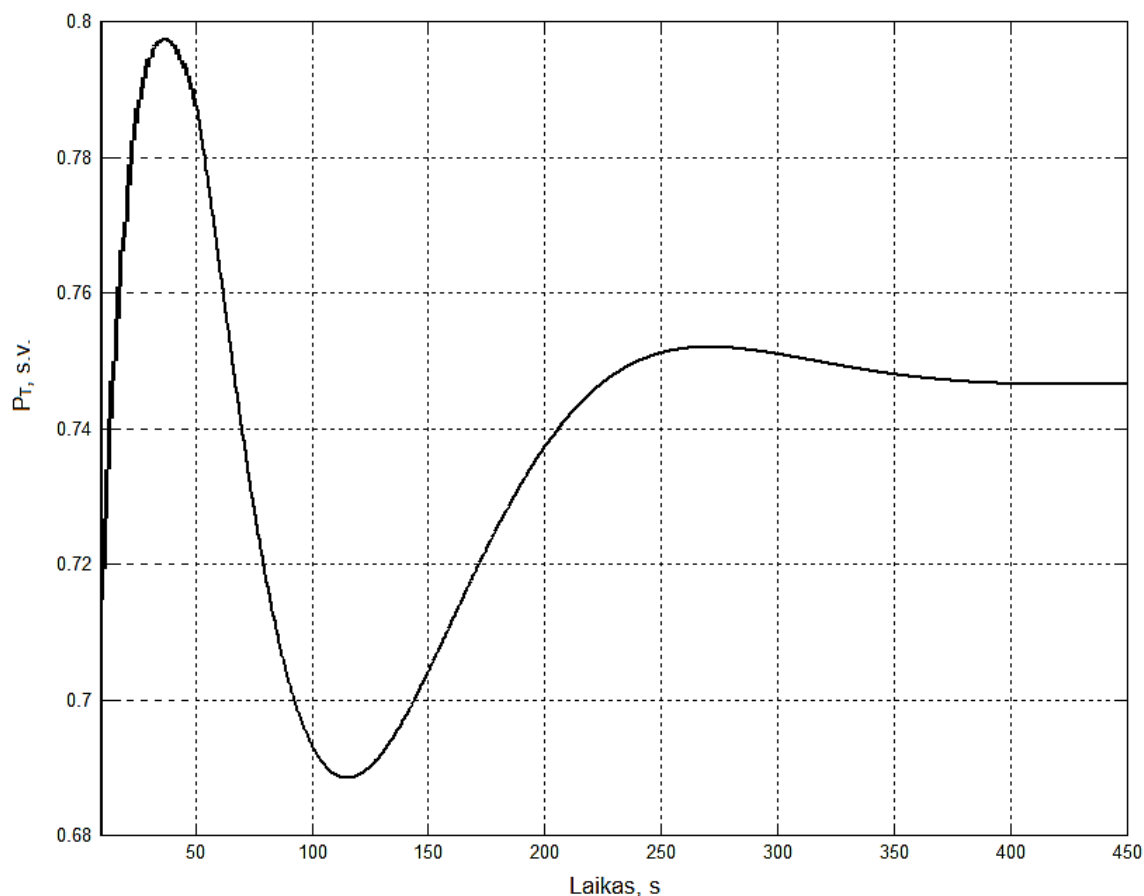
Šiame skyriuje tiriamas agregato generuojamos galios pokytis, kai elektrinė dirba pastovios galios režimu. Pastovios galios režimo modelis yra pateiktas 4.3 paveiksle.



4.3 pav. Pastovios galios valdymo režimo modelis

Pilnas šio režimo modelis su išskaidytais garo turbinos ir pagrindinio valdymo vožtuvo modeliais pateiktas 5 priede.

Elektrinė valdant pastovios galios režimu generuojamos galios pokytis dėl šuolinio dažnio pokyčio, kai dažnis sumažėja 0,5 procento, o elektrinės generuojamos galios vertė prieš trikdį siekia 71 proc., yra pateiktas 4.4 paveiksle.



4.4 pav. Turbinos galios kitimas reaguojant į dažnio pokytį pastovios galios valdymo režimo metu

Šio režimo metu atsiradus dažnio pokyčiui pagrindinis valdymo vožtuvas padidina atsidarymo plotą ir pradiniu momentu turbinos galia padidėja, tačiau vėliau dėl sumažėjusio garo srauto ir slėgio katilė galia krenta, kol galiausiai vėl pasiekia buvusią vertę. Galios sumažėjimas yra dėl to, jog kuro padavimas yra nereguliuojamas, t.y. šiame režime nėra kuro reguliatoriaus. Vėliau dėl atsiradusių garo slėgio katilė skirtumų tarp faktinės ir užduotosios vertės yra duodamas signalas, jog reikia padidinti paduodamo kuro ir oro kiekį. Tačiau dėl garo gamybos katilė ir degimo procesų, šis galios didėjimas jau nebėra toks greitas.

Svarbu paminėti, jog per dideli generuojamos galios svyravimai gali sukelti neleistinus darbo režimus, o tai turi neigiamą įtaką elektrinės įrangai bei jos tarnavimo laikui.

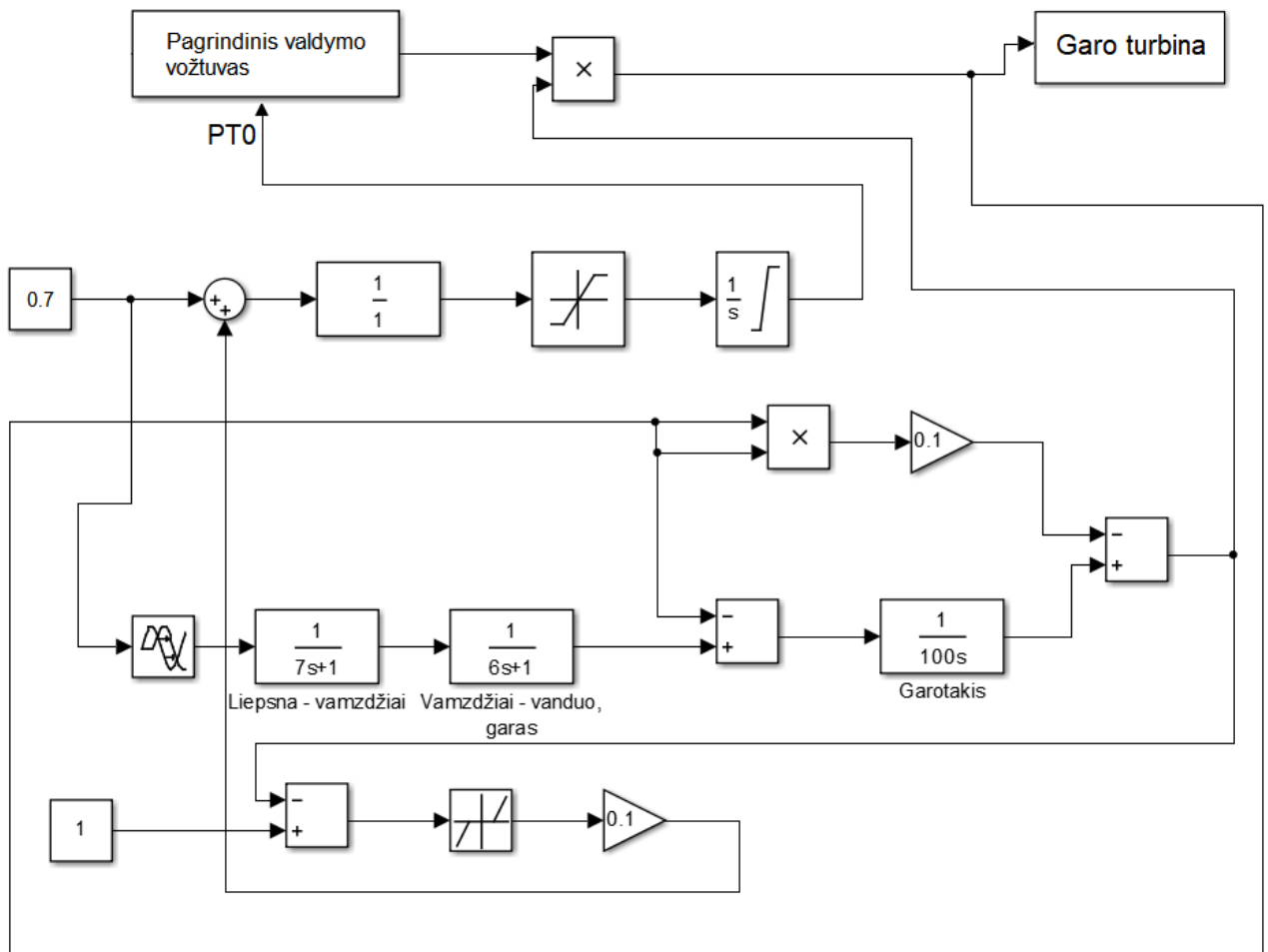


#### 4.4.2. Pastovaus slėgio valdymo režimas

Agregato pastovaus slėgio valdymo režimo modelis yra pateiktas 4.5 paveiksle. Šiame paveiksle yra pateikti tik pagrindinio valdymo vožtuvo ir garo turbinos blokai. Pilnas modelis su išskaidytais pagrindinio valdymo vožtuvo ir garo turbinos modeliais pateiktas 6 priede.

Tiek pastovaus slėgio, tiek koordinuoto reguliavimo režimo modeliai sudaryti remiantis 3.4 skyriuje aprašytais modeliavimo principais.

Šis modelis nuo pastovios galios valdymo režimo modelio skiriasi tuo, jog veikia tiek turbinos reguliatorius, tiek katilo kuro reguliatorius. Kaip buvo minėta prieš tai, turbinos reguliatorius koreguoja turbinos darbo tašką pagal slėgio nuokrypį nuo nustatytosios vertės, o katilo kuro reguliatorius koreguoja agregato galią.



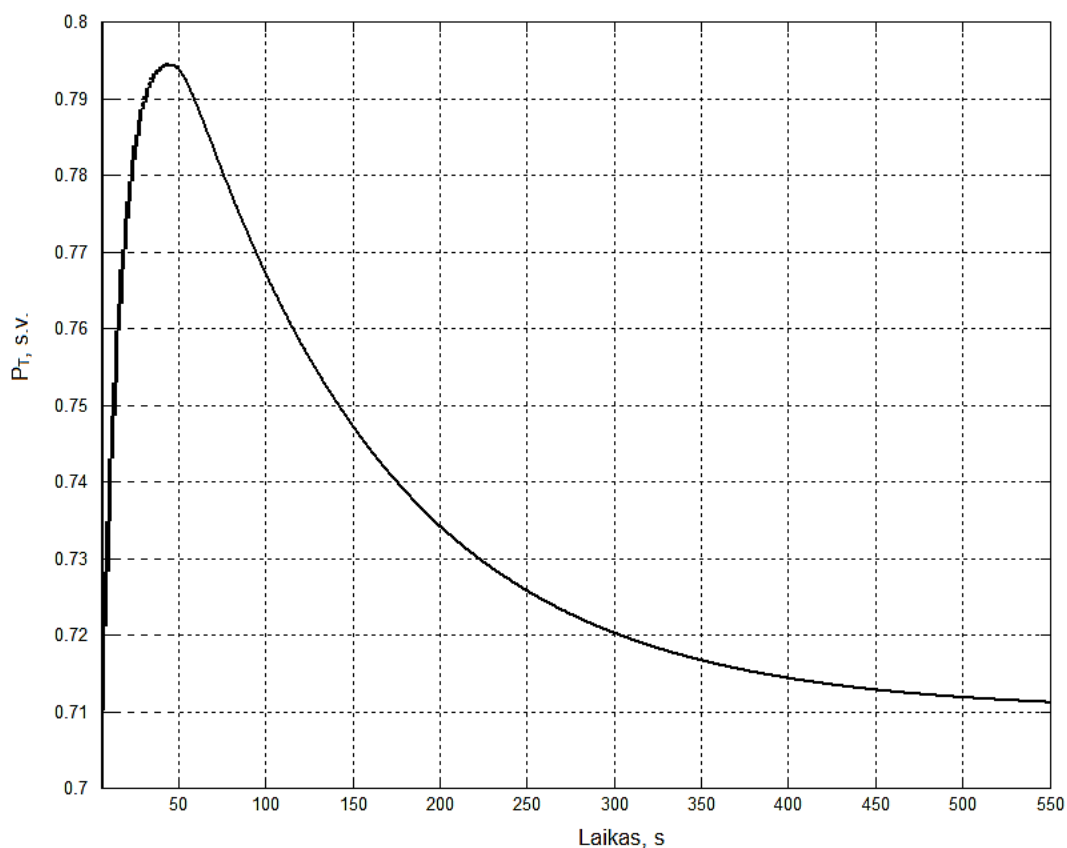
4.5 pav. Pastovaus slėgio valdymo režimo modelis

Elektrinės generuojamos galios pokytis, kai dažnis sumažėja 0,5 procento ir agregato generuojama galia pradiniu momentu prieš trikdį siekia 71 proc., pateiktas 4.6 paveiksle.

Šio režimo metu elektrinės dalyvavimas dažnio reguliavime yra galimas tik pačiu pradiniu laiko momentu, nes šiuo momentu elektrinės generuojamos galios pokytis yra teigiamas. Vėliau pagrindinis valdymo vožtuvas sumažina atsidarymo plotą siekdamas išlaikyti pastovų garo slėgį katile, todėl elektrinės generuojama galia krenta ir nesiekia pradinės vertės.

Nors šis režimas dažnai nekeičiant elektrinės galios yra ekonomiškąs, tačiau dėl po trikdžio sumažėjusios generuojamos galios vertės, jis neprisideda prie valdymo rajono, sistemos ar bloko stabilumo.

Taip pat šio valdymo režimo metu palaikant pastovų slėgį garo katile, yra išlaikomas stabilus katilo darbas, kas leidžia prailgti įrangos tarnavimo laiką.

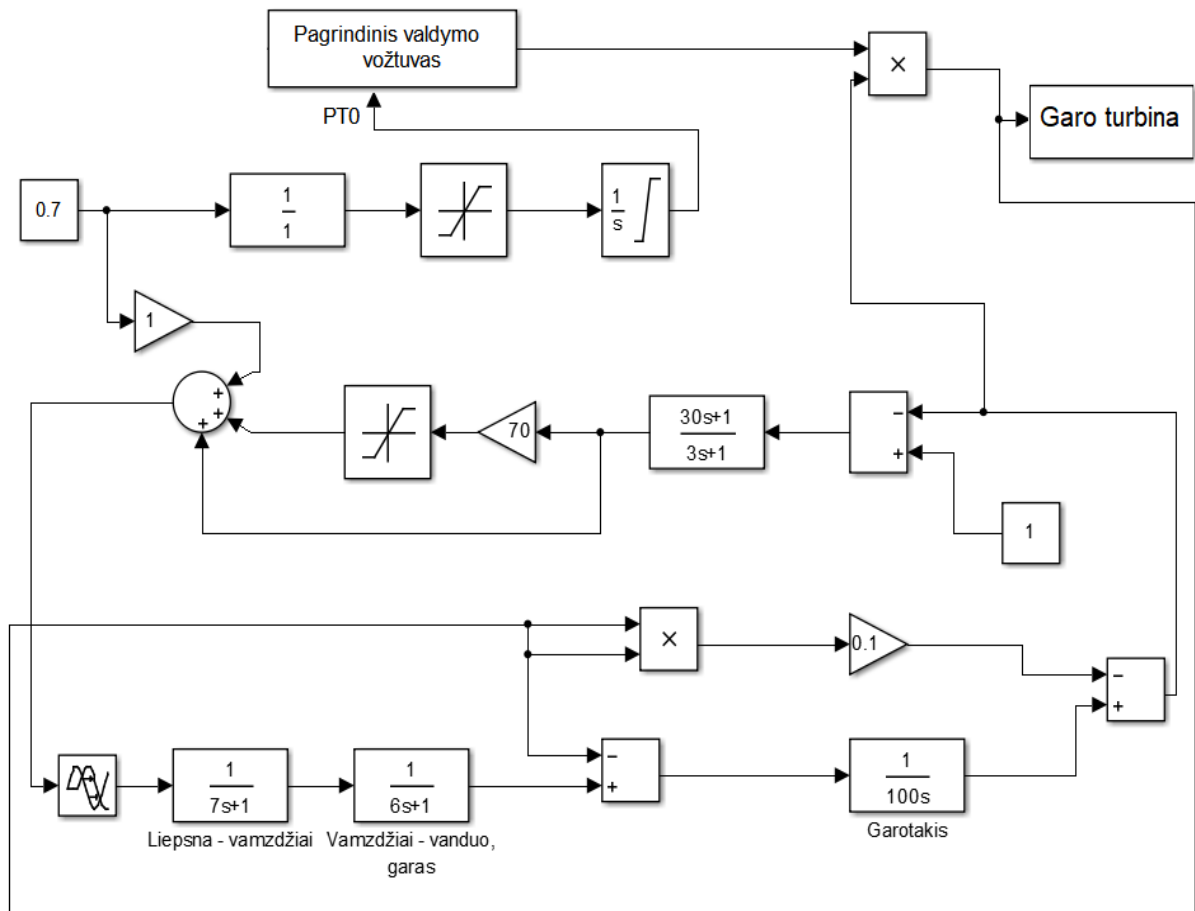


4.6 pav. Turbinos galios kitimas reaguojant į dažnio pokytį pastovaus slėgio valdymo režimo metu

#### 4.4.3. Koordinuoto reguliavimo režimas

Šiame skyriuje tiriamas agregato generuojamos galios pokytis, kai elektrinė dirba koordinuoto reguliavimo režimu. Koordinuoto reguliavimo režimo modelis yra pateiktas 4.7 paveiksle, o pilnas šio režimo modelis su išskaidytais garo turbinos ir pagrindinio valdymo vožtuvo modeliais pateiktas 7 priede.

4.7 paveiksle pateiktame modelyje matyti, jog turbinos reguliatorius koreguoja turbinos darbo tašką, o kuro reguliatoriaus veikia pagal turbinos slėgio pokytį ir stengiasi šį pokytį koreguoti.



4.7 pav. Koordinuoto reguliavimo režimo modelis

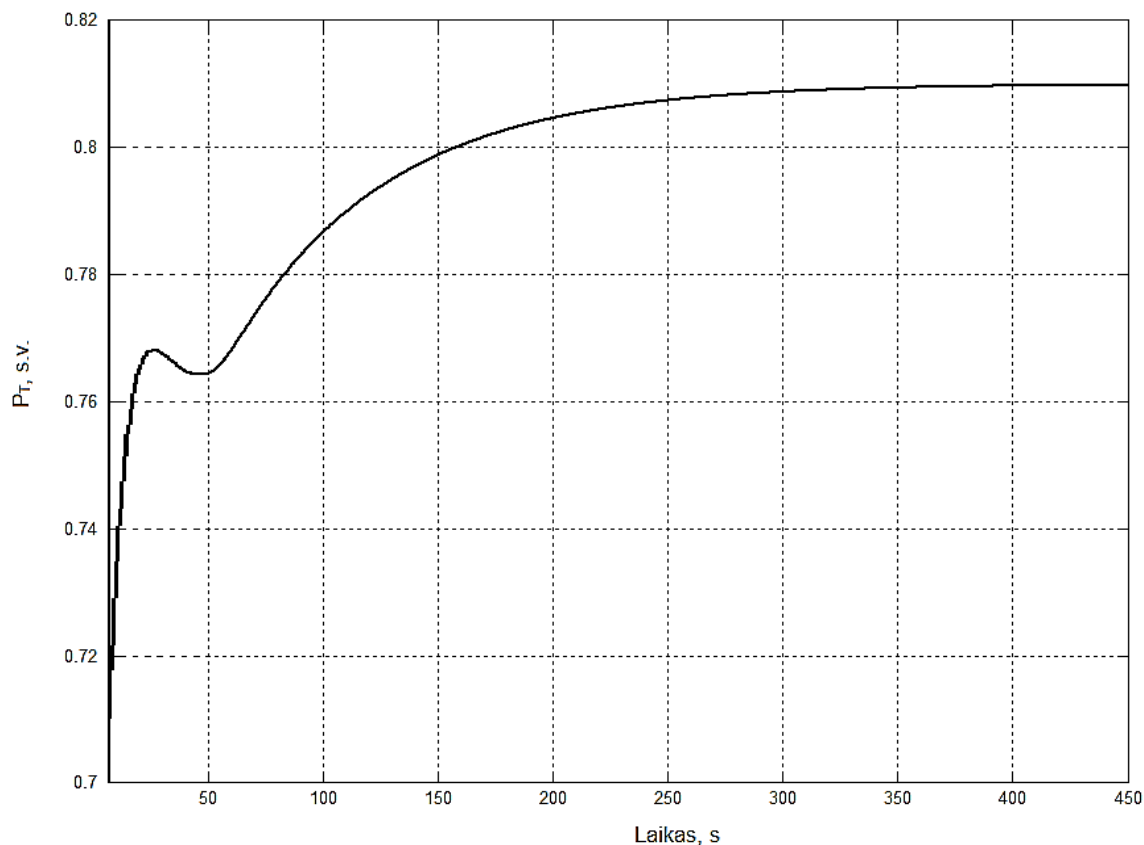
Kaip ir praėjusiuose skyriuose, tiriant šio valdymo režimo metu elektrinės generuojamos galios pokytį dažnis šuoliškai sumažėja 0,5 procento ir agregato generuojama galia prieš trikdį buvo 71 proc. Minėtas generuojamos galios pokytis pateiktas 4.8 paveiksle.

Kaip matyti, elektrinės generuojama galia po trikdžio didėja gana greitai ir nenukrypsta nuo reguliatorių nustatytosios vertės bei lyginant su prieš tai nagrinėtais valdymo režimais (pastovios galios ir pastovaus slėgio) galia didėja labiausiai. Tai pasiekama reguliuojant kuro srautą, kuris sąlygoja garo srauto padidėjimą bei tuo pačiu ir generuojamos galios padidėjimą.

Šis režimas užtikrina stabilų katilo darbą bei leidžia gana greitai reaguoti į elektrinės generuojamos galios pokytį. Taip pat vertinant tiek iš ekonominės, tiek iš techninės pusės su prieš tai nagrinėtais valdymo režimais šis režimas būtų tinkamiausias dalyvaujant dažnio reguliavime.

Koordinuoto reguliavimo režimas daugiausiai prisidėtų prie elektros energetinės sistemos stabilumo užtikrinimo. Taip pat dirbant šiuo režimu būtų galima dalyvauti ir antriniame reguliavime, tačiau reiktų įvertinti tokio dalyvavimo ekonominę naudą, nes agregatas tam tikru laiko tarpu turėtų

palaikyti pastovią galią. Šis palaikymas būtų įmanomas dėl esančių garo redukavimo ir aušinimo linijų, nes taip būtų galima taikstyti prie kintamo šiluminės energijos poreikio, o esant pastarosios pertekliui, būtų galima atjungti dūmų kondensacinį ekonomaizerį.



4.8 pav. Turbinos galios kitimas reaguojant į dažnio pokytį koordinuoto reguliavimo režimo metu

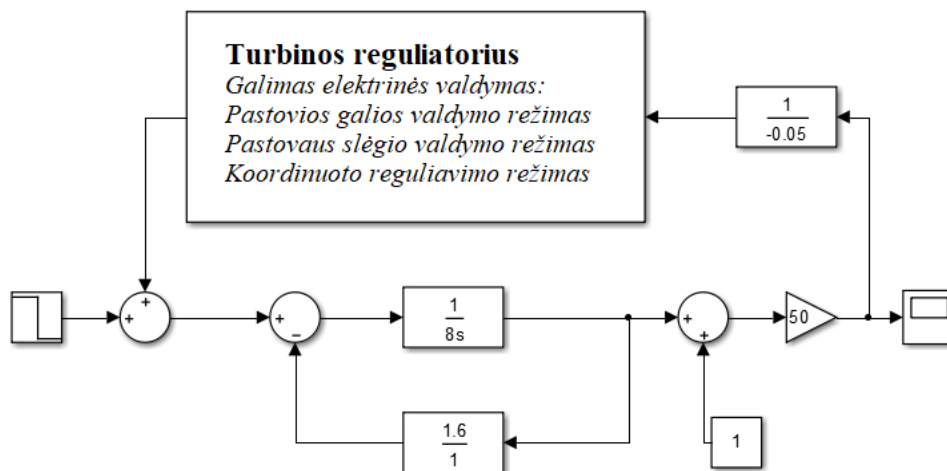
#### 4.5. Turbinų reguliatorių įtaka pirminiam dažnio reguliavimui

Prieš tai buvusiuose poskyriuose išnagrinėta elektrinės reakcija į šuolinį dažnio pokytį. Todėl toliau didesnis dėmesys bus skiriamas nagrinėjant reguliatorių įtaką sistemos dažniui.

4.9 paveikslėlyje pateiktas sistemos modelis sudarytas remiantis 3.5 skyriuje aprašyta modeliavimo metodika. Kaip matoma pateiktame modelyje, elektrinės gali būti valdomos trimis skirtingais režimais. Taip pat kad geriau suprasti elektrinės įtaką dažnio reguliavimui, yra daroma prielaida, jog visos sistemoje esančios elektrinės veikia tik vienu valdymo režimu, t.y. pastovios galios, pastovaus slėgio arba koordinuoto reguliavimo režimu.

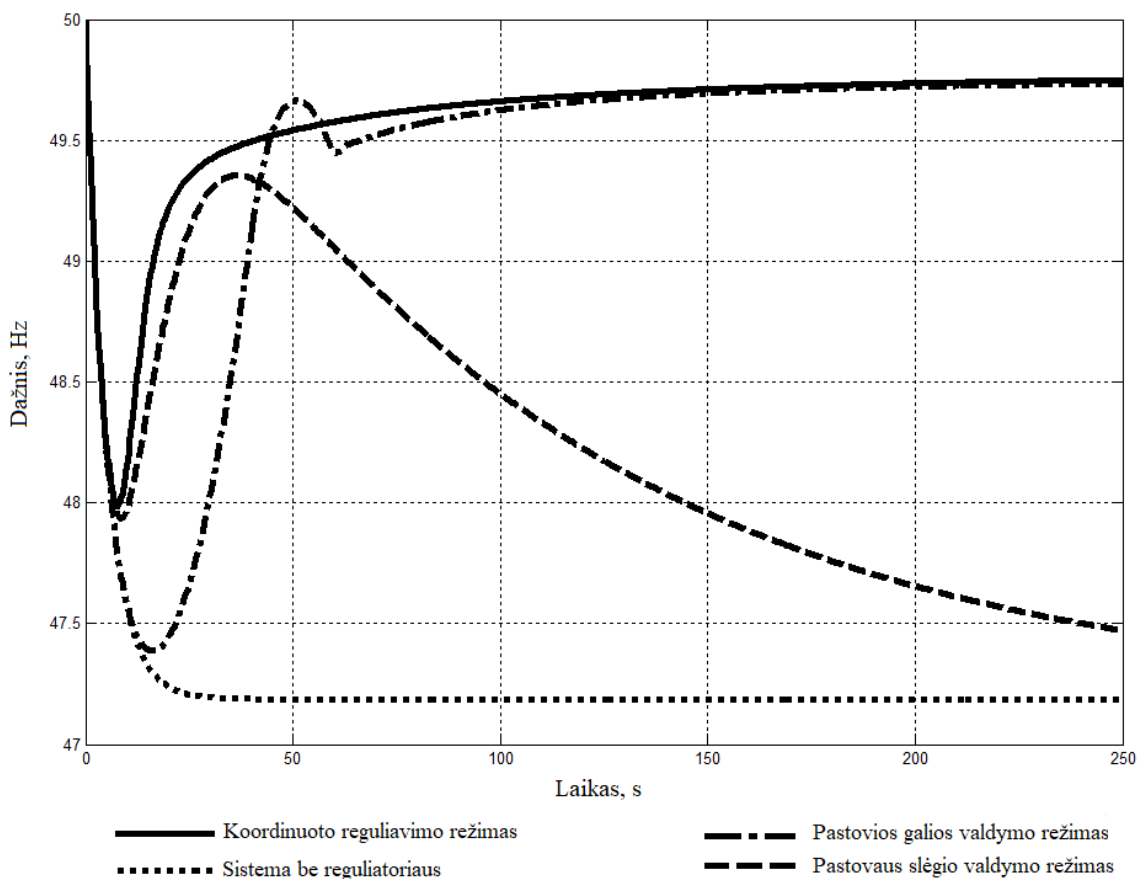
Priimama, jog statizmas yra lygus 5 %, sistemos laiko pastovioji lygi 8s, o apkrovos slopinimo koeficientas lygus 1,6 bei toliau pateikiami rezultatai esant šiems sistemos dydžiams.

Turbinų reguliatorių įtaka pirminiam dažnio reguliavimui keičiantis minėtiems sistemos parametrams yra pateikta 8 priede.



4.9 pav. Turbinų reguliatorių įtakos sistemos dažniui modelis

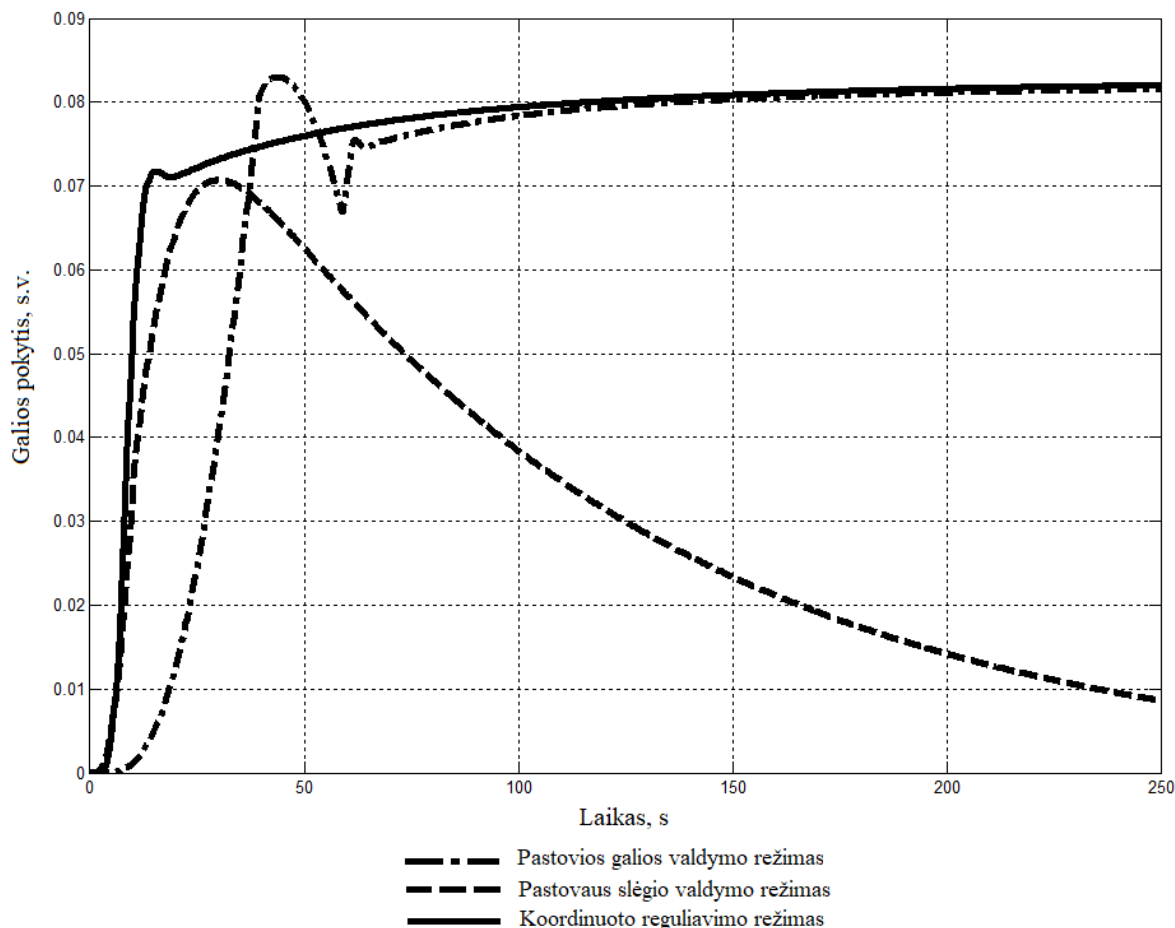
Turbinų reguliatorių įtaka sistemos dažniui, kai galios disbalansas yra lygus 9 procentams pateiktas 4.10 paveiksle.



4.10 pav. Turbinų reguliatorių įtaka sistemos dažniui atsiradus galios disbalansui

Kaip matyti iš 4.10 paveikslo, didžiausią poveikį sistemos dažnio atstatymui turi turbinos reguliatorius, kai elektrinė valdoma koordinuoto reguliavimo režimu. Pastovaus slėgio valdymo režimo metu sistemos dažnis atstatomas tik pradiniu laiko momentu dėl jau prieš tai minėto pastovaus slėgio palaikymo katilė. Taip pat šiame paveiksle pavaizduotas dažnio kritimas, jei sistemoje nebūtų reguliatoriaus.

4.11 paveiksle pateiktas elektrinės generuojamos galios pokytis atsiradus 9 % procentų galios disbalansui. Matoma, jog pastovios galios ir koordinuoto reguliavimo valdymo režimu metu generuojamos galios pokytis siekia 8,2 %, tačiau koordinuoto reguliavimo režimas greičiau reaguoja į atsiradusį apkrovos pokytį ir dažnis krinta mažiausiai – iki 48 Hz.. Pastovaus slėgio valdymo režimas gali būti naudingas tik pradiniu laiko momentu, bet vėliau teigiamos įtakos sistemos dažnio reguliavimui nedaro ir neprisideda prie sistemos stabilumo užtikrinimo, nes elektrinės generuojamos galios pokytis tampa lygus nuliui.



4.11 pav. Elektrinės generuojamos galios pokytis atsiradus galios disbalansui

## IŠVADOS

1. Kogeneracinių elektrinių plėtra ateityje yra numatoma įstatymuose bei reglamentuose. Atnaujintame Nacionalinės energetinės nepriklausomybės strategijos projekte teigiama, jog iki 2050 metų ne mažiau kaip 14 procentų Lietuvoje suvartojamas elektros energijos bus pagaminta iš biokuro išteklių didelio efektyvumo kogeneracinėse jėgainėse. Augant šių technologijų pajėgumams, naujai diegiami generatoriai galėtų ženkliai prisidėti dalyvaujant pirminiame sistemos dažnio reguliavime.
2. Elektros energetikos sistemos dažnio reguliavimo reikalavimai apima šias pagrindines charakteristikas: reguliatoriaus neįtakojamą zoną, dažnio išlaikymo rezervą suaktyvinimo laiką bei reguliatoriaus neveikimo zoną. Šios dažnio išlaikymo rezervų charakteristikos įvairiose sinchroninėse zonose skiriasi. Taip pat labai svarbi charakteristika yra generatoriaus statizmo koeficientas, kurį nustato perdavimo sistemos operatorius.
3. Pagrindiniai šiluminių elektrinių valdymo režimai yra pastovios galios, pastovaus slėgio ir koordinuoto reguliavimo. Baigiamajame darbe buvo išnagrinėta turbinų reguliatorių, leidžiančių analizuoti minėtus valdymo režimus, modeliavimo metodika ir taip pat sudaryti šių elementų dinaminiai modeliai.
4. Nustatyta, jog esant šuoliniam 0,5 % dažnio pokyčiui, kai elektrinė dirba 71 % apkrovimu, efektyviausias valdymo režimas yra koordinuoto reguliavimo. Minėto valdymo režimo metu elektrinės generuojamos galios pokytis yra gana greitas bei tuo pačiu sukuriama santykinai maža apkrova garo katilui. Pastovaus slėgio valdymo režimo metu, elektrinės generuojamos galios pokytis yra matomas tik pradiniu laiko momentu, tačiau vėliau dėl pastovaus slėgio garo katilė palaikymo, generuojama galia nusistovi iki buvusios vertės, t.y. 71 %.
5. Didžiausią įtaką pirminiam dažnio reguliavimui atsiradus 9 % galios disbalansui, kai statizmo koeficientas lygus 5 %, sistemos laiko pastovioji – 8s, o apkrovos slopinimo koeficientas – 1,6, turi koordinuoto reguliavimo režimu valdomos elektrinės turbino reguliatorius. Šio režimo metu, dažnis krenta mažiausiai - iki 48 Hz, bei atstatomas greičiausiai, o generuojamos galios pokytis siekia 8 %. Kitų režimų metu turbino reguliatorių įtaka nėra tokia efektyvi ir greita, todėl koordinuoto reguliavimo režimas daugiausiai prisidėtų užtikrinant sistemos stabilumą.

## LITERATŪRA

1. UAB „Vilniaus energijos gamybos iš atsinaujinančiųjų energijos išteklių plėtros planas. Esamos būklės analizė ir perspektyvos. 2013 m. [žiūrėta 2018-01-10] Prieiga per internetą: [http://www.vilniaus-energija.lt/sites/default/files/VE%20AEI%20pletros%20planas\\_1.pdf](http://www.vilniaus-energija.lt/sites/default/files/VE%20AEI%20pletros%20planas_1.pdf).
2. Juškys, A. Atsinaujinančių išteklių energijos reguliavimas Europos Sąjungos teisėje: raida ir tendencijos [interaktyvus]. Verslo ir teisės aktualijos. 2012, 7(1), 183–200 [žiūrėta 2018-01-12]. Prieiga per internetą: [http://www.leka.lt/sites/default/files/dokumentai/a.juskys\\_atsinaujanciu\\_istekliu\\_energijos\\_reguliavimas\\_es\\_tendencijos.pdf](http://www.leka.lt/sites/default/files/dokumentai/a.juskys_atsinaujanciu_istekliu_energijos_reguliavimas_es_tendencijos.pdf).
3. ES energetikos sąjunga, tinklo kodeksai, PSO planai ir perspektyvos. Litgrid. 2015 m. [žiūrėta 2018-01-13] Prieiga per internetą: [http://lpk.lt/wp-content/uploads/2015/12/20150428\\_ES-energetikos-s%C4%85junga-tinklo\\_kodeksai-PSO-planai-ir-perspektyvos.pdf](http://lpk.lt/wp-content/uploads/2015/12/20150428_ES-energetikos-s%C4%85junga-tinklo_kodeksai-PSO-planai-ir-perspektyvos.pdf).
4. Vilniaus ir Kauno kogeneracinių jėgainių oficialus puslapis [žiūrėta 2018-01-15]. Prieiga per internetą: <http://www.kogen.lt/>.
5. Gimbutis, R., Kajutis, K., Krukonis, V., Pranckūnas, A., Švenčianas, P. Šiluminė technika. Vilnius. Mokslas. 1993 m.
6. Deksnys, R., Staniulis, R., Šulga, D. Paskirstytos generacijos integracija į elektros energetikos sistemą ir įtaka energijos tiekimo patikimumui. Ataskaita. Kaunas. 2007 m. [žiūrėta 2018-04-14]. Prieiga per internetą: [http://www.lsta.lt/files/studijos/2007/7\\_Integr.pdf](http://www.lsta.lt/files/studijos/2007/7_Integr.pdf).
7. Europos komisijos reglamentas (ES) 2017/1485, kuriuo nustatomos elektros energijos perdavimo sistemos eksploatavimo gairės. Teisės aktas. 2017 m. [žiūrėta 2018-04-15]. Prieiga per internetą: [http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L\\_.2017.220.01.0001.01.ENG](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2017.220.01.0001.01.ENG).
8. Celisa, C., Pinto, G.R.S., Teixeira, T., Xavier, E. A steam turbine dynamic model for full scope power plant simulators. Applied Thermal Engineering. Volume 120, 25 June 2017, Pages 593-602 [žiūrėta 2018-01-12]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431117306208>
9. Chaibakhsh, A. Ghaffari, A. Simulation Modelling Practice and Theory. Volume 16, Issue 9, October 2008, Pages 1145-1162 [[žiūrėta 2018-01-12]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569190X08001196>



10. Baranauskas, A. Elektrinių ir energijos kaupimo sistemų valdymo modelis vėjo elektrinių galiai balansuoti. Daktaro disertacija. Kaunas. 2014 m. [žiūrėta 2018-01-14]. Prieiga per internetą: <https://epubl.ktu.edu/object/elaba:2195259/2195259.pdf>.
11. Lu, S. Dynamic modelling and simulation of power plant systems. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A Journal of Power and Energy 213(1):7-22. February 1999. [žiūrėta 2018-01-20]. Prieiga per internetą: [https://www.researchgate.net/publication/245392248\\_Dynamic\\_modelling\\_and\\_simulation\\_of\\_power\\_plant\\_systems](https://www.researchgate.net/publication/245392248_Dynamic_modelling_and_simulation_of_power_plant_systems)
12. Mircea, D. Dorin, B. Mathematical Modelling and Simulation of the Behaviour of the Steam Turbine. Procedia Technology. Volume 12, 2014, Pages 723-729 [žiūrėta 2018-01-20]. Prieiga per interenetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017313007408>
13. Kundur, P. Power System Stability and Control. ISBN 0-07-035958-X. McGraw-Hill, Inc., 1994.
14. Ponelis, R.; Ažubalis, V. Šiluminių elektrinių generatorinių agregatų režimų modeliavimas. Energetika, Lietuvos mokslų akademijos leidykla. ISSN 0235-7208. 2012, T. 58, Nr. 1, P. 21-29. [žiūrėta 2018-01-14]. Prieiga per internetą: [www.lmaleidykla.lt/ojs/index.php/energetika/article/download/2281/1171](http://www.lmaleidykla.lt/ojs/index.php/energetika/article/download/2281/1171).
15. Ramtin, K., Hadi, R, Abolfazl, K. Behrooz, Z. Mehdi, K. Shahab, K. Mathematical Modelling and Parameter Estimation of an Industrial Steam Turbine-Generator Based on Operational Data. IFAC-PapersOnLine. Volume 51, Issue 2, 2018, Pages 214-219 [žiūrėta 2018-01-15]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318300417>
16. Flynn, M. E ., O'Malley, M. J. A Drum Boiler Model for Long Term Power System Dynamic Simulation. IEEE Transactions on Power Systems, February, 1999. Vol. 14. No. 1. P. 209–217 [interaktyvus]. Prieiga per internetą: [https://www.researchgate.net/publication/3265898\\_A\\_drum\\_boiler\\_model\\_for\\_long\\_term\\_power\\_system\\_dynamic\\_simulation](https://www.researchgate.net/publication/3265898_A_drum_boiler_model_for_long_term_power_system_dynamic_simulation)
17. Gao, L.; Dai, Y. Modeling Large Modern Fossil-Fueled Steam-Electric Power Plant and Its Coordinated Control System for Power System Dynamic Analysis. // From the selected works of Lin Gao. October, 2010. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <http://works.bepress.com/cgi/viewcontent.cgi?article=1004&context=gao>.
18. Machowski, J.; Bialek, J.W.; Bumby, J. R. Power system dynamics: stability and control. // John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK, 2012. [interaktyvus]. Prieiga per internetą:

<http://www.researchgate.net/publication/41231911> Power system dynamics stability and control.

19. Zhou, Y., Wang, D., An improved coordinated control technology for coal-fired boiler-turbine plant based on flexible steam extraction system // Applied Thermal Engineering 125 (2017) 1047–1060. [interaktyvus]. Prieiga per internetą:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135943111732464X>.
20. Mircea, D. Dorin, B. Simulation of Speed Steam Turbine Control System. Procedia Technology. Volume 12, 2014, Pages 716-722 [žiūrėta 2018-05-15]. Prieiga per internetą:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017313007391>

## **PRIEDAI**

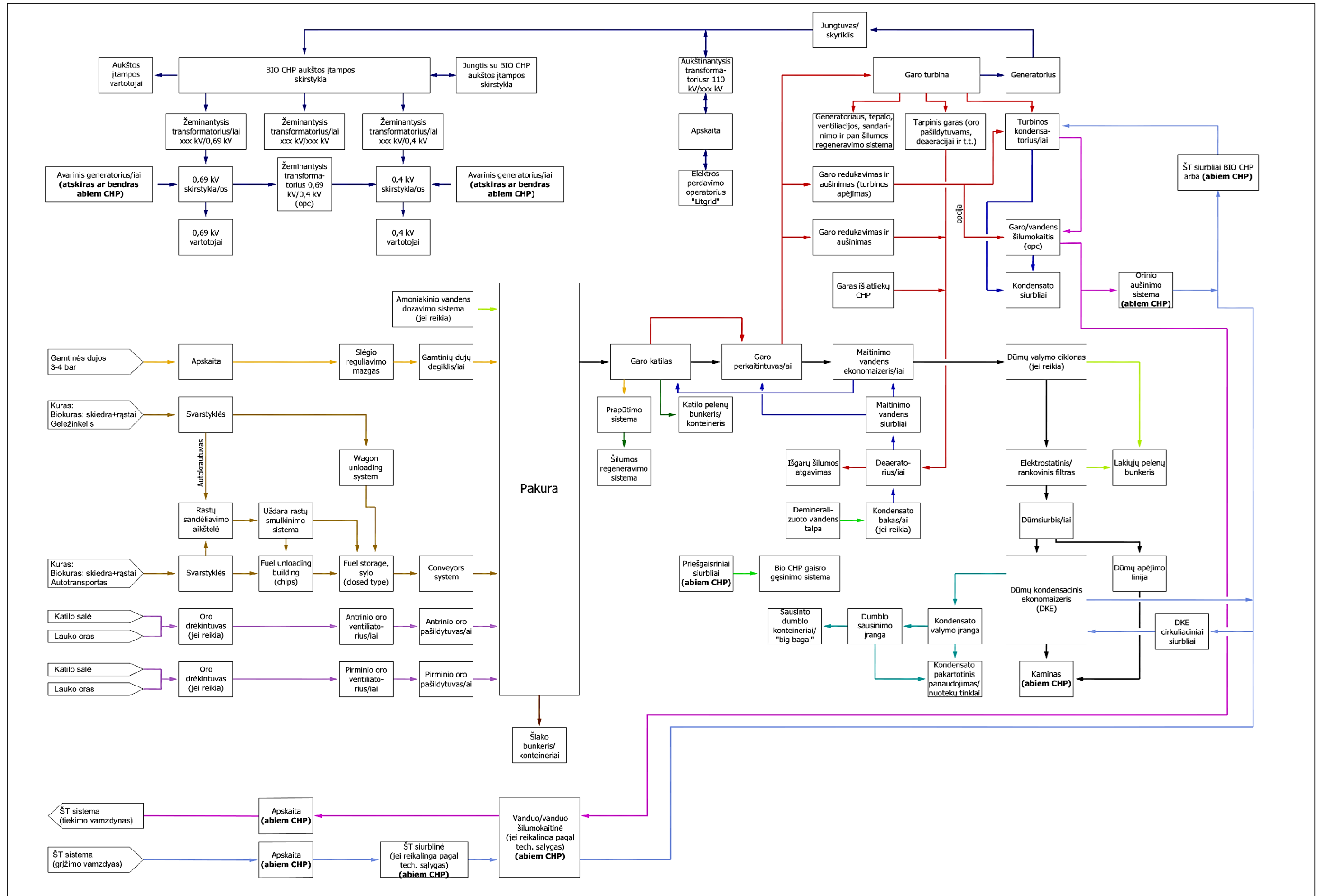
## 1 Priedas. Dažnio išlaikymo rezervų charakteristikos įvairiose sinchroninėse zonose

Būtinasis dažnio matavimo tikslumas	Žemyninė Europa, Didžioji Britanija, Airija bei Šiaurės Airija ir Šiaurės Europa	10 mHz arba pramonės standartas, jei griežtesnis
Didžiausias sudėtinis būdingosios dažnio neįtakos ir dažnio išlaikymo rezervus tiekiančių modulių arba šiuos rezervus tiekiančių grupių regulatoriaus dažninės charakteristikos specialiosios neįtakos dažniui srities poveikis	Žemyninė Europa	10 mHz
	Didžioji Britanija	15 mHz
	Airija ir Šiaurės Airija	15 mHz
	Šiaurės Europa	10 mHz
Dažnio išlaikymo rezervų suaktyvinimo laikas	Žemyninė Europa	30 s
	Didžioji Britanija	10 s
	Airija ir Šiaurės Airija	15 s
	Šiaurės Europos	30 s, jei elektros sistemos dažnis yra už standartinio dažnio diapazono
Dažnio išlaikymo rezervų suaktyvinimo dažnio nuokrypis	Žemyninė Europa	± 200 mHz
	Didžioji Britanija	± 500 mHz
	Airija ir Šiaurės Airija	Dinaminiai dažnio išlaikymo rezervai ± 500 mHz
		Statiniai dažnio išlaikymo rezervai ± 1 000 mHz
	Šiaurės Europos	± 500 mHz

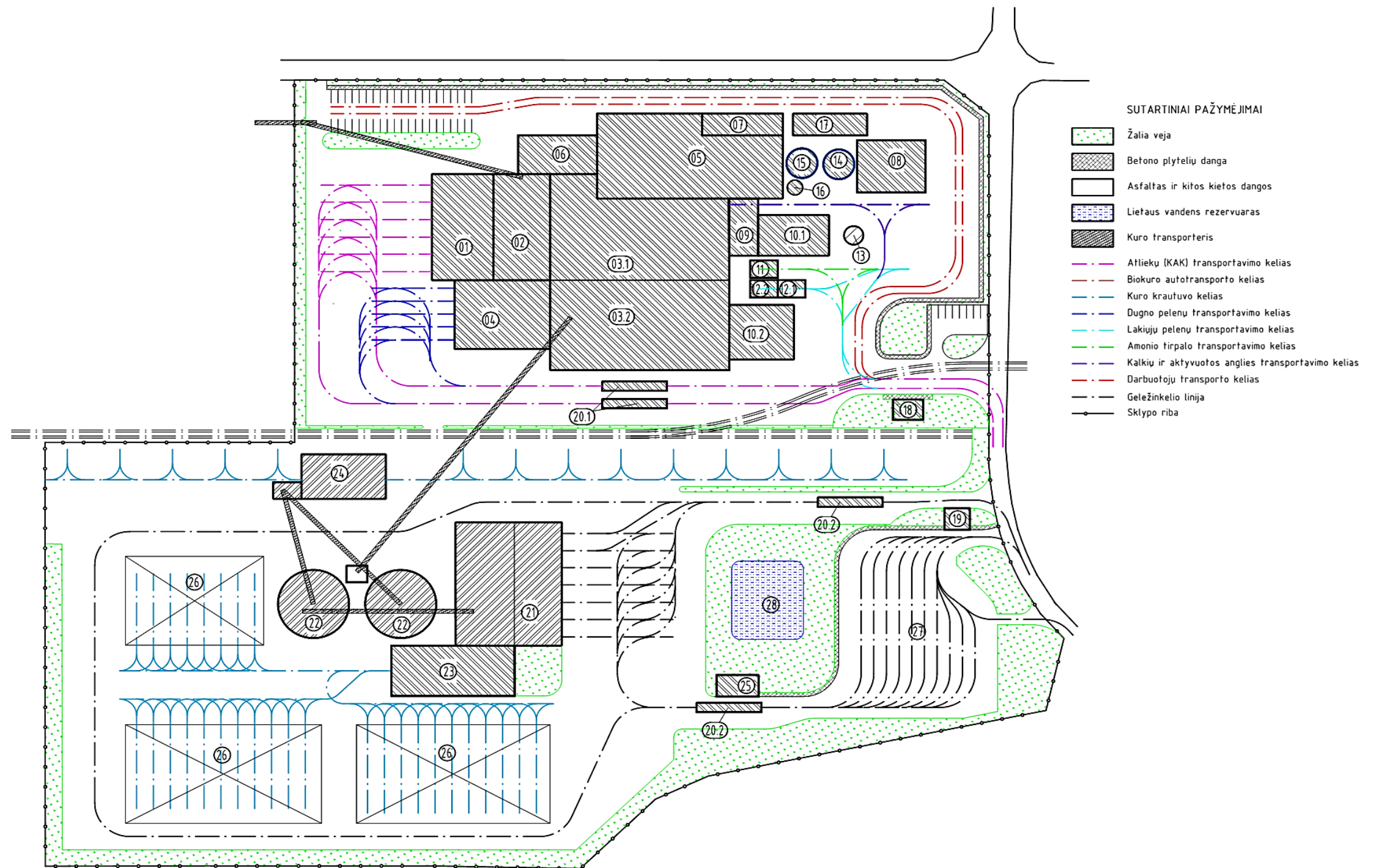
## 2 Priedas. Ribos ir reikalavimai, taikomi keičiantis dažnio išlaikymo rezervais

Sinchroninė zona	Dažnio išlaikymo rezervais gali keistis	Ribos, taikomos keičiantis dažnio išlaikymo rezervais
Žemyninės Europos sinchroninė zona	Gretimų galios ir dažnio valdymo blokų perdavimo sistemos operatoriai	<ul style="list-style-type: none"> <li>— galios ir dažnio valdymo bloko perdavimo sistemos operatoriai turi užtikrinti, kad pagal jų pradinį įsipareigojimą bent 30 % viso sudėtinio dažnio išlaikymo rezervo būtų fiziškai tiekiami jų galios ir dažnio valdymo bloke, taip pat</li> <li>— dažnio išlaikymo rezerve turimo rezervo pajėgumo apimtis, kuri galios ir dažnio valdymo bloke fiziškai gaunama keičiantis šiais rezervais su kitais galios ir dažnio valdymo blokais, turi būti ne didesnė kaip: <ul style="list-style-type: none"> <li>— 30 % viso sudėtinio dažnio išlaikymo rezervo, kurį pagal pradinį įsipareigojimą užtikrina galios ir dažnio valdymo bloko, prie kurio yra prijungtas dažnio išlaikymo rezerve turimas rezervo pajėgumas, perdavimo sistemos operatoriai, taip pat</li> <li>— 100 MW dažnio išlaikymo rezerve turimo rezervo pajėgumo.</li> </ul> </li> </ul>
	To paties galios ir dažnio valdymo bloko galios ir dažnio valdymo rajonų perdavimo sistemos operatoriai	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Galios ir dažnio valdymo rajonų, iš kurių sudarytas galios ir dažnio valdymo blokas, perdavimo sistemos operatoriai turi teisę galios ir dažnio valdymo bloko eksploatavimo sutartyje nustatyti vidaus ribas, kurių laikantis dažnio išlaikymo rezervais keičiamasi tarp to paties galios ir dažnio valdymo bloko galios ir dažnio valdymo rajonų, kad būtų: <ul style="list-style-type: none"> <li>— išvengta vidinės perkrovos, kai aktyvinami dažnio išlaikymo rezervai;</li> <li>— užtikrintas tolygus dažnio išlaikymo rezerve turimo rezervo pajėgumo paskirstymas, jei tinklas būtų skaidomas į dalis, ir</li> <li>— išvengta poveikio dažnio išlaikymo stabilumui arba tinklo eksploatavimo saugumui.</li> </ul> </li> </ul>
Kitos sinchroninės zonos	Sinchroninės zonos perdavimo sistemos operatoriai	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Sinchroninė zonos perdavimo sistemos operatoriai turi teisę sinchroninės zonos eksploatavimo sutartyje nustatyti ribas, kurių laikantis keičiamasi dažnio išlaikymo rezervais, kad būtų: <ul style="list-style-type: none"> <li>— išvengta vidinės perkrovos, kai aktyvinami dažnio išlaikymo rezervai;</li> <li>— užtikrintas tolygus dažnio išlaikymo rezervų paskirstymas, jei tinklas būtų skaidomas į dalis, ir</li> <li>— išvengta poveikio dažnio išlaikymo stabilumui arba tinklo eksploatavimo saugumui.</li> </ul> </li> </ul>

### 3 Priedas. Kogeneracinės jėgainės blokinė schema



#### 4 Priedas. Kogeneracinės jėgainės sklypo planas

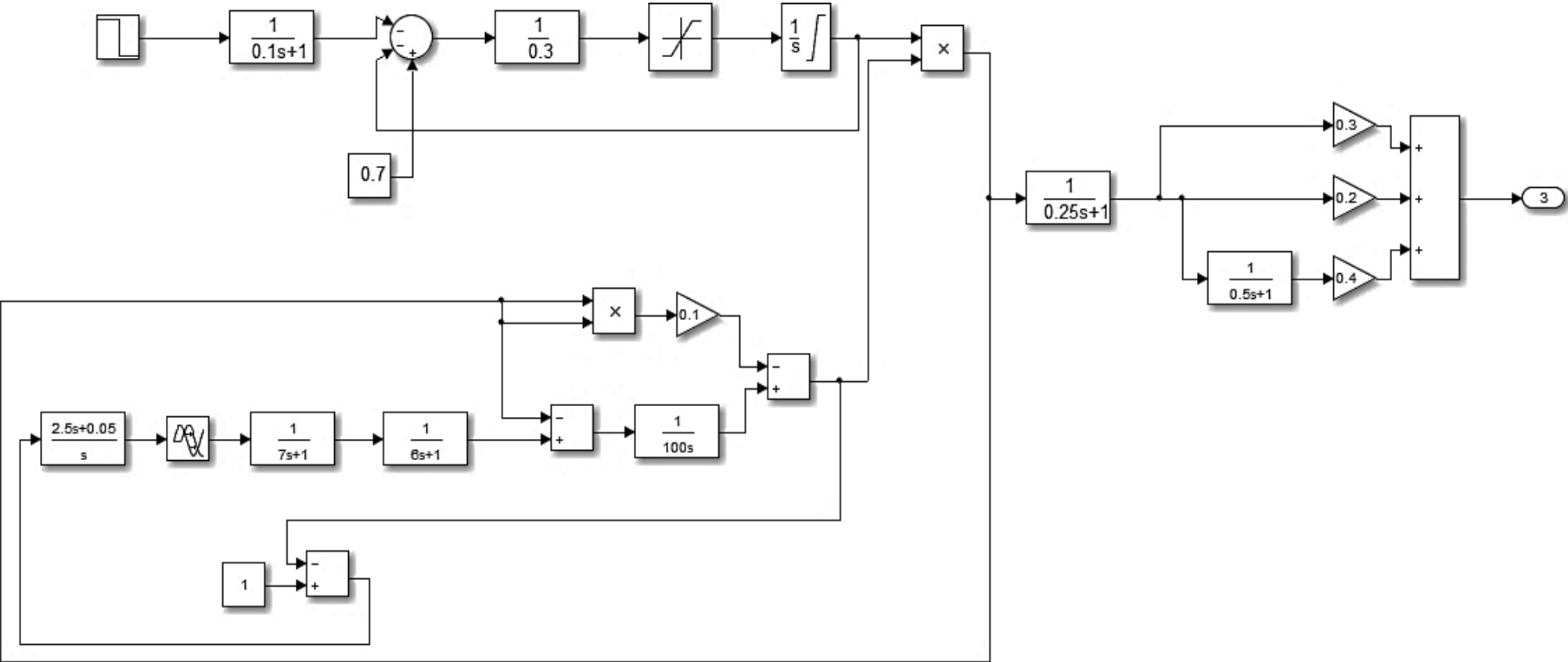


ŽYMUO	PAVADINIMAS	DALIS
01	Uždaras kuro (atliekų) priėmimo pastatas	1
02	Uždaras kuro (atliekų) saugojimo bunkeris	1
03.1	Garų katilo (atliekos) pastato dalis	1
03.2	Garų katilo (biokuras) pastato dalis	2
04	Uždaras dugno pelenu konteinerių pastatas	1
05	Garų turbinų pastatas	1
06	Administracinis ir valdymo pastatas	1
07	Skirstykla	1
08	Avarinės aušyklės	1
09	Kalkių, aktyvuotos anglies, chemikalų patalpa	1

ŽYMUO	PAVADINIMAS	DALIS
10.1	Dūmų valymas (atliekų katilas)	1
10.2	Dūmų valymas (biokuro katilas)	2
11	Amoniako talpa	1
12.1	Lakiųjų pelenu talpos	1
12.2	Lakiųjų pelenu talpos	2
13	Kaminas	1
14	"Žalio" vandens talpa	1
15	Vandens plėtimosi talpa	1
16	Chemiškai valyto vandens talpa	1
17	Transformatorinė	1
18	Budėtojo pastatas (katilų teritorija)	1

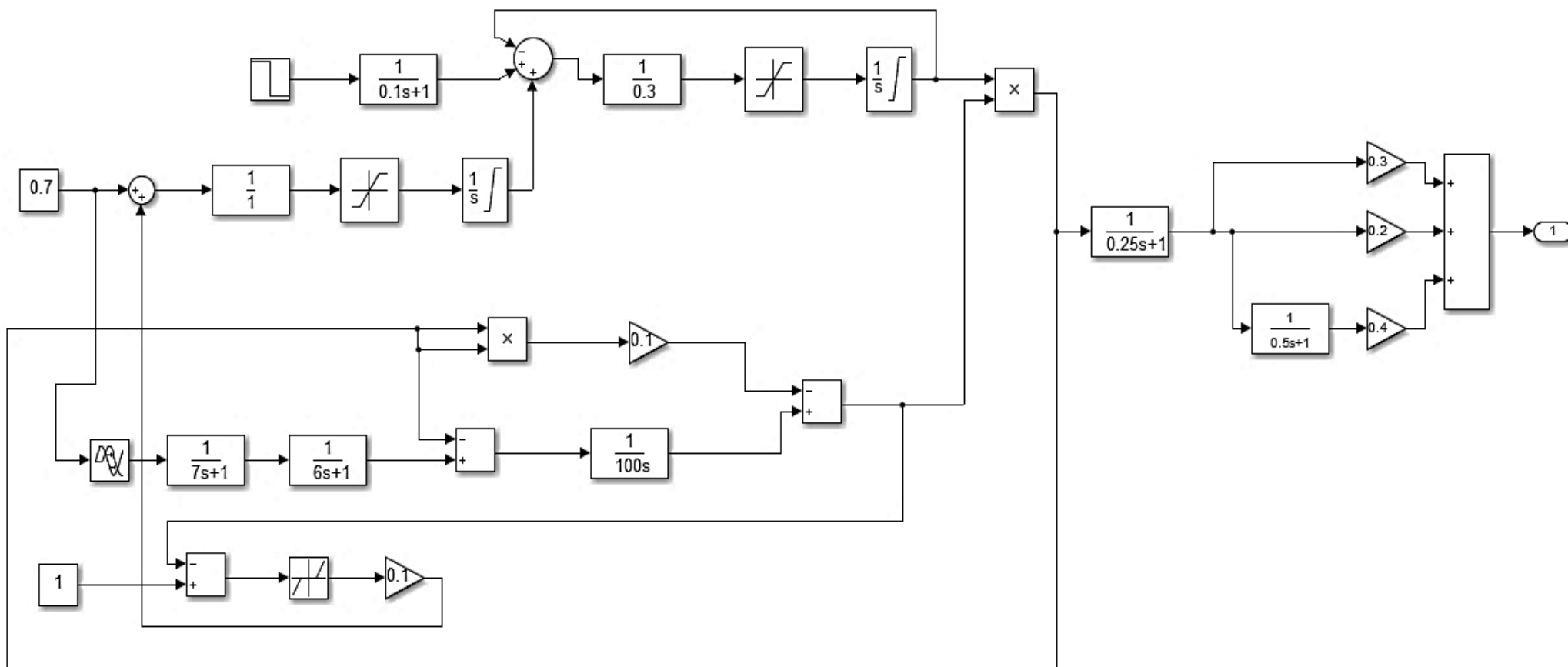
ŽYMUO	PAVADINIMAS	DALIS
19	Budėtojo pastatas (biokuro sandėliavimo teritorija)	2
20.1	Automobilinės kuro svarstyklės	1
20.2	Automobilinės kuro svarstyklės	2
21	Uždaras biokuro priėmimo pastatas	2
22	Biokuro sandėliavimo silosai	2
23	Uždaras medienos smulkinimo pastatas	2
24	Geležinkelio vagonų iškrovimo pašiūrė	2
25	Biokuro laboratorija	2
26	Raštų saugojimo zona	2
27	Biokuro autovežių sustojimo zona	2
28	Lietaus vandens surinkimo baseinas	2

5 Priedas. Pastovios galios valdymo režimo modelis

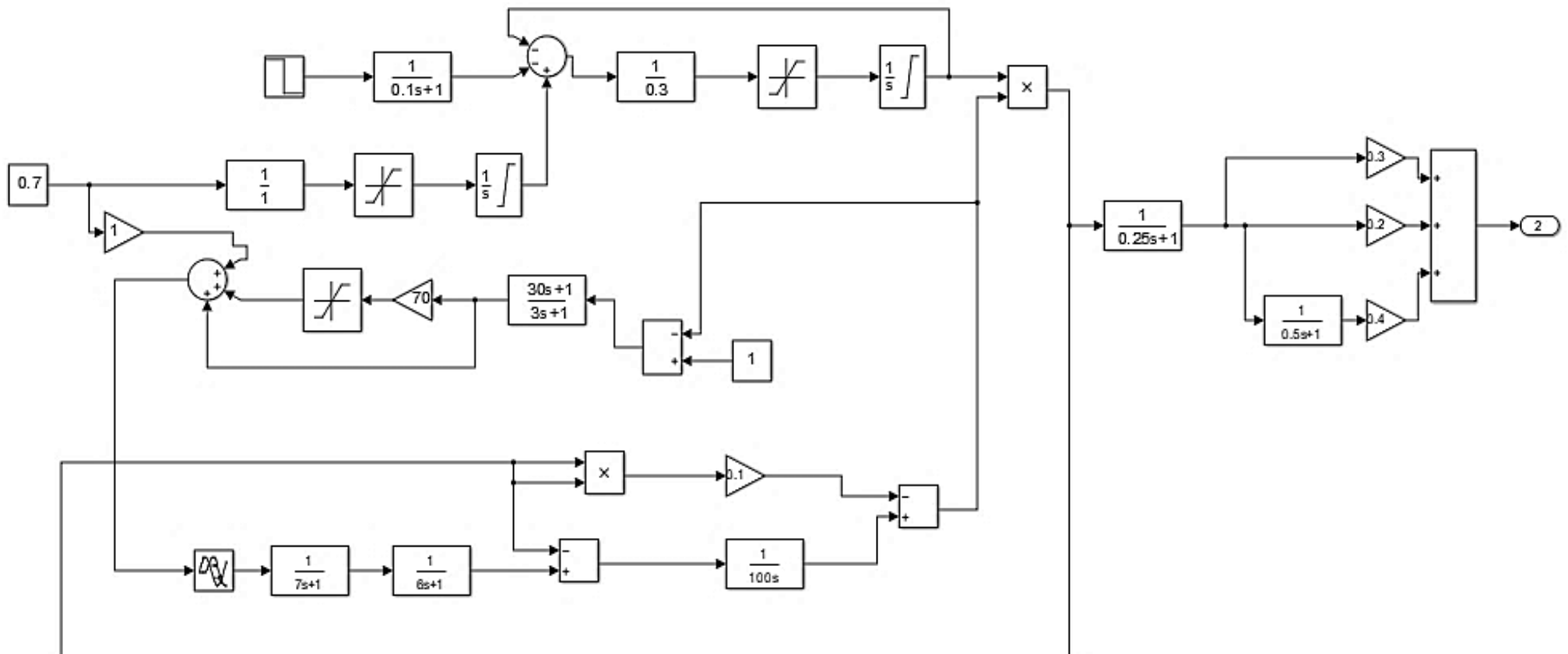




### 6 Priedas. Pastovaus slėgio valdymo režimo modelis



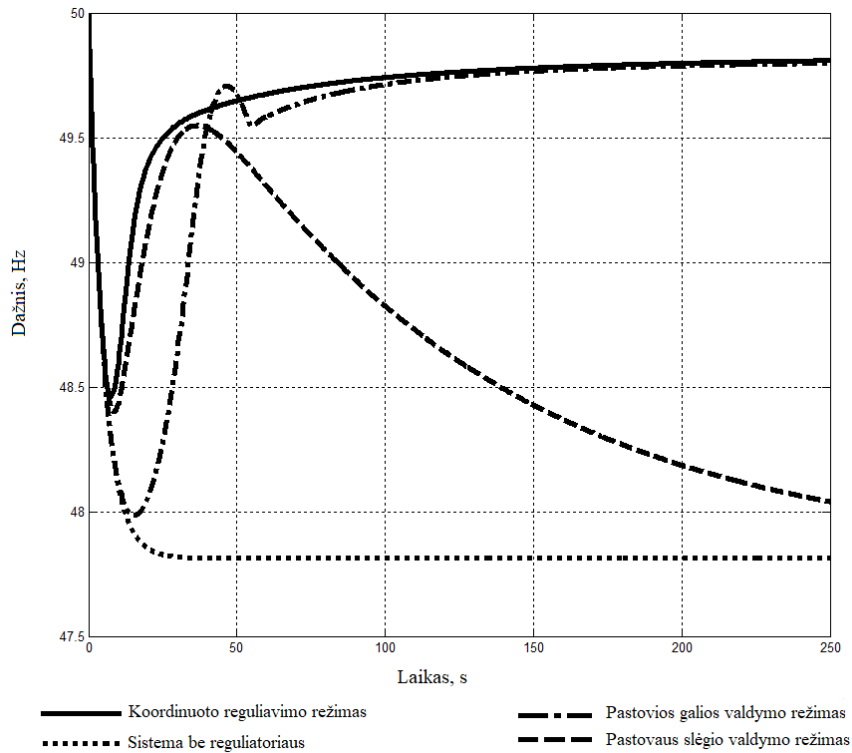
7 Priedas. Koordinuoto reguliavimo režimo modelis



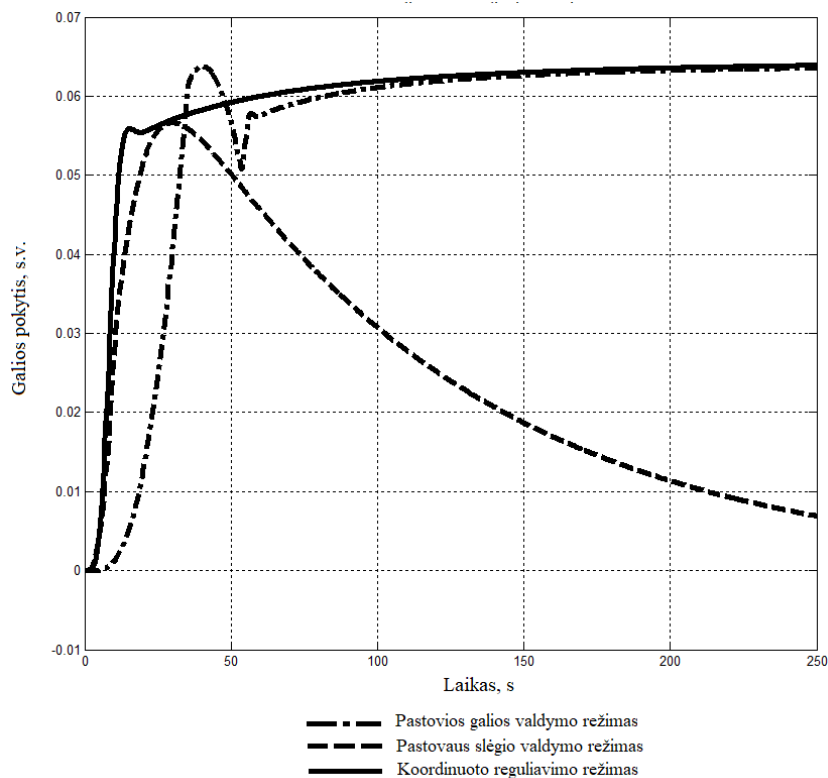
## 8 Priedas. Turbinos reguliatorių įtaka pirminiam dažnio reguliavimui keičiantis sistemos parametrams

Galios disbalansas lygus 7 %, likę parametrai 4.9 pav. nekinta:

Turbinos reguliatorių įtaka sistemos dažniui atsiradus galios disbalansui

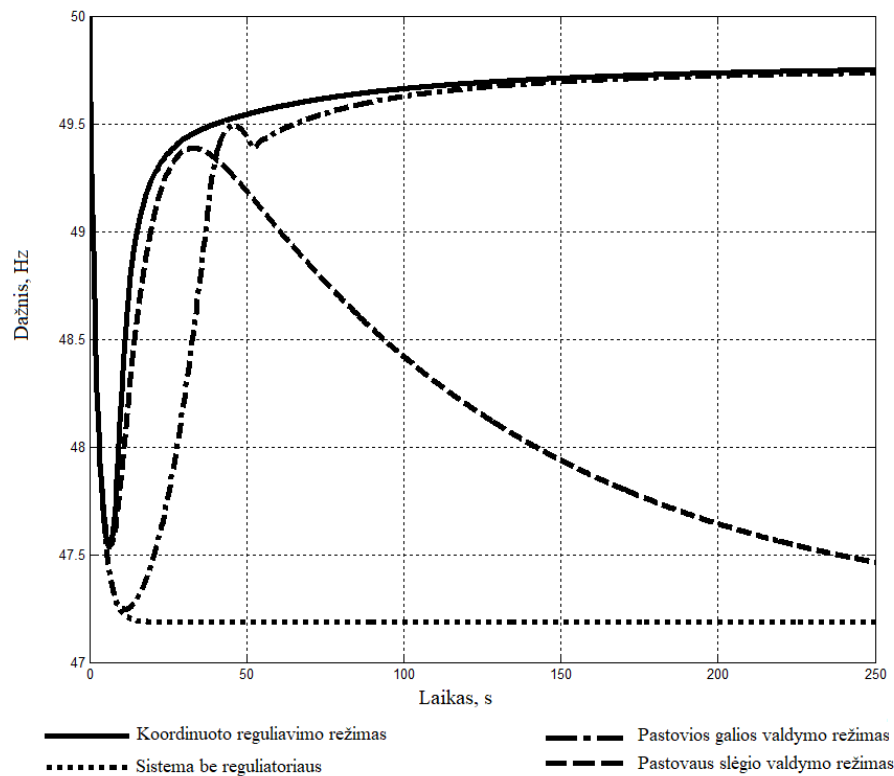


Elektrinės generuojamos galios pokytis atsiradus galios disbalansui



**Sistemos laiko pastovioji lygi 4 s, likę parametrai 4.9 pav. nekinta:**

Turbinos reguliatorių įtaka sistemos dažniui atsiradus galios disbalansui



**Elektrinės generuojamos galios pokytis atsiradus galios disbalansui**

