



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Tomas Jankauskas

**GAMYKLOS GALIMYBIŲ DIRBTI IZOLIUOTAI NUO
ELEKTROS ENERGETINĖS SISTEMOS TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Almantas Bandza

KAUNAS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

**GAMYKLOS GALIMYBIŲ DIRBTI IZOLIUOTAI NUO
ELEKTROS ENERGETINĖS SISTEMOS TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas
Elektros energetikos inžinerija (621H63003)

Vadovas

Doc. dr. Almantas Bandza
2017 06 02

Recenzentas

Doc. dr. Konstantinas Otas

Projektą atliko

Tomas Jankauskas
2017 06 02

KAUNAS, 2017



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Tomas Jankauskas

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos inžinerija (621H63003)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto

„Gamyklos galimybių dirbti izoliuotai nuo elektros energetinės sistemos tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

2017 m. birželio 2 d.

Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Tomo Jankausko** baigiamasis projektas tema „Gamyklos galimybių dirbti izoliuotai nuo elektros energetinės sistemos 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)

Jankauskas, Tomas. *Gamyklos galimybių dirbti izoliuotai nuo elektros energetinės sistemos tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Almantas Bandza*; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

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

Reikšminiai žodžiai: *Mikrotinklas, dažnio reguliavimas, PID reguliatorius, Ziegler-Nichols ir Tyreus-Luyben derinimo metodai.*

Kaunas, 2017. 47 p.

SANTRAUKA

Magistriniame darbe nagrinėjama AB „Achema“ energetinės sistemos galimybė dirbti izoliuotai nuo išorinės energetinės sistemos. Įvertinama bendrovės 110 kV elektros tinklo schemos specifika, taikant statistinius metodus nustatomos orientacinės apkrovos, ir jų kitimo tendencija. Analizuojamas esančių apkrovų padengimas vietiniais generavimo šaltiniais, bei elektrinių parametrų valdymas.

Programiniu paketu Matlab/Simulink sumodeliuotas bendrovėje esančios dujų turbinos SGT800B matematinis modelis. Dažnio reguliavimo sistemai, remiantis Ziegler-Nichols, Tyreus-Luyben derinimo metodais, randami reguliatoriaus parametrai. Atliekamas sistemos tyrimas su rastais reguliatoriaus parametrais ir gamintojo siūlomais. Pagal gautus rezultatus parenkami optimaliausi dažnio reguliatoriaus parametrai.

Jankauskas, Tomas. Research of Factory Possibilities to Operate in Isolation from Electric Power System. Final Master degree project of *Electric power engineering* / supervisor doc. dr. Almantas Bandza. Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Department of of Electrical Power systems.

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

Key words: *Microgrid, frequency regulation, PID controller, Ziegler-Nichols Tyreus-Luyben tuning methods.*

Kaunas, 2017. 47 p.

SUMMARY

The present Master Thesis presents an analysis of capability of Achema, AB energy system to operate in isolation from the external power system. The specifics of the company's 110 kV power grid scheme were evaluated, reference loads and their variation trends are determined by applying statistical methods. An analysis of potential coverage of the existing loads by local energy generation sources and control of electrical parameters is carried out.

The Matlab/Simulink software package was used to create mathematical models of the existing SGT800B gas turbine. Ziegler-Nichols, Tyreus-Luyben tuning methods were used to determine particular parameters of the controller for the frequency regulation system. The system is researched applying the determined parameters of the controller, as well as the ones proposed by the manufacturer. The achieved results are used to select the optimal parameters of the frequency controller.

SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS

- EES - elektros energijos sistema;
- EEST - nacionalinis elektros energetikos sistemos tinklas;
- AEŠ - atsinaujinantys energijos šaltiniai;
- SE - saulės elektrinės;
- VE - vėjo elektrinės;
- EKS - energijos kaupimo sistemos ;
- AB - akumuliatorinės baterijos;
- SEK - smagratiniai energijos kaupikliai;
- TG - tradiciniai generatoriai;
- AP - apkrovos;
- MVC - mikrotinklo valdymo centras;
- K_p - regulatoriaus perdavimo koeficientas;
- T_i - integravimo laiko pastovioji;
- T_d - diferencijavimo laiko pastovioji;
- ΣP_g - suminė generuojama galia;
- ΣP_a - suminė naudojama galia;
- PI - proporcingojo integralinio reguliavimo dėsnis;
- PID - proporcingojo integralinio diferencialinio reguliavimo dėsnis;
- k_r - proporcinio perdavimo koeficiento ribinė reikšmė.

Turinys

<i>LENTELIŲ SĄRAŠAS</i>	8
<i>PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS</i>	9
<i>ĮVADAS</i>	10
1. MIKROTINKLO REGULIAVIMO PROBLEMATIKA	12
1.1 <i>Dažnio reguliavimo tyrimų analizė</i>	12
1.2 <i>Praktinių sprendimų ir tolimesnių tyrimų pagrindimas</i>	13
2. GAMYKLOS GALIMYBIŲ DIRBTI IZOLIUOTAI NUO ENERGETINĖS SISTEMOS NUSTATYMAS	14
2.1 <i>Mikrotinklo reguliavimas</i>	14
2.1.1 <i>Galios balansas, dažnis ir jų svarba mikrotinkle</i>	14
2.1.2 <i>Dažnio reguliavimas</i>	17
2.1.3 <i>Dažnio reguliavimas generavimo šaltiniais</i>	18
2.1.4 <i>Dažnio reguliavimas dviejų generatorių pagalba</i>	19
2.1.5 <i>Mikrotinklo energijos šaltinių valdymo režimai</i>	20
2.2 <i>Apkrovų nustatymas</i>	21
2.3 <i>Matematinio modelio sudarymas</i>	23
2.4 <i>PID regulatoriaus derinimo metodų parinkimas</i>	28
3. GAMYKLOS MIKROTINKLO TYRIMAS	32
3.1 <i>Gamyklos mikrotinklo charakteristikų tyrimas</i>	32
3.1.1 <i>Gamyklos elektros tinklo schema</i>	32
3.1.2 <i>Apkrovų kitimo įvertinimas</i>	34
3.1.3 <i>Elektros energijos nuostolių valdymas</i>	35
3.1.4 <i>Reaktyvios ir aktyvios galios valdymas</i>	36
3.1.5 <i>Dažnio reguliavimas gamyklos mikrotinkle</i>	37
3.2 <i>Dažnio regulatoriaus derinimo parametrų parinkimas</i>	38
IŠVADOS	44
INFORMACINIŲ ŠALTINIŲ SĄRAŠAS	45
PRIEDAI	48
<i>Priedas 1. Programos kodas</i>	48
<i>Priedas 2. 2016 m. Maksimalios elektros tinklo apkrovos</i>	49
<i>Priedas 3. Modelio techninė specifikacija</i>	50

LENTELIŲ SĄRAŠAS

2.1 lentelė. PID koeficientų įtaka sistemos atsako signalui.....	30
2.2 lentelė. Ziegler-Nichols parametrų derinimo formulės uždarai sistemai	31
2.3 lentelė. Tyreus-Luyben parametrų derinimo formulės uždarai sistemai.	32
3.1 lentelė. PID reguliatoriaus parametrai	39
3.2 lentelė. Pereinamojo proceso rodikliai, padidėjus sistemoje 3MW apkrovai.....	41
3.3 lentelė. Pereinamojo proceso rodikliai, sumažėjus sistemoje 3MW apkrovai	42
P2.1 lentelė. Maksimalios galios pokyčiai 2016 metais.....	49
P3.1 lentelė. Modelio techninė specifikacija	50

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

2.1 pav. Mikrotinklo infrastruktūra	15
2.2 pav. Galios valdymo režimo schema	20
2.3 pav. Galios srauto valdymo režimo schema	21
2.4 pav. Dujų turbinos SGT800B dažnio/apkrovos struktūrinė schema	23
2.5 pav. Dujų turbinos SGT800B matematinis modelis	24
2.6 pav. Galios reguliatoriaus struktūrinė schema	25
2.7 pav. Dažnio reguliatoriaus struktūrinė schema	25
2.8 pav. Kuro sklendės valdymo struktūrinė schema	26
2.9 pav. Kuro ir kompresoriaus struktūrinės schemos dalys	26
2.10 pav. Generatoriaus G-1 struktūrinės schemos dalis	27
2.11 pav. Elektrinės galios pokyčio struktūrinės schemos dalis	27
2.12 pav. Turbinos dažnio integravimo struktūrinės schemos dalis	27
2.13 pav. PID reguliatoriaus blokinė schema	29
3.1 pav. Gamyklos 110 kV schema	33
3.2 pav. Gamyklos 6 kV schema	33
3.3 pav. Vartojamos maksimalios aktyvios galios normaliojo skirstinio grafikas	35
3.4 pav. Įtampų stebėjimo langas	36
3.5 pav. Elektros apskaitos programos langas	37
3.6 pav. Švytavimo nusistovėjimas	38
3.7 pav. Dažnio reguliavimo pereinamojo proceso kreivės, kai sistemoje imituojamas 3MW apkrovos padidėjimas	40
3.8 pav. Turbinos mechaninės galios pereinamojo proceso kreivės, kai sistemoje imituojamas 3MW apkrovos padidėjimas	40
3.9 pav. Dažnio reguliavimo pereinamojo proceso kreivės, kai sistemoje imituojamas 3MW apkrovos sumažėjimas	41
3.10 pav. Turbinos mechaninės galios pereinamojo proceso kreivės, kai sistemoje imituojamas 3MW apkrovos sumažėjimas	42
P2.1 pav. 2016 metų maksimalių apkrovų grafikas	49

IVADAS

Elektros energijos sistemoje aktyvioji galia turi būti generuojama ir suvartojama tuo pačiu metu. Galios generavimas ir suvartojimas turi būti palaikomas nuolatinėje pusiausvyroje, priešingu atveju atsiranda galios nebalansas, o tai gali sąlygoti vardinio dažnio nukrypimą. Energetinėje sistemoje dažnis yra bendras elektros sistemos kokybės rodiklis, kuris turi išlikti arti vardinio dydžio, kadangi jo nukrypimai gali tiesiogiai paveikti sistemos veikimo stabilumą, patikimumą ir efektyvumą. Dideli dažnio nukrypimai gali nepataisomai sugadinti įrangą, perkrauti perdavimo linijas ir daryti neigiamą įtaką sistemos apsaugų schemų veikimui.

Veikiant įmonės mikrotinklui kartu su išoriniu tinklu, ši pusiausvyra palaikoma išorinio tinklo. Atsijungus mikrotinklui nuo išorinio tinklo - perėjus į salos veikimo režimą, pagrindiniais mikrotinklo pusiausvyros išlaikymo uždaviniais tampa elektros kokybės parametrų kontrolė ir energijos nuostolių mažinimas.

Nors mikrotinklų diegimas sparčiai auga, tačiau vis dar kyla iššūkių kaip efektyviai juos projektuoti, kontroliuoti ir valdyti. Mokslininkai deda dideles pastangas tobulinti mikrotinklus. Šiuo tikslu pasaulyje yra plačiai vykdomi moksliniai tyrimai, kurių tikslas išsiaiškinti, kaip spręsti kylančias problemas.

Ankstesnių, su mikrotinklo valdymu, susijusių tyrimų pagrindinė idėja - paskirstytų generavimo šaltinių ir inverterių glaudus ryšys elektros sistemoje. Tyrimai, dėl kontroliavimo sistemų parinkimo galios balansui, gedimams ir sistemos stabilumui įvertinti buvo plačiai atlikti, sutelkiant pagrindinį dėmesį į galios elektronikos sistemų naudojimą.

Vėlesniuose tyrimuose didelis dėmesys skiriamas reguliatorių derinimo parametrų parinkimo metodams. Tyrimais ieškoma vis geresnių regulatoriaus derinimo parametrų parinkimo metodų, bei siekiama išgauti optimaliausią valdymo rezultatą. Siekti šio tikslo galima sukuriant objekto matematinį modelį, taip pat naudojant įvairias kitas priemones ir metodus. Tinkamai parinktos priemonės ir metodai leidžia užtikrinti kokybišką energetinės sistemos valdymą.

Tyrimo objektas - AB „Achema“ gamyklos galimybė dirbti izoliuotai nuo elektros energetinės sistemos.

Darbo tikslas - galios ir dažnio nuokrypių optimizavimas, veikiant gamyklai izoliuotai nuo energetinės sistemos.

Darbo uždaviniai:

- 1) Išanalizuoti gamyklos 110kV elektros tinklo schemas specifiką, išskirtosios dalies apkrovų ir jų padengimo vietiniais generavimo šaltiniais galimybes, bei taikomas priemones galių balansui palaikyti.
- 2) Sudaryti dažnio ir apkrovos reguliavimo matematinį modelį.

3) Parinkti optimaliausius dažnio regulatoriaus derinimo parametrus.

Darbo metodai:

- mokslinių straipsnių analizė;
- sistemos veikimo analizė;
- matematinis modeliavimas Matlab/Simulink programos paketu.

Šiame darbe atliekamas gamyklos mikrotinklo dažnio regulatoriaus charakteristikų tyrimas. Naudojantis ekstrapoliavimo metodu ir normaliojo skirstinio dėsnio įvertinama apkrovų dinamika tinkle. Programos Matlab/Simulink pagalba sudaromas gamyklos pagrindinės struktūros modelis. Dažnio reguliatoriui pritaikomi gamintojo rekomenduojami, ir apskaičiuoti Ziegler-Nichols, Tyreus-Luyben derinimo metodais gauti parametrai. Atliekamas, skirtingu būdu gautų, rezultatų palyginimas ir optimaliausių parametų parinkimas.

1. MIKROTINKLO REGULIAVIMO PROBLEMATIKA

1.1 Dažnio reguliavimo tyrimų analizė

Ankstesni tyrimai dėl mikrotinklo kontroliavimo sistemų parinkimo buvo sutelkti į galios elektronikos sistemų panaudojimą. Buvo manoma, kad energetinėje sistemoje pagrindinį energijos šaltinių darbą derins inverteriai. Šie tyrimai suteikė išvalgų tolimesniems mikrotinklo autonominio veikimo principams ir kontroliavimo sistemų parinkimui.

D. Feng ir Z. Chen tyrime „System control of power electronics interfaced distributed generation units“, kalbama apie kelių keitiklių lygiagretų valdymą, paskirstyto generavimo sistemoje. Esmė yra sistema, kurią sudaro dvi paskirstyto generavimo posistemės. Kiekvienoje posistemėje yra du įtampos šaltinių keitikliai ir dvi apkrovos. Keitiklių valdymui naudojama vidinė kilpa, kuri reguliuoja srovę ir išorinė kilpa, kuri reguliuoja įtampą. Svirimo kontrolės sistema apskaičiuoja sistemos etaloninę įtampą ir sulygina ją su įtampa esančia dabartinėmis darbo sąlygomis. Jeigu įtampos skiriasi, gaunamas klaidos signalas, kuris naudojamas kontrolierio, kad būtų sureguliuotas inverterio PWM signalas. Posistemėje dirba du generavimo šaltiniai, vienas kaip pagrindinis, kitas kaip pagalbinis įrengimas, kur pagrindinis reguliuoja įtampą, o pagalbinis atlieka apkrovos pasiskirstymą ir galios balansą. Kontroliuojant keitiklius sistemoje įtampa ir dažnis palaikomas reikiamame lygyje, taip pasiekiant pusiausvyrą tarp apkrovų ir generuojamos galios. Tokia pagrindinio ir pagalbinio įrengimo valdymo konfigūracija sukelia didesnę gedimo tikimybę, keitiklio kontroliavimas naudojant kilpą yra unikalus, todėl konfigūraciją naudoti kaip universalų valdiklį mikrotinkle su keliais energijos šaltiniais yra sudėtinga [1].

J. Liang, T. Green, G. Weiss ir Q. Zhong tyrimas „Hybrid control of multiple inverter in an island-mode distribution system“ atskleidė, kad plačiai naudojant inverterius mikrotinkle, dėl vidinių perjungimų, gali susidaryti aukštesnės eilės harmonikos. Hibridinis inverterių naudojimo metodas, kai pagrindinis inverteris naudoja bendro mazgo pakartotinį įtampos kontroliavimą slopinant harmoninius iškraipymus, o pagalbinis inverteris papildomai naudoja srovės kontrolę. Gauti simuliacijos rezultatai įrodė, kad hibridinis kontroliavimas gali pagerinti signalo kokybę mažinant bendrus harmoninius iškraipymus [2].

Vėlesniuose tyrimuose didesnis dėmesys buvo kreipiamas į reguliatorių derinimo parametru parinkimo metodus.

D.Jain, Dr. M. K.Bhaskar „Analysis of load frequency control problem for interconnected power system using PID controller“ atliktame tyrime kalbama apie energetinės sistemos dažnio kontroliavimą naudojant PID reguliatorių. Regulatoriaus derinimo parametrai parinkti trimis skirtingais metodais t.y Ziegler'io Nichols'o (Z-N), Simplekso ir vienu iš naujausių vidinio valdymo kontrolės IMC (internal model controller) metodu. Tiriamu objektu buvo pasirinktos dvi

energetinės sistemos su skirtingais turbinų parametrais. Gauti rezultatai parodė, kad PID reguliatoriaus derinimo parametrai gauti vidinio valdymo (IMC) metodu davė geriausius tyrimo rezultatus dažnio svirimo ir galios paskirstimo atveju, tarp dviejų sistemų [3].

I.Kocarlan, E.Cam „Fuzzy logic controller in interconnected electrical power systems for load frequency control“ tyrime pritaikė neraiškios logikos „Fuzzy“ metodą, parenkant proporcinio ir integruojančio reguliatoriaus (PI) parametrus, automatiniam apkrovos ir dažnio kontroliavimui elektros energetinėje sistemoje. Buvo sumodeliuota dviejų rajonų energetinė sistema ir siūlomas FGPI (fuzzy gain scheduled proportional and integral) reguliatorius, kuris tyrimo rezultatais parodė, kad yra veiksmingas ir tinkamas dažnio svyrimo sekimui, dėl apkrovų pokyčio. Siūlomas reguliatorius buvo lyginamas su trimis skirtingais reguliatoriais: įprastiniu PID reguliatoriumi, fuzzy loginiu reguliatoriumi ir ankstesniu sukurtu FGPI reguliatoriumi. Sureguliuavimo laikai ir neatitikimai reguliuojant, bei integravimo kintamieji buvo naudojami kaip pagrindiniai lyginimo kriterijai įvertinant reguliatoriaus veikimo rezultatus. Tyrimais parodyta, kad siūlomas FGPI reguliatorius, turi geresnes charakteristikas negu kiti lyginami reguliatoriai [4].

V. Shanmuga, V. Jayabarathi „Load frequency control using pid tuned ANN controller in power system “ atliktame tyrime, kalba apie dirbtinio neuroninio tinklo panaudojimą parenkant PID reguliatoriaus parametrus. Matlab programiniu paketu buvo sumodeliuota dviejų rajonų energetinė sistema, kurioje naudojamas adaptyvusis PID reguliatorius, tradicinis integralinis ir PID reguliatorius su pastoviais derinimo parametrais. Tiriama dažnio reguliavimo kokybė, keičiant sistemoje apkrovas. Tyrimais parodė, kad jų siūlomas adaptyvus PID reguliatorius greitesnis negu kiti du ir gali būti naudojamas sistemos dažnio reguliavime [5].

Dharmendra Jain, M.K Bhaskar, Manoj Kumar „Comparative analysis of different methods of tuning the pid controller parameters for load frequency control problem“ tyrime nagrinėjama dviejų rajonų energetinė sistema. Atliktas tyrimas parodė, kad šiuolaikiniai PID reguliatoriai daug pranašesni už tradicinius integralinius reguliatorius, juos taikant dažnio reguliavimui sistemoje, prie skirtingų apkrovų. Tyrime PID reguliatoriai parinkti dvejais parametų derinimo metodais Ziegler'io Nichols'o ir Simplekso. Abiem metodais parinkti PID reguliatoriaus parametrai parodė geresnius sistemos dažnio reguliavimo pereinamojo proceso rodiklius, negu tradicinis integruojantis reguliatorius [6].

1.2 Praktinių sprendimų ir tolimesnių tyrimų pagrindimas

Pasitaikantys elektros energijos tiekimo nutraukimai tinkle rodo, kad, siekiant pagerinti bendrą elektros sistemos reguliavimą, svarbu numatyti efektyvesnes ir patikimesnes reguliavimo strategijas. Efektyvus strategijų įgyvendinimas gali užtikrinti geresnius sistemos saugumo, efektyvumo ir dinamiškumo rezultatus.

Siekiant turėti saugų, kokybišką ir subalansuotą energijos tiekimą, būtina užtikrinti, kad generuojama ir vartojama galia būtų palaikoma nuolatinėje pusiausvyroje, todėl generuojamos ir vartojamos galios neatitikimų mažinimas, minimizuojant galios ir dažnio nuokrypius, vis dar aktualus ir svarbus uždavinys elektros sistemoje. Atsižvelgiant į šias išvardintas priežastis, dažnio reguliavimo problemai spręsti, yra reikalingi tolimesni tyrimai tiek teoriniame, tiek ir praktiniame lygmenyje.

2. GAMYKLOS GALIMYBIŲ DIRBTI IZOLIUOTAI NUO ENERGETINĖS SISTEMOS NUSTATYMAS

2.1 Mikrotinklo reguliavimas

Efektyvus mikrotinklo projektavimas ir valdymas, šiandien akcentuojami ne vieno mokslininko ir mokslinės literatūros autoriaus. Toks susidomėjimas mikrotinklu atsirado atsižvelgiant į ekonominius, technologinius ir kitus aspektus. Į mikrotinklus vis dažniau žiūrima kaip į būdą, kuris gali užtikrinti elektros paslaugų tiekimo kokybę. Mikrotinklas gali būti puiki alternatyva didinti elektros energijos tiekimo patikimumą ir energijos vartojimo efektyvumą.

Mikrotinklo valdymas gali sumažinti elektros nuostolius, todėl bendros elektros sistemos įrenginių veikimo optimizavimas mikrotinkle yra labai svarbus.

Kadangi visoje elektros energijos skirstymo sistemoje, kiekvienu momentu, elektros turi būti gaminama tiek, kiek tuo metu reikia vartotojams - elektros sistemos darbas turi būti planuojamas, o jo įrenginių darbas koordinuojamas.

Siekiant turėti saugų, kokybišką ir subalansuotą energijos tiekimą, būtina užtikrinti, kad generuojama ir vartojama galia būtų palaikoma nuolatinėje pusiausvyroje, todėl generuojamos ir vartojamos galios neatitikimų mažinimas, minimizuojant galios ir dažnio nuokrypius, tampa svarbus uždavinys elektros sistemoje.

Galimybė kontroliuoti elektros kokybę mikrotinklui prisijungus, ar izoliuotai nuo energetinės sistemos, yra pakankamai naujas reiškinys. Ieškant optimaliausių mikrotinklo reguliavimo sprendimų atrandamos vis naujesnės priemonės, kuriomis gali būti pasiekiamas elektros vartotojų poreikių ir tinklo lankstumo suderinamumas.

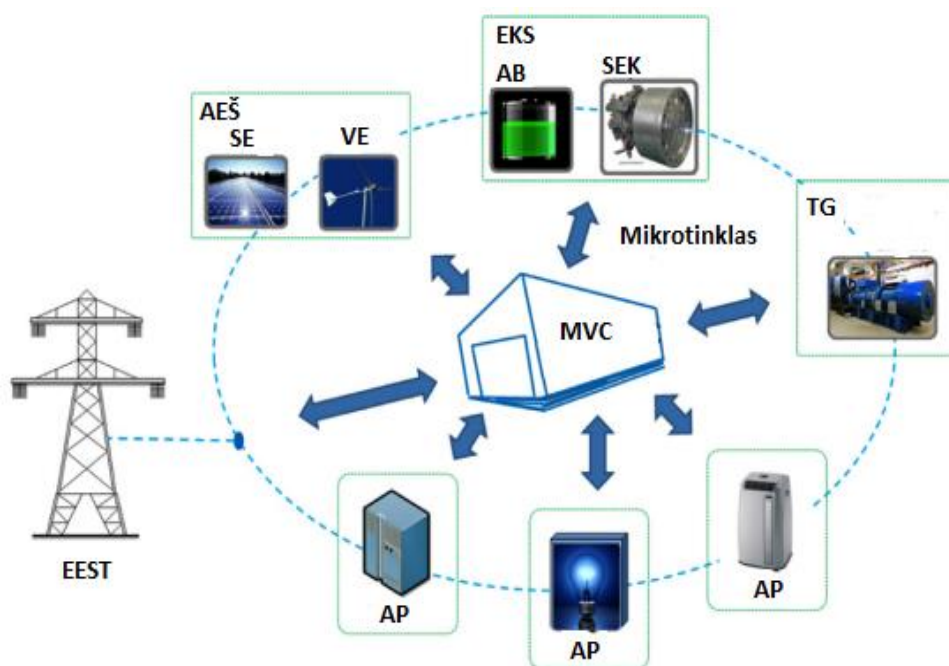
2.1.1 Galios balansas, dažnis ir jų svarba mikrotinkle

Mikrotinklas, energetinės sistemos atžvilgiu, veikia kaip vienas valdomas objektas, kuris gali prisijungti arba atsijungti nuo bendros energetinės sistemos tinklo [7].

Įvairiuose šaltiniuose mikrotinklo sąvoka (ang. *Microgrid*) yra apibrėžiama panašiai. Pavyzdžiui, Jungtinių Amerikos Valstijų departamentas mikrotinklą apibūdina kaip tarpusavyje susijusių apkrovų grupę, turinčią skirtingus energijos šaltinius, su aiškiai apibrėžtomis ribomis.

Meng, L., Sanseverino E. R., Luna A. ir kt., mikrotinklą apibrėžia kaip elektros energijos skirstymo sistemą, turinčią apkrovas su paskirstytais energijos šaltiniais (tradiciniai generatoriai, energijos kaupimo sistemos, atsinaujinantys energijos šaltiniai), kurie gali būti lanksčiai kontroliuojami prisijungus prie išorinio elektros tinklo arba savarankiškai [8].

Mikrotinklo infrastruktūra pateikta 2.1 paveiksle.



2.1 pav. Mikrotinklo infrastruktūra: *EEST* - nacionalinis elektros energetikos sistemos tinklas; *AEŠ* - atsinaujinantys energijos šaltiniai (*SE* - saulės elektrinės, *VE* - vėjo elektrinės); *EKS* - energijos kaupimo sistemos (*AB* - akumuliatorinės baterijos, *SEK* - smagratiniai energijos kaupikliai); *TG* - tradiciniai generatoriai; *AP* - apkrovos; *MVC* - mikrotinklo valdymo centras [2].

Kaip jau minėta anksčiau, elektros energijos sistemoje aktyviosios galios vartojimas ir generavimas turi vykti vienu metu - taip užtikrinamas galių balansas. Atsižvelgiant į tai, kad šiame darbe nagrinėjamos gamyklos galimybės dirbti izoliuotai nuo elektros sistemos, pagrindinis dėmesys bus kreipiamas į galios balanso palaikymą izoliuotoje elektros sistemoje. Kadangi dėl galios vartojimo ir generavimo nesutapimo kinta dažnis, yra svarbu jį užtikrinti pastovų.

Dažnis - tai fizikinis dydis rodantis kiek kartų įvykis pasikartoja per tam tikrą laiko vienetą. Dažnis matuojamas hercais (*Hz*). 1 *Hz* - tai toks dažnis, kai per 1 sekundę įvyksta 1 svyravimas. Dažnio sąvoka plačiai paplitusi daugelyje mokslo sričių.

Lietuvių kalbos žodynas, fizikine prasme, dažnį apibūdina kaip periodinio reiškinio pasikartojimų skaičiaus dažnumą per vieną sekundę [9].

Lietuvos ir Europos standarte LST EN 50160, dažnis įvardijamas kaip elektros kokybės rodiklis, apibūdinantis įtampos pagrindinės harmonikos pasikartojimo spartą, per tam tikrą laiką [10]. Dokumente numatyta, kad standartinis (pramoninis) dažnis yra 50 hercų (Hz).

Dažnis elektros sistemoje, kintant apkrovoms, nuolat svyruoja. Europos standartas EN 50160 elektros įreninių gamintojams nurodo, kad dažnis elektros tinkle 99,5 % laiko per metus gali būti tarp 49,5 ir 50,5 Hz ., bet visą laiką - tarp 47 ir 52 Hz [11].

Elektros sistema yra jautri dažnio nuokrypiams. Šie nuokrypiai trikdo veiksmingą jos darbą, todėl būtina palaikyti kuo pastovesnį dažnį elektros sistemose. Dažnio sumažėjimas rodo, kad elektros sistemos elektrinės generuoja mažiau galios nei reikalinga vartotojui, o padidėjimas, priešingai - reiškia galios generavimas viršija paklausą. Dėl dažnio kitimo elektros sistemos vartotojai patiria nuostolių (dėvėsi įrengimai, daugiau naudojama kuro). Ypač tai aktualu pramonėje, kadangi jų elektros sistemų įrenginiai yra itin jautrūs dažnio nuokrypiams. Atsižvelgiant į tai - pastovaus dažnio palaikymui turi būti skiriamas didelis dėmesys, derinant dažnio reguliavimo sistemas, reaguojančias į dažnio nuokrypius.

Radziukynas V., Nemura A., Nargėlas A. (2007), akcentuoja elektros energetikos sistemos galių balanso ir dažnio tarpusavio ryšį. Pasak autorių, elektros energetinės sistemos dažnio kitimą nuo vardinės reikšmės sukeliantys trikdžiai, pirmiausia padengiami besisukančių generuojamų agregatų ir variklių kinetine energija. Generacijos lygį sistema turi keisti pakankamai lanksčiai, akimirksniu reguliuojant apkrovas bei generavimo kitimus.

Tiekiamos elektros energijos kokybė apibūdinama generavimo ir vartojimo balansu, esant vardiniam dažniui:

$$\Sigma P_{gf} - \Sigma P_{df} = 0; \quad (2.1)$$

Čia:

ΣP_g - suminė generuojama galia, esant vardiniam dažniui;

ΣP_a - suminė naudojama galia, esant vardiniam dažniui.

Sistemos nusistovėjusio režimo egzistavimas būtinai turi tenkinti (2.1) lygtį. Tačiau galių balansas sistemoje gali egzistuoti ir esant kitam pastoviam dažniui f , t.y.

$$\Sigma P_{gf} - \Sigma P_{df} = 0; \quad (2.2)$$

Čia:

ΣP_{gf} - suminė generuojama galia esant dažniui f ;

ΣP_{af} - suminė vartotojų reikalaujama galia esant dažniui f .

Lygtimi (2.2) apibūdinama suminės generuojamos ΣP_{gf} ir suminės vartojamos ΣP_{af} galios balanso priklausomybė nuo dažnio f . Atsiradus sistemoje mažam nebalansui prie vieno dažnio, galios balansas egzistuos sistemoje esant kitam dažniui. Tokia savaiminio susireguliuojimo savybė energetinei sistemai garantuoja darbo stabilumą. Tačiau, dėl didelio nebalanso elektros energetinėje sistemoje gali sutrikti savireguliuojimas, kurio pasėkmė - susidariusi avarinė situacija.

Elektros energijos sistemos režimo reguliavimas pagal dažnį, gali būti vykdomas tiek atliekant iš anksto suplanuotus, tiek ir neplanuotus generatorių generuojamų galių reguliavimus. Reguliavimas pagal iš anksto numatytus planus, atliekamas vadovaujantis patvirtintais generavimo grafikais, kuriuose pateikiamos ir suminės reikalaujamos galios prognozės. Nepaisant gana tikslių apkrovų prognozinių grafikų, palaikyti pastovaus vardinio dažnio nepavyksta. Taip atsitinka dėl to, kad kiekvienu laiko momentu faktinės apkrovos nuolat kinta ir nesutampa su prognozuotomis planuose. Staigus suminės apkrovos pasikeitimas veikia elektrines - jos nespėja laiku pakeisti generuojamos galios, todėl laikinai sutrikdomas galių balansas. Siekiant palaikyti dažnį nustatytose ribose, būtina nuolat stebėti balansą tarp generuojamos ir suvartojamos galios, o nustačius skirtumą nedelsiant jį pašalinti.

Neplanuotas elektros energijos sistemos režimo reguliavimas pagal dažnį, vykdomas esamu momentu nustačius balanso skirtumus ir rankiniu arba automatinio būdu keičiant generuojamas galias taip, kad būtų sumažintas nebalansas. Atsižvelgiant į tai, kad apie iš anksto neplanuotas apkrovos dydį, elektros energetinėje sistemoje, sprendžiama pagal dažnio nuokrypio dydį ir ženklą esamu momentu, neplanuotas generatorių generuojamų galių reguliavimas papildo reguliavimus pagal iš anksto numatytus planus [12].

Apibendrinant, galima padaryti išvadą, kad dažnis yra elektros energetinės sistemos galių balanso rodiklis. Galima teigti, kad galių balanso palaikymo uždavinys yra vardinio dažnio palaikymo uždavinys. Norint palaikyti galių balansą sistemoje privaloma išlaikyti jį artimą vardiniam dydžiui. Siekiant užtikrinti, kad dažnis būtų nuolat palaikomas nustatytose ribose, pusiausvyra tarp suvartojamos ir generuojamos galios turi būti nustatyta ir atstatyta pakankamai greitai.

2.1.2 Dažnio reguliavimas

Elektros energijos sistemos režimo reguliavimas pagal dažnį gali būti nuolatinis rankinis arba automatinis. Naudojant šiuos reguliavimus, suminės generuojamos galios keitimas turi vykti taip, kad kintant suminei vartotojų reikalaujamai galiai, dažnis visą laiką būtų artimas vardiniam.

Dažnio palaikymui nustatytose ribose naudojami sinchroniniai generatoriai. Sinchroninius generatorius suka varikliai, tokie kaip garo ar vandens turbinos. Kintant generuojamai ir vartojamai galiai sistemoje - reaguoja dažnis. Dažniui mažėjant, nešiklio padavimas į pirminius variklius turi būti didinamas, o padidėjus - mažinamas. Tokią automatinio reguliavimo funkciją atlieka specialūs reguliatoriai, kurie yra vadinami automatiniais dažnio reguliatoriais.

Siekiant užtikrinti galių balansą, negalima padidinti tik vieno agregato galios, kad nepakistų galios srautų paskirstymas. Pasikeitęs galios srautų paskirstymas gali paveikti sistemos ekonomiškumą ir patikimumą. Būtent dėl šios priežasties dažnio valdymas susijęs su aktyviųjų galių valdymu. Tam tikslui pasiekti yra naudojama speciali valdymo sistema. Pirmojoje sistemos grandyje yra pirminių agregatų dažnių reguliatoriai. Antroji grandis veikia kaip grupinis galios reguliatorius, kuris kontroliuoja pirminių reguliatorių darbą - paskirsto apkrovas tarp generatorių ir nenutrūkstamai palaiko galimybę didinti arba mažinti generuojamą galią. Antroji grandis yra vadinama pagalbine. Paskutinioji grandis tai elektros sistemos valdymo rajono reguliavimo sistema. Sistema kitaip dar vadinama antriniu reguliatoriumi. Antrinis reguliatorius kontroliuoja visų elektrinių generatorių, dalyvaujančių dažnio reguliavimo procese darbą. Taip pat ši sistema stabilizuoja tarpsteminis galių srautus. Aprašyta valdymo struktūra yra vadinama automatinio generacijos valdymo sistema [13].

2.1.3 Dažnio reguliavimas generavimo šaltiniais

Izoliuotoje sistemoje, veikiantys sinchroniai generavimo šaltiniai turi palaikyti pagrindinius elektros kokybės parametrus - vardinį dažnį ir reikiamą įtampą. Tuo atveju, kai sistemoje dirba vienas generatorius - šias abi funkcijas turi atlikti jis.

Vardinio dažnio ir įtampos parametrų valdymas yra skirtingas, todėl tokia galimybė yra, kadangi dažnį reguliuoja turbinos reguliatorius, o įtampą - žadinimo reguliatorius.

Tuo atveju, kai energijos šaltiniai yra sinchroniniai generatoriai, tai priklausomai nuo šiluminių apkrovų ar valdymo specifikos jų turbinų reguliatoriai gali dirbti žemiau išvardintais režimais:

- 1) pastovios galios režimu;
- 2) dažnio reguliavimo režimu;
- 3) statinio dažnio reguliavimo režimu.

Pastovios galios režimas taikomas generatoriams, kurie veikia lygiagrečiai su elektros energetine sistema ir neturi užduoties reguliuoti dažnio. Tuomet, turbinos galia reguliuojama atsižvelgiant į galios nuokrypį, nuo nustatytosios galios ir reguliatorius dažniausiai būna PI veikimo dėsnio. Turbinos nustatyta galia priklauso nuo apkrovų ar kitų įsipareigojimų ir normalaus

nusitovėjusio veikimo metu būna lygi nustatytajai jos galiai. Šiuo režimu dirbantys generatoriai dažniausiai visą darbo laiką veikia maksimalia galia.

Dažnio reguliavimo režimas taikomas tiems generatoriams, kurie maitina vietines apkrovas autonomišku režimu. Turbinos galia reguliuojama pagal dažnio nuokrypį nuo nustatytosios reikšmės ir reguliatorius būna PI veikimo dėsnio. Normalaus nusistovėjusio režimo metu dažnio reikšmė būna lygi nustatytajai jo reikšmei. Taip reguliuojant dažnį generatoriaus galia yra pritaikoma apkrovų galiai ir palaikomas pastovus dažnis.

Tuo atveju, kai izoliuotai nuo energetinės sistemos veikiančių tinklą maitina daugiau negu vienas generavimo agregatas, įprastai yra naudojamas statinis turbinos reguliavimas, kuris keičia turbinos galią atsižvelgdamas į statinę dažnio-galios charakteristiką - proporcingai dažnio nuokrypiui, o galios tarp generavimo agregatų pasiskirto pagal kiekvieno iš jų statines dažnio - galios charakteristikas [14].

Kaip jau minėta anksčiau, turbinos reguliatorius dažniausiai būna PI tipo - proporcinis integralinis, tačiau galima rasti ir PID, bet jį sudėtingiau suderinti. Būtina parinkti tokius reguliatoriaus parametrus, kad sistemą veikiant apkrovoms būtų kuo mažesnis pereinamojo proceso laikas, švytavimas ir, kad pereinamieji procesai kuo mažiau priklausytų nuo generuojamo agregato parametrų (laiko pastoviosios, perdavimo koeficiento) [15].

2.1.4 Dažnio reguliavimas dviejų generatorių pagalba

Kai energetinėje sistemoje yra daugybė apkrovų, tai sistemos dažnis ir greičio reguliatoriaus charakteristikos priklauso nuo apkrovų kitimo. Sistemoje, kurioje nereikia palaikyti pastovaus dažnio, operatorius nereikalauja pakeisti generatoriaus nustatymų. Tačiau, jeigu reikalingas dažnio išlaikymas, kaip konstanta - operatorius gali jį palaikyti reguliuodamas turbinos greitį t.y pakeičiant reguliatoriaus charakteristikas. Jei apkrovos palaikomos dviejų generatorių dirbant lygiagrečiai, tada susidaro sudėtingesnis sistemos valdymas. Sistemoje tarp dviejų generatorių galimi šie reguliavimai:

- Tiesioginis dažnio reguliavimas;

Tokioje sistemoje generatoriai sujungti vienas su kitu tiesiogine linija. Įvykus apkrovos kitimui vienas iš generatorių reguliuoja dažnį iki numatyto dydžio.

- Lygiagretus dažnio reguliavimas;

Apkrovos pasidalina tarp abiejų generatorių t.y generatoriai reguliuoja generuojamą galią iki nustatyto vardinio dažnio.

- Tiesioginis linijos apkrovimo reguliavimas;

Į tam tikro rajono dažnio kitimą reaguoja tik to rajono generatorius, kartu stengdamasis išlaikyti linijos apkrovimą.

- Selektyvus dažnio reguliavimas;

Tai toks reguliavimas, kai kiekvienas generavimo šaltinis palaiko tik savo rajono apkrovą, nekreipdamas dėmesio į kitų rajonų apkrovimus.

- Linijų apkrovos reguliavimas.

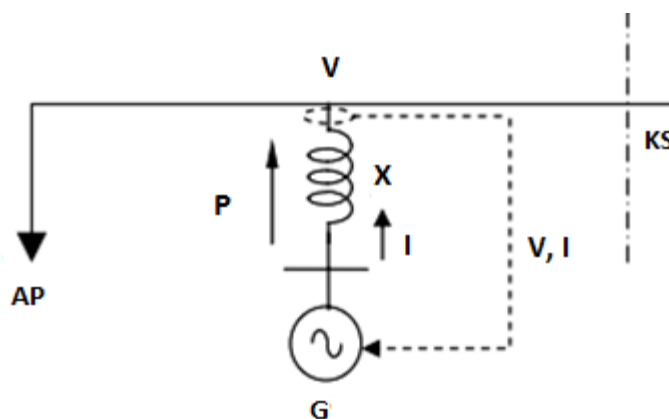
Sistemos dažnis kontroliuojamas bendrai visų generavimo šaltinių esančių sistemoje, nesvarbu kuriame rajone jis pakito [16].

2.1.5 Mikrotinklo energijos šaltinių valdymo režimai

Veikiant sistemai izoliuotai nuo energetinės sistemos, galios balansui palaikyti mokslininkų aprašomi žemiau išvardinti energijos šaltinių valdymo režimai:

- Galios valdymo režimas;

Veikiant šiuo režimu kontroliuojama energijos šaltinio įtampa ir galia. Aktyvioji galia (P) energijos šaltinio (G) suteikiama sistemai, priklausomai nuo matavimų įtampos (V) prijungimo taške su fiderine linija ir įrenginio generuojamos srovės (I) (2.2 pav.). Padidėjus apkrovai (AP) mikrotinkle veikiančiame su išorine energetine sistema, galia kompensuojama išorinio tinklo, kol vietinio generuojamo šaltinio tiekiamą galia sureguliuojama iki reikiamo dydžio. Energetinei sistemai veikiant salos režimu, vietinės sistemos galios ir dažnio kontroliavimo funkcijos pagalba užtikrinamas galių balansas [17].

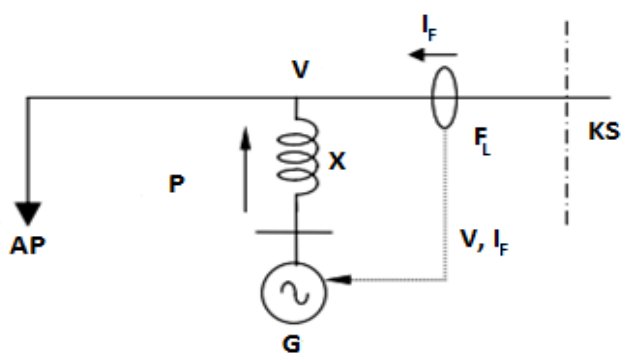


2.2 pav. Galios valdymo režimo schema: AP - apkrova; G - energijos generavimo šaltinis; V - įtampa; I - srovė; KS - kita sistemos dalis; P - generuojama galia [17].

- Galios srauto valdymo režimas;

Šioje konfigūracijoje kontroliuojama energijos šaltinio įtampa ir galios srautas fideryje. Aktyvioji galia (P) energijos šaltinio (G) tiekiamą apkrovai (AP), pagal matavimus įtampos (V)

įrenginio prijungimo taške ir galios srautą linijoje (F_L) (žr. 2.3 pav.). Veikiant minėtam režimui mikrotinklo apkrovos galios paklausa aprūpinama vietinio energijos šaltinio. Salos veikimo režimu, fiderio galios srauto ir dažnio kontroliavimo funkcija užtikrina galios balansą [17].



2.3 pav. Galios srauto valdymo režimo schema: AP - apkrova; G - energijos generavimo šaltinis; V - įtampa; I_F - linijos srovė; F_L - galios srautas iš tinklo; KS - kita sistemos dalis; P - energijos šaltinio generuojama galia [17].

- Mišrus valdymo režimas.

Esant šiam režimui, kai kurie energijos šaltiniai reguliuoja išėjimo galią, kol kiti reguliuoja galių srautą fideryje. Tas pats įrenginys gali kontroliuoti įrenginio galią arba galios srautą fideryje, priklausomai nuo poreikio. Ši konfigūracija pati efektyviausia, nes galios srautas iš tinklo lieka pastovus nepriklausomai nuo mikrotinkle kintančių apkrovų [17].

2.2 Apkrovų nustatymas

Gamyklos sistemos apkrovų įvertinimui ir jų kitimo tendencijai nustatyti parinktos šios priemonės:

- Statistinis apkrovų nustatymo metodas;
- Energijos apskaitos programa „Energijos apskaita“;
- Normalinis skirstinio dėsnis.

Elektros energetinėse sistemose, praktikoje, apkrovų nustatymui naudojami trys statistiniai metodai:[18]

- Ekstrapoliavimo;
- Simuliavimo;
- Ekonometrinis.

Šiame darbe orientacinėms apkrovoms nustatyti pasirinktas ekstrapoliavimo metodas. Šio metodo esmė, iš jau buvusių apkrovų, nustatyti apkrovų kitimo dėsnį. Pagrindinis šio metodo trūkumas tas, kad negalima įvertinti kokią įtaką prognozėms turi ekonominiai veiksniai. Kadangi

ekonominiai veiksniai šiame darbe nėra vertinami, tai pasirinktas metodas yra tinkamiausias siekiant nustatyti orientacines apkrovas ir jų kitimo tendenciją.

Maksimalios galios pokyčiams analizuoti naudojama gamykloje veikianti Lietuvos ir Rusijos įmonės „Sigma Telas“ sukurta moderni komercinės apskaitos programa „Energijos apskaita“. Žemiau pateikiamos šios programos sudėtinės dalys:

- Energija;
- Ryšys;
- RyšysCLI;
- Mnemo.

Šiame darbe naudojama tik viena minėtos programos dalis - „Energija“. Jos pagalba, gaunami maksimalios apkrovos galios pokyčiai iš archyvo, už praeitus metus. Taikant programinį paketą Matlab ir normalinį skirstinio dėsnį randama apkrovos dinamika.

Normalusis skirstinio dėsnis dar kitaip gali būti vadinamas Gauso skirstiniu ir priklauso normaliųjų skirstinių šeimai, kurie pasižymi šiomis savybėmis:

- medianos, modos ir vidurkio reikšmės sutampa;
- simetrijos ašis yra ties vidurkiu, o skirstinio tikimybių pasiskirstymo kreivė yra simetriška;
- skirstinio kreivės padėtis priklauso nuo vidurkio vietos skaičių ašyje;
- standartinis nuokrypis lemia skirstinio tikimybės pasiskirstymo kreivės plotį ir amplitudę;
- Pagal normalųjį skirstinį besibarstančių atsitiktinių dydžių suma taip pat yra dydis, besibarstantis pagal normalųjį skirstinį.

Normaliojo skirstinio tikimybių tankio funkcija:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}; \quad (2.3)$$

Čia:

μ - aritmetinis vidurkis;

σ - vidutinis kvadratinis nuokrypis;

Normaliojo skirstinio nuosavieji parametrai:

- Aritmetinis vidurkis (μ_x);
- Standartinis nuokrypis (σ_x);

Skirstinys aprašomas varpo formos kreive. Kreivė išsidėsčiusi virš x ašies ir yra simetriška statmenos tiesės atžvilgiu, einančios per vidurkį. Duomenų reikšmė šiame taške - tai skirstinio vidurkis ir mediana. Vidurkio ir medianos reikšmė viename taške gaunama dėl normaliosios kreivės simetriškumo.

Didžiausią reikšmę funkcija įgyja vidurkio taške μ_x . Grafiko persilenkimo taškų abscisės - $\mu_x + \sigma_x$ ir $\mu_x - \sigma_x$;

Atsitiktinio, normaliai pasiskirsčiusio dydžio patekimo į intervalus tikimybė:

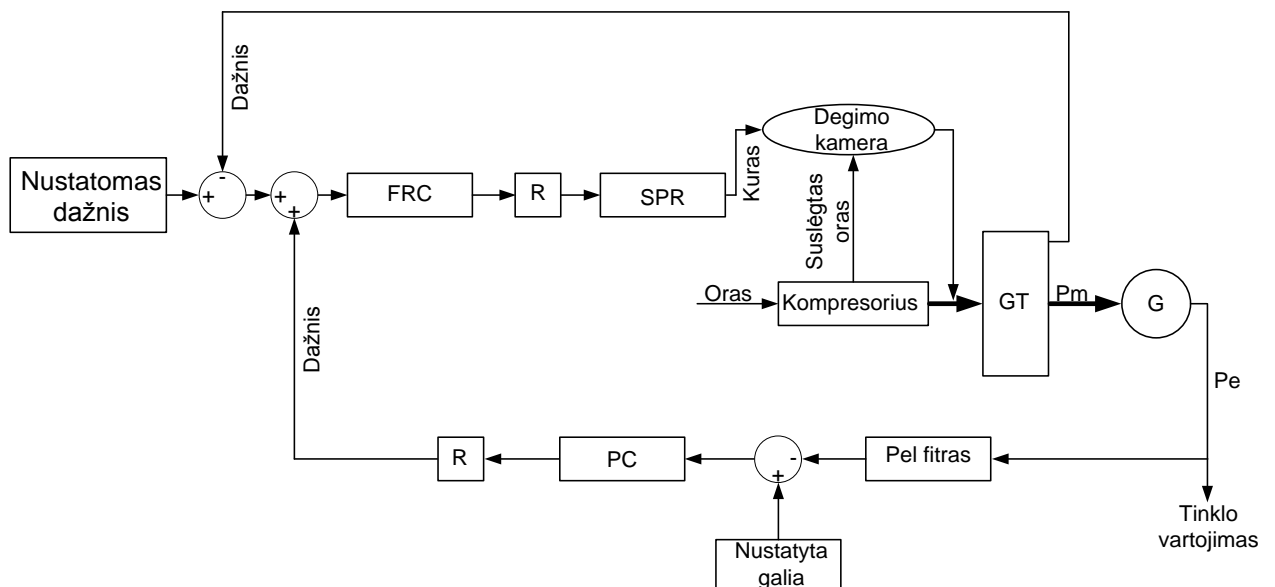
- į intervalą $[\mu - \sigma; \mu + \sigma]$ tikimybė 0,68;
- į intervalą $[\mu - 2\sigma; \mu + 2\sigma]$ tikimybė 0,95;
- į intervalą $[\mu - 3\sigma; \mu + 3\sigma]$ tikimybė 0,995.

Galima daryti išvadą, kad 99,5 proc. ploto po normaliąja kreive yra $\pm\sigma_x$ nuo centro. Todėl, jei kintamojo skirstinys normalus, tai iš esmės visos kintamojo reikšmės nuo centro nutolusios ne daugiau kaip 3σ atstumu [19].

2.3 Matematinio modelio sudarymas

Dujų turbina - tai toks rotorinis variklis, kuriame degimo produktų, susidarančių kurui degant degimo kameroje, potencinė energija transformuojama į kinetinę srauto energiją, panaudojama variklio rotoriumi ir kompresoriui sukuti [20].

2.4 paveiksle pateikta vieno veleno dujų turbinos SGT800B dažnio/apkrovos struktūrinė schema. Dažnio reguliatorius (FRC), servo pozicinis reguliatorius (SPR), galios reguliatorius (PC) yra pirminiai turbinos reguliatoriai, kurie atsakingi už sklاندų sistemos veikimą ir dažnio palaikymą sistemoje.

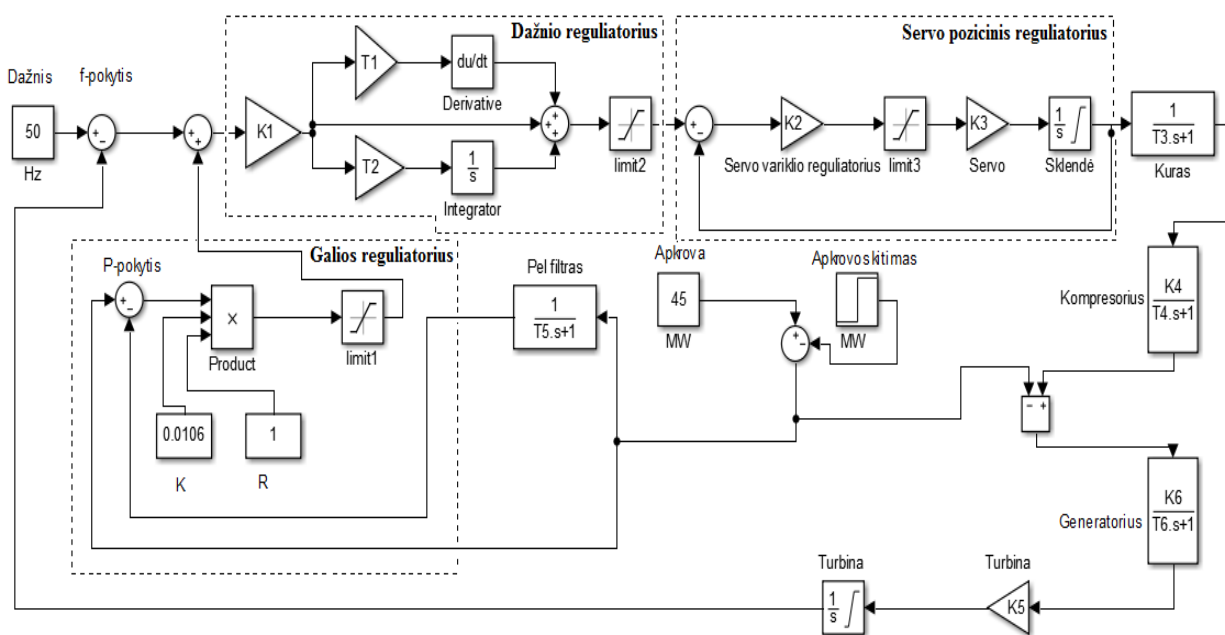


2.4 pav. Dujų turbinos SGT800B dažnio/apkrovos struktūrinė schema

Struktūrinėje schemoje pateiktų sutrumpinimų reikšmės:

- *FRC* (frequency controller) - dažnio reguliatorius;
- *SPR* (servo position controller) - servo pozicinis reguliatorius;
- *PC* (power controller) - galios reguliatorius;
- *R* (limit) - riba;
- P_m - mechaninė turbino galia;
- P_e - elektrinė generatoriaus galia;
- *GT* (gas turbine) - dujų turbina;
- *G* - generatorius.

Gamyklos dažnio reguliavimo sąlygų tyrimui, kintat apkrovai, naudojamas Matlab/Simulink programinis paketas. Šiuo paketu sumodeliuota dujų turbino SGT800B dažnio/apkrovos reguliavimo matematinio modelio struktūrinė schema, kuri pateikta 2.5 paveiksle, o modelio techninė specifikacija pateikta 3 priede 1 lentelėje.

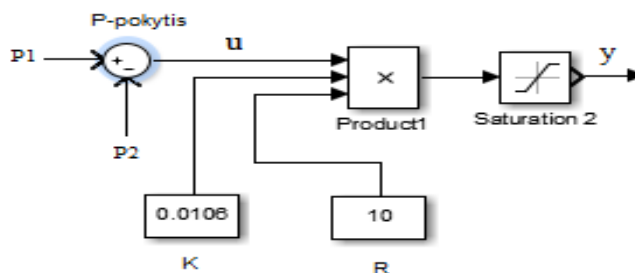


2.5 pav. Dujų turbino SGT800B matematinis modelis

Dujų turbino SGT800B sistemoje naudojami trys reguliatoriai:

- Galios reguliatorius (*PC*);
- Dažnio reguliatorius (*FRC*);
- Servo pozicinis reguliatorius (*SPR*).

Galios reguliatorius, pagal elektrinės galios pasikeitimą sistemoje, generuoja dažnio-galios charakteristikos signalą - proporcingai dažnio nuokrypiui, kuris perduodamas dažnio reguliavimo sistemai. Galios reguliatoriaus struktūrinė schema pateikta 2.6 paveiksle.

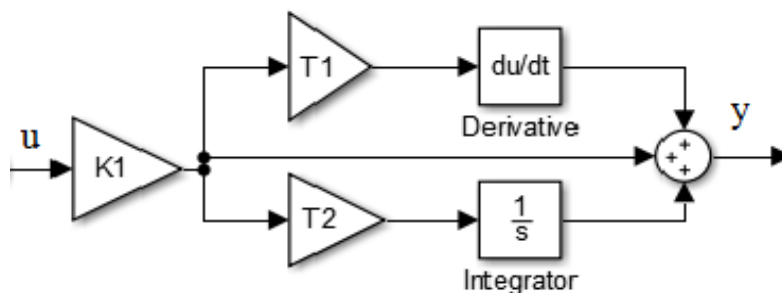


2.6 pav. Galios reguliatoriaus struktūrinė schema: $P1$ - generuojama galia; $P2$ – vartojama galia; K - galios reguliavimo koeficientas; R - galios reguliavimas, %; u - įėjimo signalas; y - išėjimo signalas.

Galios reguliatoriaus perdavimo funkcija:

$$W(s) = \frac{0.0106}{0.3s + 1}; \quad (2.4)$$

PID veikimo dėsnio dažnio reguliatorius nustato turbinos sukimosi dažnio signalą ir perduoda kuro sklendės valdymo sistemai - servo poziciniam reguliatoriui. Dažnio reguliatoriaus struktūrinė schema pateikta 2.7 paveiksle.

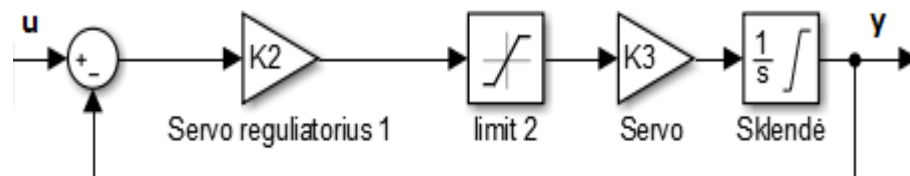


2.7 pav. Dažnio reguliatoriaus struktūrinė schema: $K1$ - signalo stiprinimo koeficientas; $T1$ - diferencijavimo laiko pastovioji, $T2$ - integravimo laiko pastovioji; u - įėjimo signalas; y - išėjimo signalas.

Dažnio reguliatoriaus perdavimo funkcija:

$$W(s) = \frac{110s + 22}{5}; \quad (2.5)$$

Kuro tiekimas į sistemą reguliuojamas sklendės padėtimi, kurią reguliuoja servo pozicinis reguliatorius. Jis nustato esamą sklendės signalą ar poziciją grįžtamuju ryšiu. Pasiųstas sklendės valdymo signalas lyginamas su esama sklendės pozicija ir, jeigu gaunami nesutapimai tarp norimos ir esamos sklendės padėties, reguliatoriaus pagalba sureguliuojami. Gamyklos sistemos kuro sklendės valdymo struktūrinė schema pateikta 2.8 paveiksle.

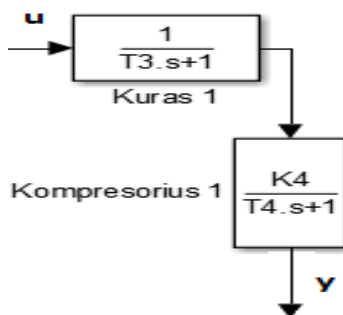


2.8 pav. Kuro sklendės valdymo struktūrinė schema: $K2$ - servo reguliatoriaus signalo stiprinimas; $K3$ - servo stiprinimo signalas; u - įėjimo signalas; y - išėjimo signalas.

Servo pozicinio reguliatoriaus perdavimo funkcija:

$$W(s) = \frac{33}{s + 33}; \quad (2.6)$$

Kuro ir oro mišinys suspaudžiamas kompresoriumi ir deginamas. Aukšto slėgio deginimo produktais suteikiama mechaninė galia dujų turbinai, kuri suka elektros generatorių. Kuro ir kompresoriaus struktūrinės schemos dalys pateiktos 2.9 paveiksle.

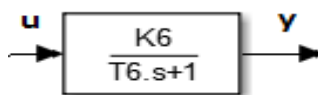


2.9 pav. Kuro ir kompresoriaus struktūrinės schemos dalys: $T3$ - kuro sistemos laiko pastovioji; $K4$ - kompresoriaus stiprinimo koeficientas; $T4$ - kompresoriaus laiko pastovioji; u - įėjimo signalas; y - išėjimo signalas.

Bendra kuro ir kompresoriaus perdavimo funkcija užrašoma:

$$W(s) = \frac{0,53}{0,04s^2 + 05s + 1}; \quad (2.7)$$

Gamyklos generatoriaus G-1 (47MW) struktūrinės schemos dalis pateikta 2.10 paveiksle.

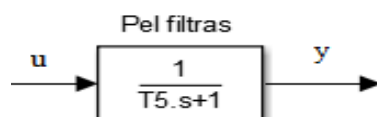


2.10 pav. Generatoriaus *G-1* struktūrinės schemos dalis: *K6* - stiprinimo koeficientas; *T6* - generatoriaus laiko pastovioji; *u* - įėjimo signalas; *y* - išėjimo signalas.

Generatoriaus perdavimo funkcija užrašoma:

$$W(s) = \frac{1,196}{12,78s + 1}; \quad (2.8)$$

Elektrinės galios pokyčio struktūrinės schemos dalis pateikta 2.11 paveiksle.



2.11 pav. Elektrinės galios pokyčio struktūrinės schemos dalis: *T5* - turbinos laiko pastovioji; *u* - įėjimo signalas; *y* - išėjimo signalas.

Elektrinės galios pokyčio perdavimo funkcija užrašoma:

$$W(s) = \frac{1}{0,3s + 1}; \quad (2.9)$$

Turbinos sukimosi dažnio integravimo struktūrinės schemos dalis pateikta 2.12 paveiksle.



2.12 pav. Turbinos sukimosi dažnio integravimo struktūrinės schemos dalis: *K5* - stiprinimo koeficientas; *u* - įėjimo signalas; *y* - išėjimo signalas.

Turbinos dažnio integravimo perdavimo funkcija užrašoma:

$$W(s) = \frac{0,083}{s}; \quad (2.10)$$

Dujų turbinos SGT800B uždaros sistemos perdavimo funkcija:

$$W(s) = \frac{57,59s^2 + 202,4s + 38,29}{0,06s^6 + 3,697s^5 + 72,8s^4 + 588,8s^3 + 1973s^2 + 2311s + 38,29}; \quad (2.11)$$

2.4 PID regulatoriaus derinimo metodų parinkimas

Tinkamai parinkti regulatoriaus parametrai, gali minimizuoti galios ir dažnio nuokrypius izoliuotoje sistemoje, taip užtikrinant reguliavimo kokybę.

Reguliavimo kokybe galima užtikrinti technologinį režimo tikslumą ir ekonominį efektyvumą [21].

Energetinėse sistemose, kuriose reikalingas tikslus valdymas ir greitas atsakas į didelių apkrovų kitimą, dažniausiai yra naudojamas reguliatorius su PID reguliavimo dėsnium. Regulatoriaus tikslas, generuojant tinkamus valdymo signalus, reguliuoti energijos šaltinio galią, taip sumažinant dažnio nukrypimą nuo vardinės reikšmės [22].

Reguliatorius su PID reguliavimo dėsnium matematiškai užrašomas taip:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right]; \quad (2.12)$$

Čia:

$r(t)$ - norimas signalas;

$u(t)$ - valdymo signalas;

K_p - proporcinės grandies koeficientas;

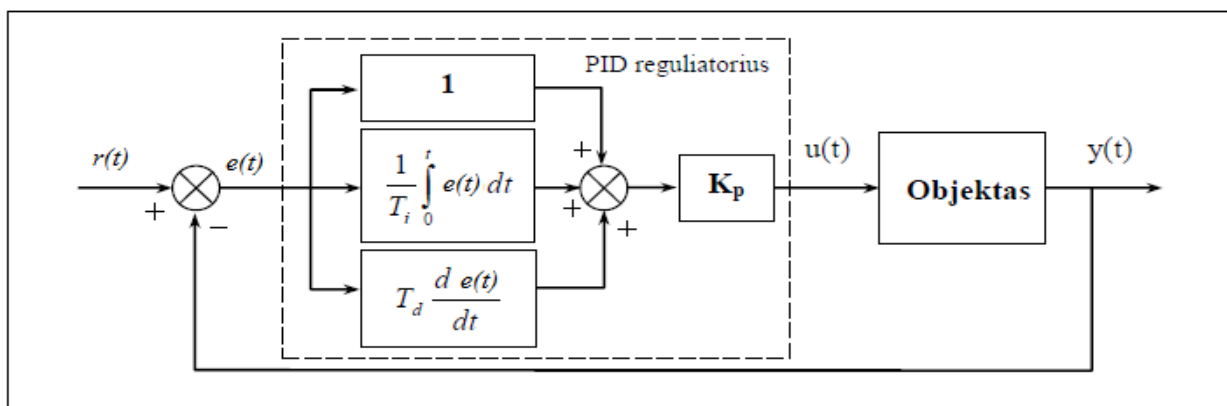
$e(t)$ - valdymo paklaida;

T_I - integravimo laiko pastovioji;

T_D - diferencijavimo laiko pastovioji;

Valdymo paklaida $e(t) =$ norimas signalas $r(t)$ - išėjimo signalas $y(t)$.

Valdymo sistemą su PID reguliatoriumi galima pavaizduoti blokine schema, kuri pateikta 2.13 paveiksle.



2.13 paveikslas. PID reguliatoriaus blokinė schema [23]

PID reguliatorius perdavimo funkcija užrašomas:

$$K(s) = Kp \left[1 + \frac{1}{T_I(s)} + T_D(s) \right] ; \quad (2.13)$$

Čia:

s - kompleksinis kintamasis;

T_I - integravimo laiko pastovioji;

T_D - diferencijavimo laiko pastovioji.

Klasikinį PID reguliatorių sudaro trys grandys:

- Proporcinė (P);
- Integravimo (I);
- Diferencijavimo (D).

Kiekviena grandis nusakoma skirtinga valdymo signalo priklausomybe nuo valdymo paklaidos:

Proporcinė grandis - apibūdina valdymo signalo $u(t)$ proporcingumą valdymo paklaidai $e(t)$. Jeigu paklaidos signalas didelis, tai ir valdymo signalas didelis. Jeigu paklaidos signalas mažas, tai ir valdymo signalas mažas. Proporcinės grandies perdavimo koeficientu K_p , galima didinti sistemos atsaką, tačiau procesą reikia atidžiai stebėti, nes per didelis perdavimo koeficientas išveda sistemą iš stabilumo ribos t.y proceso signalas pradeda svyruoti.

Integravimo grandis - nusako valdymo signalo $u(t)$ priklausomybę, nuo valdymo paklaidos $e(t)$ kaupimosi. Ši grandis skirta privesti valdymo paklaidą prie nulio. Esant nors ir mažai paklaidai integralinis koeficientas K_I didėja, kol privedama valdymo paklaida prie nulio.

Diferencijavimo grandis - nusako valdymo signalo $u(t)$ priklausomybę, nuo valdymo paklaidos $e(t)$ kitimo greičio. Jeigu paklaida kinta greitai, tai valdymo signalas didelis ir atvirkščiai, kintant valdymo paklaidai lėtai, valdymo signalas mažas [23].

Optimaliausias PID reguliatoriaus veikimas gaunamas teisingai parinkus proporcinį K_p , integralinį K_I ir diferencinį K_D perdavimo koeficientą [24].

Kalbant apie atskiras reguliatoriaus grandines reikėtų paminėti, kad proporcinis perdavimo koeficientas K_p mažina, bet nepanaikina valdymo paklaidos ir gali sumažinti signalo atsako kilimo laiką, o integralinis koeficientas K_I panaikina valdymo paklaidą, tačiau patį sistemos laikiną atsaką padaro lėtesniu. Tuo tarpu diferencinis koeficientas K_D gali padidinti sistemos stabilumą, panaikindamas signalo viršijimą ir pagerindamas laikiną signalo atsaką. PID reguliatoriaus koeficientų didinimo įtaka sistemos atsako signalui pateikta 2.1 lentelėje [24].

2.1 lentelė. PID koeficientų įtaka sistemos atsako signalui [24]

Koeficiento didinimas	Signalų kilimo laikas	Norimo signalo viršijimas	Signalų nusistovėjimo laikas	Klaidos signalo vertė
K_p	Mažėja	Didėja	Mažai keičiasi	Mažėja
K_I	Mažėja	Didėja	Didėja	Panaikina
K_D	Mažai keičiasi	Mažėja	Mažėja	Nesikeičia

Čia:

K_p - proporcingumo koeficientas;

K_I - integravimo koeficientas;

K_D - diferencijavimo koeficientas.

Sistemos reguliavimo kokybė priklauso nuo parinktų parametrų minėtose grandyse. Derinimo parametrų parinkti yra naudojami įvairiausi inžineriniai parametrų derinimo metodai.

PID reguliavimo dėsnio reguliatorius turi tik tris derinimo parametrus, tačiau nėra lengva be sistemingos procedūros juos surasti. Mokslinėje literatūroje galima rasti pastebėjimų, jog gamybos įmonių praktikoje, dauguma naudojamų PID reguliatorių, yra blogai suderinti. Todėl yra rekomenduojama reguliatorių derinimo parametrų metodus pasirinkti pagal šiuos kriterijus:

- Metodus turi būti gerai motyvuotas;
- Tinkamas derinimui daugelyje technologinių procesų.

Vadovaujantis šiais kriterijais, šiame skyriuje, apžvelgiami du pasirinkti - Ziegler-Nichols, Tyreus-Luyben uždarai sistemai skirti parametų derinimo metodai, kurie vadovaujami pereinamojo proceso analize.

Ziegler-Nichols uždarai sistemai skirtas regulatoriaus parametų parinkimo metodas, plačiai žinomas, kaip gana tikslus euristinis metodas, kuriuo galima nustatyti gerus regulatorių P, PI ir PID derinimo parametrus, daugelyje technologinių procesų. Derinimo metu procesas valdomas arti nestabilumo ribos, stebint perdavimo koeficiento kritinę reikšmę k_r ir švytavimo periodą T .

Derinimo atlikimo seka:

1. Regulatorius sujungiamas su valdomu procesu, paliekant dirbti pagal proporcinį (P) dėsnį. Integralinis ir diferencijalinis koeficientai prilyginami nuliui.
2. Didinamas proporcinis perdavimo koeficientas, kol uždaroje sistemoje įgaunamas nusistovėjęs švytavimas. Taip surandama kritinė perdavimo reikšmė k_r ir svyravimo periodo T vertė.
3. Taikant Ziegler-Nichols parametų derinimo formules uždarai sistemai, kurios pateiktos 2.2 lentelėje, randami regulatoriaus derinimo parametrai.

2.2 lentelė. Ziegler-Nichols parametų derinimo formulės uždarai sistemai [25]

Reguliavimo dėsnis	Regulatoriaus derinimo parametrai		
	K_p	T_i	T_d
P	$0,50*k_r$	-	-
PI	$0,45*k_r$	$T/1,2$	-
PID	$0,6*k_r$	$0,50*T$	$T/8$

Čia:

k_r - kritinė perdavimo funkcija;

T - nusistovėjusio švytavimo svyravimo periodas;

T_i - integravimo laiko pastovioji;

T_d – diferencijavimo laiko pastovioji.

Tyreus-Luyben regulatoriaus parametų derinimo atlikimo procedūra panaši į anksčiau aprašyto Ziegler-Nichols uždaros sistemos parametų paieškos atlikimo metodą. Tačiau šiuo metodu galima rasti tik regulatorių PI ir PID derinimo parametrus. Derinimo parametrai randami, pagal 2.3 lentelėje derinimo formules, valdant procesą arti nestabilumo ribos ir stebint perdavimo koeficiento kritinę reikšmę k_r ir švytavimo periodą T .

2.3 lentelė. Tyreus-Luyben parametrų derinimo formulės uždarai sistemai [25].

Reguliavimo dėsnis	Regulatoriaus derinimo parametrai		
	K_p	T_i	T_d
PI	$k_r / 3,2$	$2,2 * T$	-
PID	$k_r / 3,2$	$2,2 * T$	$T / 6,3$

Čia :

k_r - kritinė perdavimo funkcija;

T - nusistovėjusio švytavimo svyravimo periodas;

T_i - integravimo laiko pastovioji;

T_d – diferencijavimo laiko pastovioji.

3. GAMYKLOS MIKROTINKLO TYRIMAS

3.1 Gamyklos mikrotinklo charakteristikų tyrimas

Šiame poskyryje pateikiama gamyklos sistemos veikimo analizė. Įvertinama 110 kv elektros tinklo schema specifika. Statistiniu ekstrapoliavimo metodu nustatoma orientacinė skaičiuojamoji apkrova ir jos kitimo tendencija. Komercinės apskaitos programos, „Energijos apskaita“, sukauptais maksimalios galios pokyčiais, nubraižomas maksimalių apkrovų grafikas. Statistiniu duomenų apdorojimu - apskaičiuojant elektrinės galios vidurkį ir standartinį nuokrypį, įvertinami galimi gamyklos vartojamos galios pasikeitimai.

3.1.1 Gamyklos elektros tinklo schema

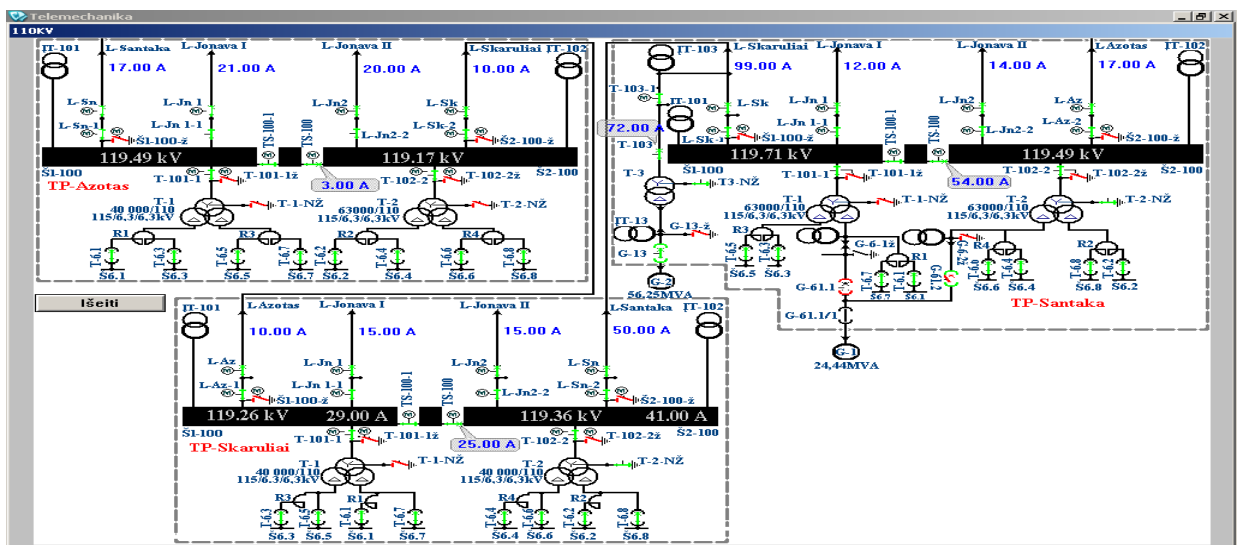
Gamyklos energetinė sistema sudaryta iš trijų TP-Azotas, TP-Santaka ir TP-Skaruliai pagrindinių transformatorinių pastočių rajonų. Kiekviename rajone yra po du 110/6 kV transformatorius su skeltomis 6 kV apvijomis. Pastotės transformatorius jungia šešios atskiros 110 kV linijos, su Kauno apskrities skyriaus aptarnavimo zonoje esančia Jonavos 330/110/10 kV transformatorine pastote. Į minėtus gamyklos rajonus elektros energija, taip pat perduodama 6 kV kabeliais iš elektros energijos skyriaus. Nuosavybės ribas tarp perdavimo tinklų operatoriaus ir bendrovės reglamentuoja eksploatavimo aktai.

Gamyklos TP-Skaruliai T-2, TP-Santaka T-2 110/6 kV ir TP-Santaka T-3 110/10,5 kV transformatorių neutralės yra pastoviai įžemintos, o TP-Azotas T-1, TP-Azotas T-2, TP-Skaruliai T-1 ir TP-Santaka T-1 110/6kV transformatorių neutralės atjungtos. Neutralė prijungiama tik 110 kV įtampos prijungimo ar atjungimo laiku.

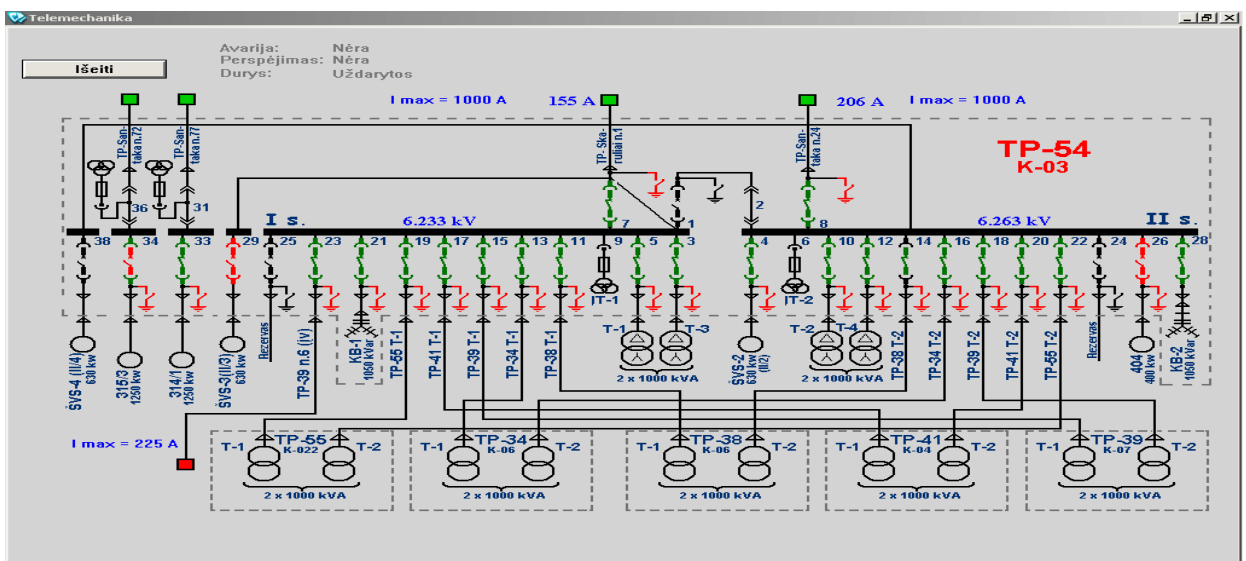
TP-Skarulių pastotėje transformatorių išvadas per viengubą reaktorių prijungtas prie vieno šynų, o prie kitų tiesiogiai. TP-Azoto ir TP-Santakos pastotėse transformatorių išvadas per skeltą reaktorių prijungtas prie dviejų šynų.

Gamykloje kiekvienas 110/6 kV rajonas turi dvi ryšio linijas su skirtingais rajonais, taip sudaromas 110kV žiedinis tinklas. Normaliu darbo režimu gamykla dirba žiede, su prijungtu generatoriumi G-2 ir prisijungus prie energetinės sistemos, tačiau įvykus gedimui yra galimybė atsiskirti nuo energetinės sistemos t.y dirbti salos režimu. 110kV gamyklos pastotės schema pateikta 3.1 paveiksle.

6 kV elektros tinklas yra spindulinis su galimybe sekcijinio jungtuvo pagalba automatiškai persijungti iš kito 110/6 kV pastotės transformatoriaus. Taip pat 6 kV skirstyklos turi ryšius ne mažiau kaip su dviem 6 kV pastotėmis, o 6/0,4 kV transformatoriai maitinami iš skirtingų 6 kV šynų sekcijų (3.2 paveikslas).



3.1 pav. Gamyklos 110kV schema



3.2 pav. Gamyklos 6kV schema

3.1.2 Apkrovų kitimo įvertinimas

AB „Achema“ energetinę sistemą sudaro didelis kiekis skirtingo pobūdžio elektros energijos vartotojų. Energetinės sistemos skaičiuojamosios apkrovos ir jos kitimo tendencijai nustatyti naudojamas statistinis ekstrapoliavimo metodas.

Remiantis 2016 metų komercinės apskaitos „Energinės apskaita“ sukauptais elektrinės maksimalios galios pokyčiais gamykloje (2 priedas 1 lentelė), gaunamas maksimalių apkrovų grafikas (2 priedas 1 paveikslas) iš kurio matyti, kad didžiausia 2016 metų apkrova yra 59,466 MW. Ši apkrova laikoma, kaip orientacinė skaičiuojamoji gamyklos apkrova.

Kadangi gamykloje yra du generatoriai G-1 (47.5 MW) ir G-2 (21 MW), kurių instaliuota suminė galia yra 68,5 MW, vadinasi gamykla galėtų pilnai padengti savo energetinės sistemos galios poreikį 59,466 MW atsijungus nuo išorinės energetinės sistemos, tikrai veikiant abiem gamyklos generatoriams.

Gamyklos galimi vartojamos galios pasikeitimai įvertinami statistiniu duomenų apdorojimu - apskaičiuojant elektrinės galios vidurkį (3.1) ir standartinį nuokrypį (3.2). Nubraižomas vartojamos maksimalios aktyviosios galios normaliojo skirstinio grafikas, kuris pateiktas 3.3 paveiksle.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n x_i ; \quad (3.1)$$

Čia:

\bar{x} - maksimalios aktyviosios galios vidurkis;

x_i - išmatuota galios reikšmė;

n - matavimų skaičius.

Vartojamos maksimalios aktyviosios galios vidurkis gautas Matlab programos kodo pagalba, kuris pateiktas 1 priede:

$$\bar{x} = 53,386 \text{ MW}.$$

Vartojamos maksimalios aktyviosios galios standartinis nuokrypis:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}; \quad (3.2)$$

Čia:

\bar{x} - maksimalios aktyviosios galios vidurkis;

δ - dispersija;

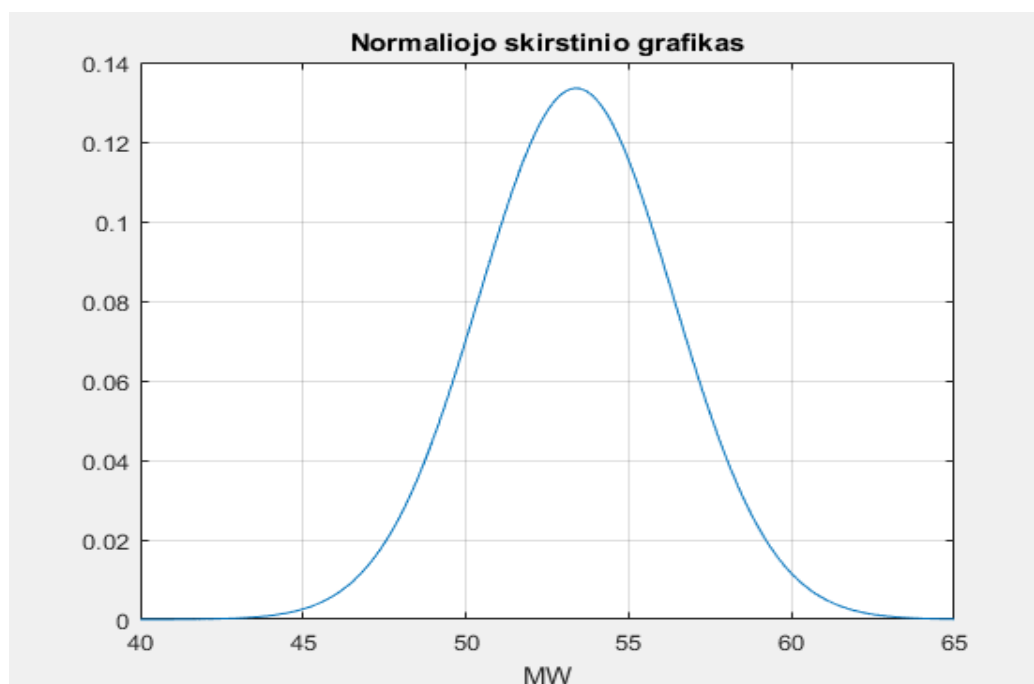
x_i - išmatuota galios reikšmė;

n - matavimų skaičius.

Gautas rezultatas Matlab programos kodo pagalba, kuris pateiktas 1 priede:

$$\delta = 2,9885 \text{ MW.}$$

Tyrimo rezultatais nustatyta, kad labiausiai tikėtinas maksimalios apkrovos nukrypimas nuo vidurkio yra 2,9885 MW.



3.3 pav. Vartojamos maksimalios aktyvios galios normaliojo skirstinio grafikas

Iš 3.3 paveiksle pateikto normaliojo skirstinio grafiko matome maksimalios aktyvios galios pasiskirstimą. Vidutinė maksimalios galios apkrovos reikšmė 53,386 MW.

Kadangi vidutinė vartojama maksimalios aktyvios galios metinė apkrova yra 53,386 MW, tai sistema norėdama veikti autonomišku režimu privalėtų didesnę laiko dalį naudoti abu generavimo šaltinius. Naudojant abu generavimo šaltinius ir esant tokiam gamyklos apkrovimui būtų pilnai neišnaudojami generuojamų agregatų pajėgumai, kas ekonomiškai būtų nenaudinga. Todėl gamyklai, būtų naudinga turėti kelis mažesnius generavimo šaltinius, kurie veiktų pagal skirtingą apkrovų poreikį.

3.1.3 Elektros energijos nuostolių valdymas

Elektros energijos nuostoliai gamyklos 6 kV elektros tinkle mažinami reguliuojant įtampą, vadovaujantis „Elektrinių ir elektros tinklų eksploatavimo taisyklių“ reikalavimais. Darbo įtampa toliausiai nutolusiems vartotojams turi būti ne žemesnė kaip 6 kV.

Telemechanikos pagalba įtampos dydžių reikšmės nuolatos stebimos pamainos inžinieriaus dispečeriniame valdymo centre, įtampų stebėjimo lange (3.4 paveikslas). Pastebėjęs žemesnę

įtampą negu 6 kV pamainos inžinierius inovacinėmis priemonėmis reguliuoja įtampą, perjungia 110/6 kV transformatorių atšakas arba nurodo operatyviniui darbuotojui reguliuoti įtampą rankiniu būdu.



3.4 pav. Įtampų stebėjimo langas

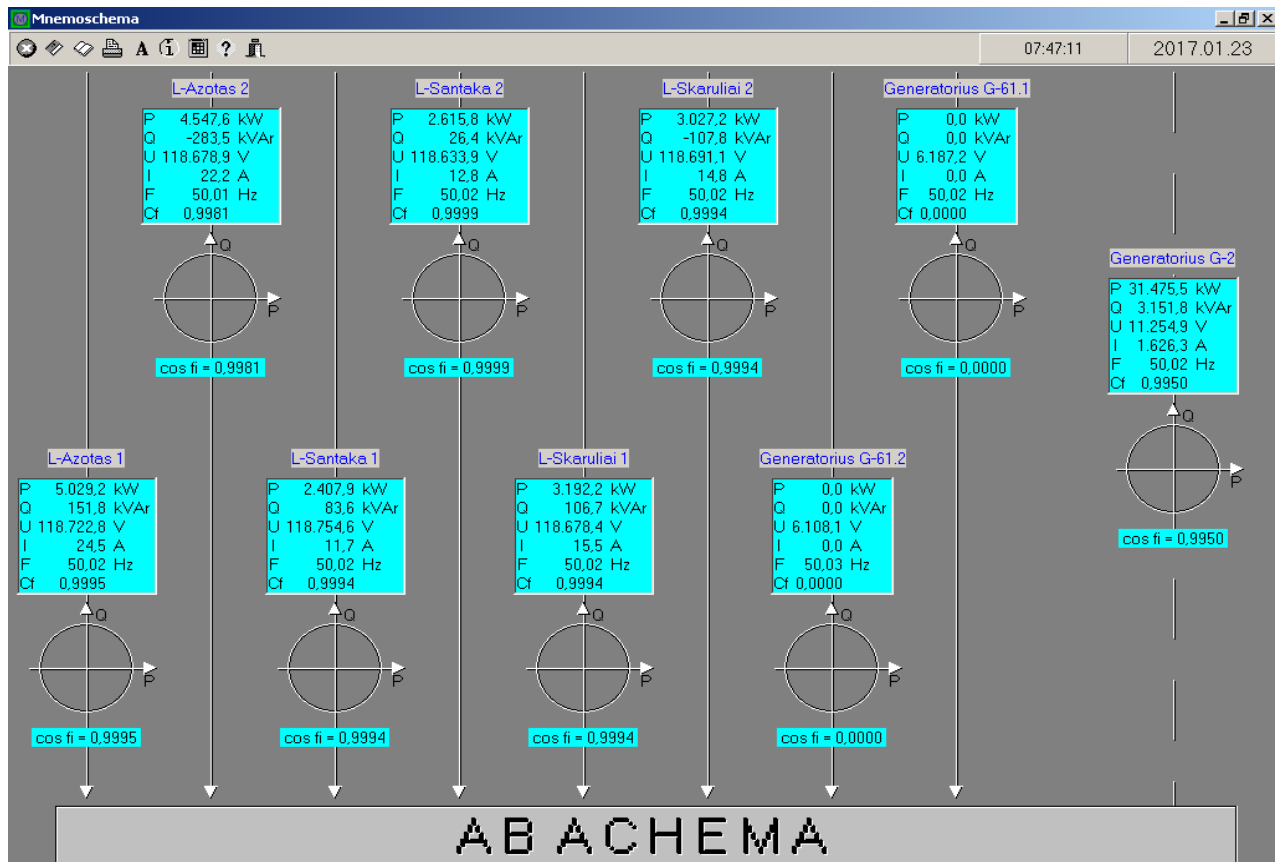
3.1.4 Reaktyvios ir aktyvios galios valdymas

Gamyklos sistemoje nuolatos vyksta aktyvios ir reaktyvios galios stebėjimas ir valdymas. Reaktyvioji galia valdoma, pagal komercinės apskaitos rodmenis (3.5 paveikslas) reguliuojant transformatorių esančių TP - Azotas, TP - Skaruliai ir TP - Santaka reaktyvios energijos balansą. Valdymas atliekamas telemehanikos pagalba junginėjant kondensatorių baterijas, arba reguliuojant generatoriaus ir gamybinių cechų elektros variklių žadinimą.

Bendrovės sunaudota ir atiduota reaktyvioji energija, pagal komercinės apskaitos rodmenis nuolatos stebima pamainos inžinieriaus. Pakitus kuriame nors iš rajonų momentinei reaktyvios galios reikšmei, pamainos inžinierius telemehanikos pagalba valdo kondensatorių baterijas. Tačiau esant būtinumui, kai kondensatorinėmis baterijomis neužtenka pareguliuoti reaktyvios galios, duoda nurodymą EGC (elektros gamybos cechui) pareguliuoti generatorių, o gamybiniams cechams pareguliuoti sinchroninių elektros variklių žadinimą. Pamainos inžinierius stengiasi sureguliuoti rekyviają galią, taip kad bendrovės sunaudotos ir atiduotos reaktyviosios energijos balansas būtų artimas 0.

Generuojama ir sunaudojama aktyvioji galia bendrovėje, stebima pamainos inžinieriaus, pagal pagrindinių transformatorinių pastočių rajonų ir generatorių elektros energijos apskaitos sistemos rodmenis. Naudojama aktyvioji galia iš sistemos neturi viršyti tai dienai suplanuotos.

Jeigu viršijamas suplanuotas aktyvios galios vartojimas, pamainos inžinierius turi pranešti vyriausiai gamyklos dispečerei ir informuoti elektros energijos tiekėją elektroniniu paštu.



3.5 pav. Elektros apskaitos programa

3.1.5 Dažnio reguliavimas gamyklos mikrotinkle

Veikiant gamyklai normaliu darbo režimu t.y sudarytas 110 kV žiedas tarp TP-Azotas, TP-Santaka ir TP-Skaruliai rajonų ir prijungtas generatorius G-2, sistemoje palaikomas dažnis priklauso nuo išorinės energetinės sistemos dažnio. Įvykus gedimui Jonavos 330/110 kV TP t.y atsijungus TP-Azotas, TP-Santaka ir TP-Skaruliai jungtuvams L-Jn1 ir L-Jn2 (3.1 paveikslas) gamyklos energetinė sistema pereina į salos režimą. Veikiant sistemai salos režime galios nukrypimus kompensuoja generatoriaus G-2 greičio reguliatorius, kuris padeda stabilizuoti dažnį ir atkuria galių balansą. Gamykloje taikomi ADN (automatinis dažnio nukrovimo) įrenginiai, kurie neleidžia dažniui nukristi žemiau nustatyto lygio. Šie įrenginiai užtikrina, kad nesustotų generatorius G-2 t.y sistemos dažnis nekristų žemiau 45 Hz. Dažninis nukrovimas vykdomas tam tikromis porcijomis - pradžia atjungiant 0.4 kV nesvarbius vartotojus.

3.2 Dažnio reguliatoriaus derinimo parametrų parinkimas

Šiame poskyryje atliekamas dažnio reguliatoriaus parametrų parinkimas, naudojantis ankstesniame skyriuje, Matlab/Simulink programos paketo pagalba, sudarytu gamyklos pagrindinės struktūros modeliu. Dažnio reguliatoriui pritaikomi gamintojo rekomenduojami, ir Ziegler - Nichols, Tyreus - Luyben derinimo metodais apskaičiuoti parametrai. Atliekamas skirtingu būdu gautų rezultatų palyginimas ir optimaliausių parametrų parinkimas.

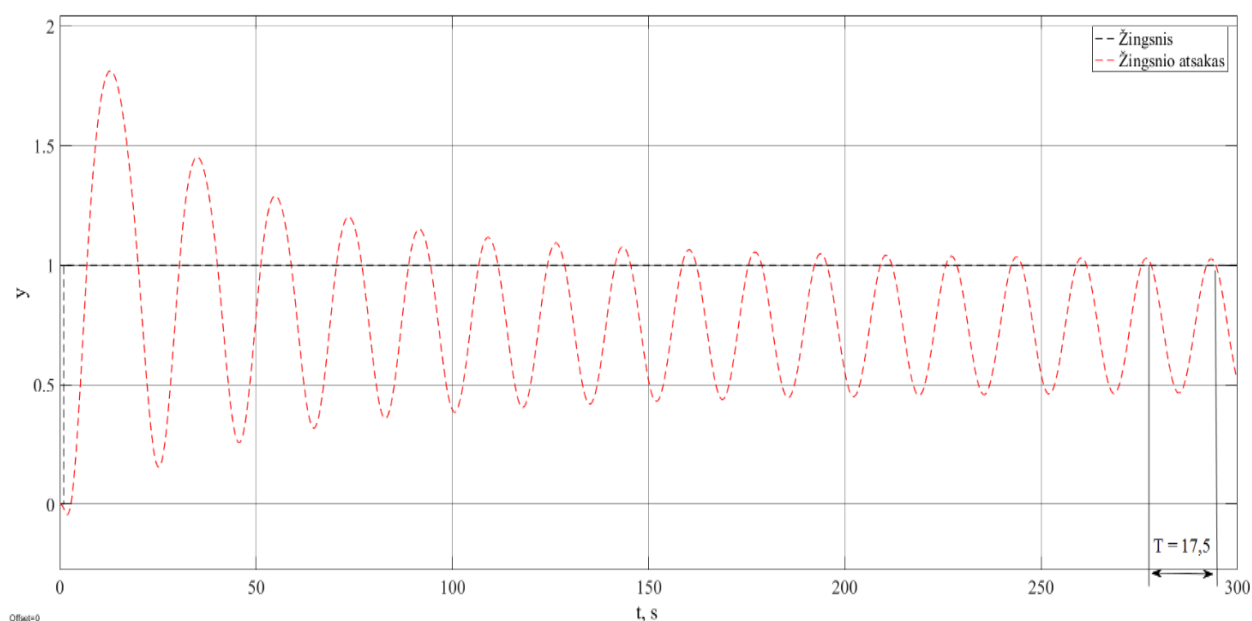
Tyrimo metu, didžiausias dėmesys kreipiamas į dažnio reguliavimo pereinamąjį procesą prie skirtingų apkrovos pokyčių sistemoje. Daroma prielaida, kad gamykla dirba nusistovėjusiu režimu atsijungus nuo energetinės sistemos.

Dažnio reguliatoriui, kuris yra PID veikimo dėsnio, optimalūs derinimo parametrai parenkami vadovaujantis dažnio reguliavimo pereinamojo proceso rodikliais:

- Dažnio maksimali dinaminė nuokrypa;
- Laikas, kai sistema pasiekia pirmą dažnio kitimo piką;
- Pereinamojo proceso laikas;
- Perreguliavimas.

PID reguliatoriaus parametrai randami, naudojantis 2 skyriuje aprašytais Ziegler-Nichols ir Tyreus-Luyben uždarai sistemai derinimo parametrų apskaičiavimo metodais, taip pat analizuojami gamintojo siūlomi parametrai.

Ziegler-Nichols uždaros sistemos reguliatoriaus derinimo metodu gaunamas 3.6 paveikle pateiktas signalo švytavimo nusistovėjimas, kai paduodamas vienetinis žingsnio signalas į sistemą su perdavimo koeficiento ribine reikšme $k_r = 49$. Nusistovėjęs švytavimo periodas $T = 17,5$ s.



3.6 pav. Švytavimo nusistovėjimas

Vadovaujantis 2 skyriaus 2.2 lentelėje pateiktais Ziegler-Nichols uždaros sistemos reguliatoriaus parametų derinimo formulėmis, randami PID reguliatoriaus parametrai:

$$K_r = 0,6 * k_r = 0,6 * 49 = 29,4 ; \quad (3.3)$$

$$T_i = 0,5 * T = 0,5 * 17,5 = 8,75 ; \quad (3.4)$$

$$T_d = T / 8 = 17,5 / 8 = 2,19. \quad (3.5)$$

Čia:

K_r - reguliatoriaus perdavimo koeficientas;

T_i - integravimo laiko pastovioji;

T_d - diferencijavimo laiko pastovioji;

T - nusistovėjęs švytavimo periodas.

Analogiškai randami PID reguliatoriaus parametrai pasinaudojus 2 skyriaus 2.3 lentelėje pateiktomis Tyreus-Luyben parametų derinimo formulėmis.

Rekomenduojami gamintojo parametrai ir gauti prametrai Ziegler-Nichols ir Tyreus-Luyben uždaros sistemos derinimo metodais pateikiami 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. PID reguliatoriaus parametrai

Parametų parinkimo metodas	Dažnio reguliatoriaus parametrai		
	K_p	T_i	T_d
Gamintojas (Siemens)	27	6	4
Ziegler - Nichols	29,4	8,75	2,19
Tyreus - Luyben	15,31	38,5	2,78

Čia:

K_p - reguliatoriaus perdavimo koeficientas;

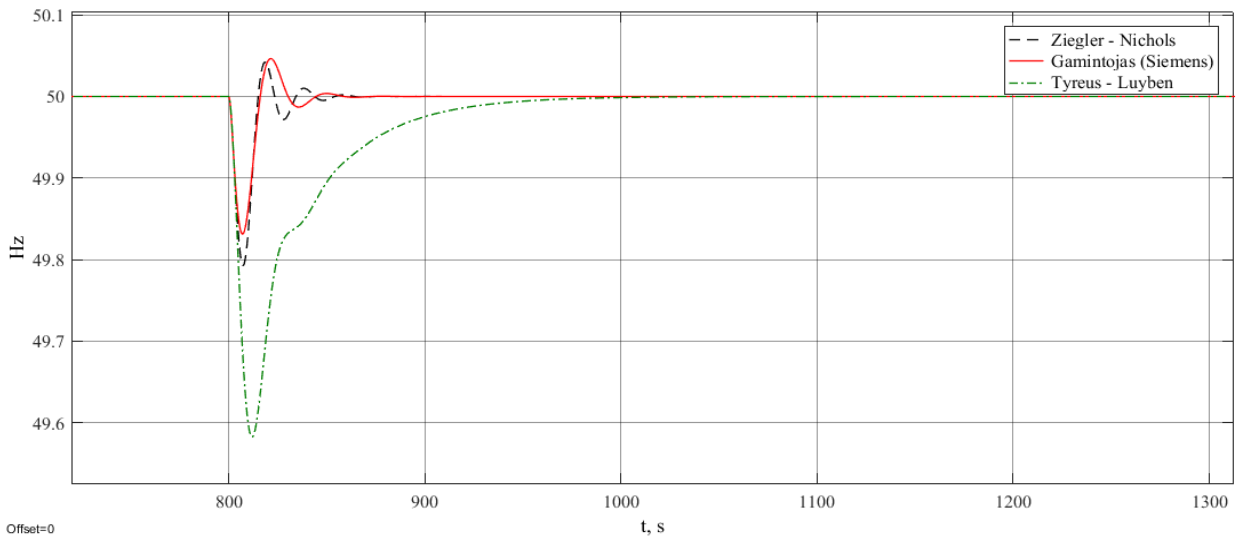
T_i - integravimo laiko pastovioji;

T_d - diferencijavimo laiko pastovioji.

Veikiant sistemai nusistovėjusiu režimu, su gautais derinimo ir gamintojo rekomenduojamais parametrais atliekamas PID reguliatoriaus tyrimas:

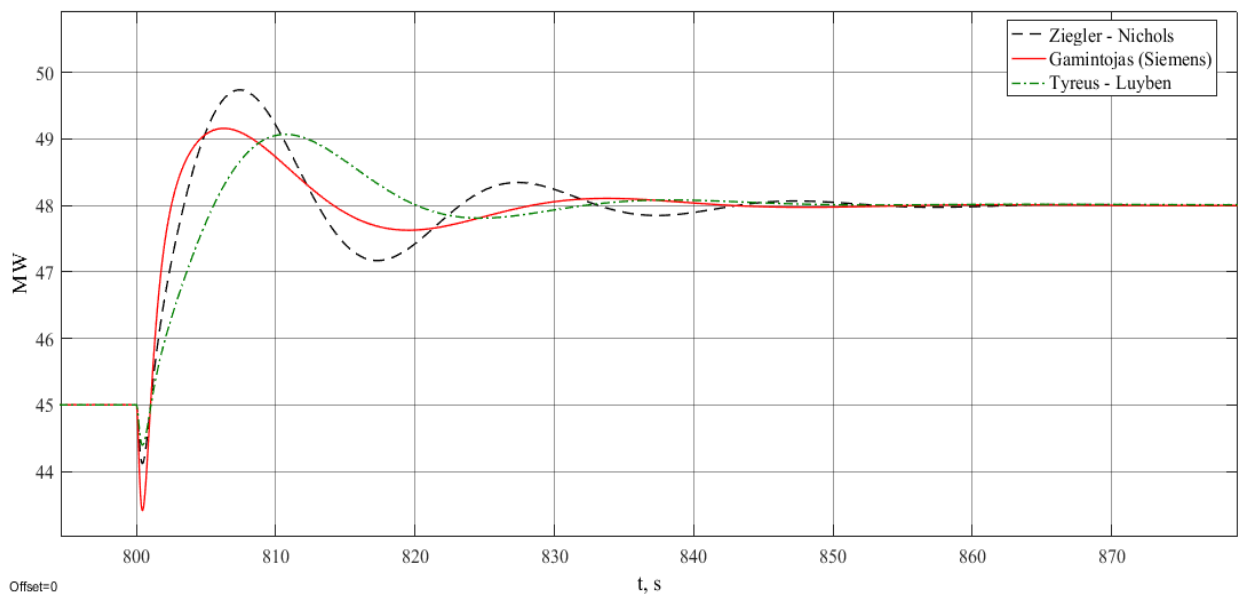
1. Imituojamas 3MW apkrovos padidėjimas;
2. Imituojamas 3MW apkrovos sumažėjimas.

Naudojantis programos Matlab/Simulink paketu ir sumodeliuotu SGT800B dujų turbinos modeliu, imituojamas 3MW apkrovos padidėjimas sistemoje. Gautos dažnio reguliatoriaus pereinamojo proceso kreivės pateiktos 3.7 paveiksle, o dujų turbinos mechaninės galios pokyčio kreivės pateiktos 3.8 paveiksle.



3.7 paveikslas. Dažnio reguliavimo pereinamojo proceso kreivės, kai sistemoje imituojamas 3MW apkrovos padidėjimas.

3.7 paveikslas vaizduoja astatinį reguliavimo procesą. Nusistovėjęs dažnio nuokrypis lygus nuliui. Iš paveiksle pateiktų pereinamojo proceso kreivių su skirtingais reguliatoriaus parametrais matyti, kad gamintojo siūlomi parametrai rodo geresnius tyrimo rezultatus. Gaunama dažnio maksimali dinaminė nuokrypa mažiausia ($49,83\text{Hz}$) ir dažnis sistemoje greičiau stabilizuojamas ($43,48\text{s}$), negu su parinktais Ziegler-Nichols ir Tyreus-Luyben metodais. Taip pat nustatyta, kad taikant parametrus rastus naudojantis Tyreus-Luyben metodą, sistemoje nėra perreguliavimo, tačiau dažnio maksimali dinaminė nuokrypa ($49,59\text{Hz}$) ir pereinamojo proceso laikas ($152,1\text{s}$) didžiausi.



3.8 paveikslas. Turbinos mechaninės galios pereinamojo proceso kreivės, kai sistemoje imituojamas 3MW apkrovos padidėjimas.

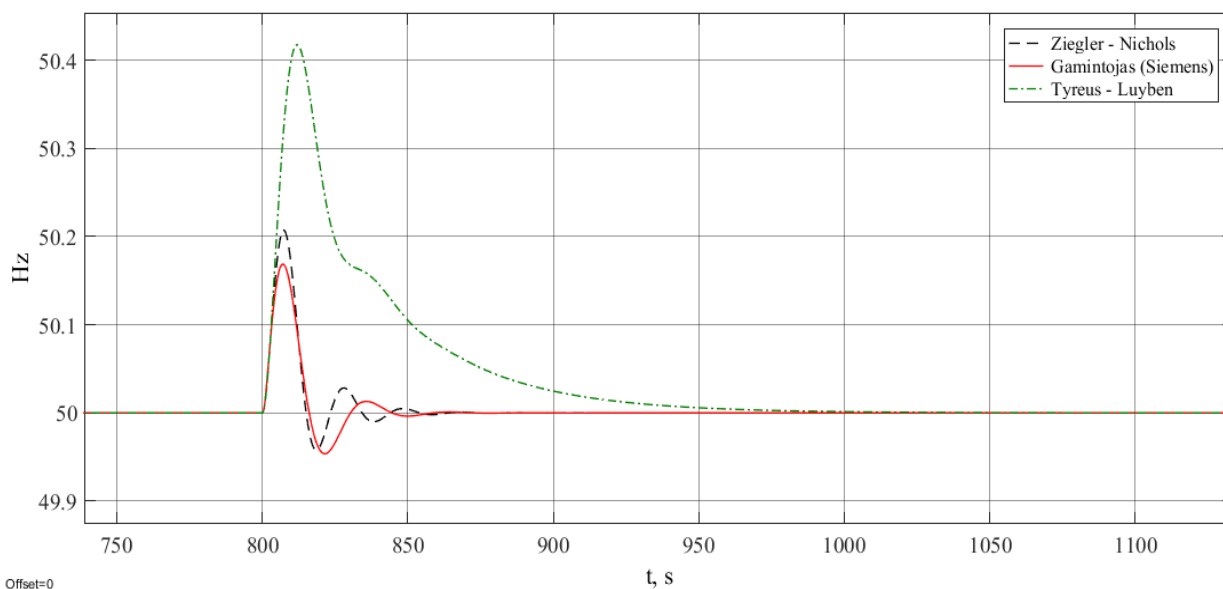
Iš 3.8 paveikslo matyti, kad padidėjus 3MW apkrovai sistemoje, iš pradžių krenta mechaninė turbinos galia, o vėliau didėja. Taip nutinka dėl kuro padavimo sistemos inercijos. Kuro sistema nespėja laiku padidinti turbinos mechaninės galios, todėl galia iš pradžių krenta.

Dažnio reguliavimo pereinamojo proceso rodikliai, gauti taikant skirtingus reguliatorių derinimo parametrų parinkimo metodus, ir su gamintojo siūlomais reguliatoriaus parametrais, pateikti 3.2 lentelėje, kai apkrova sistemoje padidėjo 3 MW.

3.2 lentelė. Pereinamojo proceso rodikliai, padidėjus sistemoje 3MW apkrovai

Regulatoriaus parametro parinkimo metodas	Dažnio maksimali dinaminė nuokrypa, Hz	Pirmo piko pasiekimas, t (s)	Perreguliavimas, %	Pereinamasis procesas, t (s)
Gamintojas (Siemens)	49,83	7,05	8,23	43,48
Ziegler-Nichols	49,79	7,51	13,81	52,56
Tyreus-Luyben	49,59	12,01	0	152,10

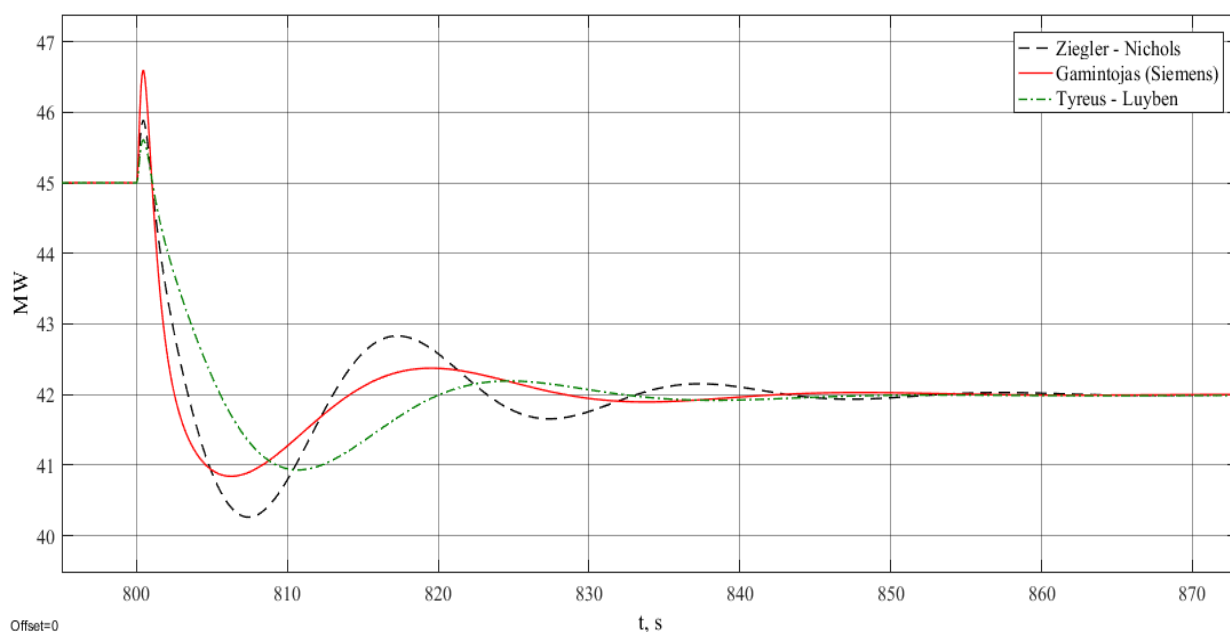
Toliau, atliekamas tyrimas, nusistovėjusiame sistemos veikimo režime, imituojamas atsiradęs 3MW apkrovos sumažėjimas. Gautos dažnio reguliavimo pereinamojo proceso kreivės pateikiamos 3.9 paveiksle, o dujų turbinos mechaninės galios pokytis 3.10 paveiksle.



3.9 paveikslas. Dažnio reguliavimo pereinamojo proceso kreivės, kai sistemoje imituojamas 3MW apkrovos sumažėjimas.

Kaip matyti 3.9 paveiksle, pateiktų pereinamojo proceso kreivių su skirtingais reguliatoriaus parametrais, gamintojo siūlomi parametrai rodo geresnius tyrimo rezultatus. Gaunama mažiausia dažnio maksimali dinaminė nuokrypa ($50,17\text{Hz}$). Dažnis sistemoje greičiau stabilizuojamas

(43,49s), negu su parinktais Ziegler-Nichols ir Tyreus-Luyben metodais. Taip pat nustatyta, kad taikant parametrus rastus naudojantis Tyreus-Luyben metodą sistemoje nėra perreguliavimo, tačiau dažnio maksimali dinaminė nuokrypa (50,41Hz) ir pereinamojo proceso laikas (152,11s) didžiausi.



3.10 paveikslas. Turbinos mechaninės galios pereinamojo proceso kreivės, kai sistemoje imituojamas 3MW apkrovos sumažėjimas.

3.10 paveiksle pavaizduota, kad atsiradus apkrovai, turbinos mechaninė galia staiga padidėjo ir pradėjo mažėti. Taip atsitinka dėl kuro sistemos inercijos, sistema nespėja padidinti turbinos mechaninės galios.

Gauti pereinamojo proceso rodikliai, taikant skirtingus reguliatorių derinimo parametrų parinkimo metodus ir su gamintojo siūlomais parametrais pateikti 3.3 lentelėje, kai apkrova sistemoje sumažėjo 3 MW.

3.3 lentelė. Pereinamojo proceso rodikliai, sumažėjus sistemoje 3MW apkrovai

Regulatoriaus parametro parinkimo metodas	Dažnio maksimali dinaminė nuokrypa, Hz	Pirmo piko pasiekimas, t (s)	Perreguliavimas, %	Pereinamasis procesas, t (s)
Gamintojas (Siemens)	50,17	7,06	8,23	43,49
Ziegler-Nichols	50,21	7,52	13,81	52,57
Tyreus-Luyben	50,41	12,01	0	152,11

Tyrimo metu paveikus trikdžiui, pagal sistemos pereinamojo proceso pobūdį, sistema yra stabili, nes sistema grįžta į pusiausvyros padėtį, tik skirtingu laiku.

Iš gautų tyrimo rezultatų, keičiant sistemoje 3MW apkrovą optimaliausią sistemos pereinamąjį procesą gauname pasirinkę reguliatorių su gamintojo rekomenduojamais parametrais.

Gaunamas mažas perreguliavimas (8,23%), mažiausia dažnio maksimali dinaminė nuokrypa (0,17Hz) ir trumpiausia pereinamojo proceso trukmė (8,23s). Arčiausiai gamintojo gautų pereinamojo proceso rodiklių, gautas rezultatas naudojant Ziegler-Nichols parametrų derinimo metodą.

IŠVADOS

1. Nustatyta, kad pagal schemos specifiką AB „Achema“ gali pereiti dirbti izoliuotai nuo EES sudarydama žiedinę 110 kV schemą. Identifikuota, kad siekiant užtikrinti EES patikimumą yra naudojama 6 kV elektros tinklo galimybė automatiškai persijungti iš kito 110/6 kV pastotės transformatoriaus. Sistemos darbas ir galios balansas palaikomas pamainos inžinieriaus, kuris nuolat stebi ir valdo elektros kokybės parametrus. Pagal gautus analizės rezultatus nustatyta, kad vidutinė gamyklos apkrova 53,386 MW. Todėl gamykla norėdama veikti autonomišku režimu privalėtų didesnę laiko dalį naudoti abu generavimo šaltinius, kadangi tik tuo atveju būtų padengiamos esamos apkrovos, veikiant izoliuotai nuo EES.
2. Sudarytas dujų turbinos SGT800B matematinis modelis, pagal kurį sistemos dažnis reguliuojamas astatiniu reguliavimo režimu. Naudojant modelį galima tirti pereinamojo proceso charakteristikas - taikant regulatoriaus derinimo metodus skirtus galios ir dažnio nuokrypių optimizavimui.
3. Imituojant sistemoje 3MW apkrovos pokytį pagal pereinamojo proceso pobūdį, sistema stabili, kadangi sistema grįžta į pusiausvyros padėtį, tik skirtingu laiku. Optimaliausi sistemos pereinamojo proceso rodikliai gaunami pasirinkus reguliatorių su gamintojo rekomenduojamais parametrais. Tuomet gaunamas mažas perreguliavimas (8,23%), mažiausia dažnio maksimali dinaminė nuokrypa (0,17Hz) ir trumpiausia pereinamojo proceso trukmė (43,49s). Naudojant Ziegler-Nichols parametrų derinimo metodą buvo gauti pereinamojo proceso rodikliai. Šių rodiklių reikšmės yra arčiausios rezultatams, gautiems su gamintojo pateiktais parametrais.

INFORMACINIŲ ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

1. FENG D., CHEN Z. *System control of power electronics interfaced distributed generation units* [interaktyvus], [žiūrėta 2016 m. balandžio 18 d.]. Prieiga per:
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4778034>
2. LIANG J., WEISS G., ZHONG Q. *Hybrid control of multiple inverter in an island-mode distribution system* [interaktyvus]. 2003, [žiūrėta 2016 m. gegužės 12 d.]. Prieiga per:
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1218274>
3. JAIN D., BHASKAR K. M., JOSHI K. S., BOHRE D. *Analysis of load frequency control problem for interconnected power system using PID controller* [interaktyvus]. 2014, [žiūrėta 2016 m. gegužės 19 d.]. Prieiga per:
http://www.ijetae.com/files/Volume4Issue11/IJETAE_1114_42.pdf
4. KOCARSLAN I., CAM E. *Fuzzy logic controller in interconnected electrical power systems for load frequency control* [interaktyvus]. 2005, [žiūrėta 2016 m. birželio 12d.]. Prieiga per: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061505000633>
5. SHANMUGA V, JAYABARATHI T . *Load frequency control using pid tuned ANN controller in power system* [interaktyvus]. 2011, [žiūrėta 2016 m. birželio 16 d.]. ISBN 9781612843797. Prieiga per:
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=5725341>
6. DHARMENDRA JAIN, BHASKAR M.K, KUMAR MANOJ. *Comparative analysis of different methods of tuning the pid controller parameters for load frequency control problem* [interaktyvus]. 2014, [žiūrėta 2016 m. spalio 14 d.]. ISSN 22788875. Prieiga per:
https://www.ijareeie.com/upload/2014/november/34_Comparative.pdf
7. MUNI-FED ANTEA GROUP ENERGY PARTNERS, LLC. *Microgrid Technology White Paper* [interaktyvus]. 2016, [žiūrėta 2016 m. spalio 16 d]. Prieiga per:
<http://www.polb.com/civica/filebank/blobdload.asp?BlobID=13595>
8. MENG, L., E. R. SANSEVERINO, A. LUNA ir kt. *Microgrid supervisory controllers and energy management systems: A literature review* [interaktyvus]. 2016, [žiūrėta 2016 m. gruodžio 5 d]. Prieiga per:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116002380>
9. Lietuvių kalbos žodynas [interaktyvus], [žiūrėta 2017 m. sausio 5 d]. Prieiga per:
http://www.lkzd.lki.lt/Zodynas/Naujas_n/Visas.asp
10. Standartas LST EN 50160:2010. *Bendrų skirstomųjų elektros tinklų įtampos charakteristikos.*

11. BAČAUSKAS A. *Apie elektros energetikos sistemų technologijas be formulių* [interaktyvus], 2010 [žiūrėta 2017 m. sausio 9 d.]. Prieiga per:
https://www.elektroklubas.lt/archyvas/pdf/2011/ABac_el_en_sist.pdf
12. RADZIUKYNAS V., NEMURA A., NARGĖLAS A. *Lietuvos energetikos sistemos dažnio ir tarpsisteminių galių nuokrypių priklausomybė nuo vėjo elektrinių darbo* [interaktyvus]. 2007, [žiūrėta 2017 m. vasario 12 d.]. Prieiga per:
http://www.lmaleidykla.lt/publ/0235-7208/2007/4/Ener_009_015.pdf
13. NARGĖLAS A. *Rėlinė apsauga ir automatika*. Mokymo Kaunas 2012, [psl.124 - 127].
14. AŽUBALIS V., NAVICKAS A.S., JONAITIS A. ir kt. *Kompleksinis elektros sistemos ir vartotojo su vidine paskirstyta generacija ribinių režimų įvertinimas*. KTU mokslininkų ataskaita (2008).
15. KAVALIAUSKAS V., NEMURA A. *Elektros energetikos sistemos dažnio automatinio reguliavimo centriniu kombinuotu reguliatoriumi matematinis modelis* [interaktyvus]. 2001, [žiūrėta 2016 m. vasario 12 d.]. Prieiga per:
<http://elibrary.lt/resursai/LMA/Energetika/E-09.pdf>
16. RAJPU R. K. *A textbook of power system engineering*. 2006, [psl.377-378], EPS0674395
17. LASSERTER H., R. PIAGI P. *Control and Design of Microgrid Components*.(2006), [psl.29-49].
18. MALIŠKA E., BRUŽAS M., ABARAVIČIUS J. *Miestų, gyvenviečių ir kaimo vietovių esamų apkrovų analizė, rekomendacijų elektros apkrovų augimo perspektyvoms įvertinant Europos Sąjungos šalių patirtį bei skaičiuojamųjų elektros apkrovų, skirtų elektros tinklų plėtrai, normoms parengimas* [interaktyvus]. 2006, [žiūrėta 2017 m. vasario 18 d.]. Prieiga per: http://lsta.lt/files/studijos/2006/17_Apkrovos.pdf
19. KIKUTIS Ramūnas. *Inercinio navigacijos įrenginio paklaidų analizė* [interaktyvus]. 2012, [žiūrėta 2017 m. kovo 16 d.]. Prieiga per: <https://core.ac.uk/download/pdf/51726808.pdf>
20. GYLYS Jonas. *Garų ir dujų turbinų teoriniai pagrindai* [interaktyvus]. 2015, [žiūrėta 2017 m. kovo 16 d.]. ISBN 9786090211595 Prieiga per:
<https://www.ebooks.ktu.lt/eb/1347/garo-ir-duju-turbinu-teoriniai-pagrindai/>
21. ALEKSA V, GALVANAUSKAS V. *Technologinių procesų automatizavimas ir valdymas*. (2008) [psl.73-74], ISBN 9789955255055.
22. MALLESHAM G, MISHRA S, JHA A.N. *Ziegler-Nichols based controller parameters tuning for load frequency control in microgrid* [interaktyvus]. 2012, [žiūrėta 2017 m. kovo 18 d.]. ISBN:9781467301367. Prieiga per:
<http://ieeexplore.ieee.org/document/6147128/>

23. LIAUČIUS G. *Keleto įėjimų keleto išėjimų sistemos valdymas neraiškios logikos regulatoriumi* [interaktyvus]. Kaunas, 2008, [žiūrėta 2017 m. kovo 25 d.]. Prieiga per: <http://gs.elaba.lt/object/elaba:1729760/index.html>
24. KULBIS M. *PID valdiklis ir jo parametru parinkimas orlaivio stabiliam skrydžiui* [interaktyvus]. Kaunas, 2014 [žiūrėta 2017 m. kovo 25 d.]. ISSN20299974 Prieiga per: http://www.at.vgtu.lt/index.php/at/article/viewFile/at.2014.17/pdf_1_ISSN_2029-9974
25. SHAHROKHI M, ZOMORRODI A. *Comparison of PID controller tuning methods* [interaktyvus]. [žiūrėta 2017 m. kovas 25 d.]. Prieiga per: http://www.ie.tec.ac.cr/einteriano/control/clase/Zomorrodi_Shahrokhi_PID_Tunning_Comparison.pdf

PRIEDAI

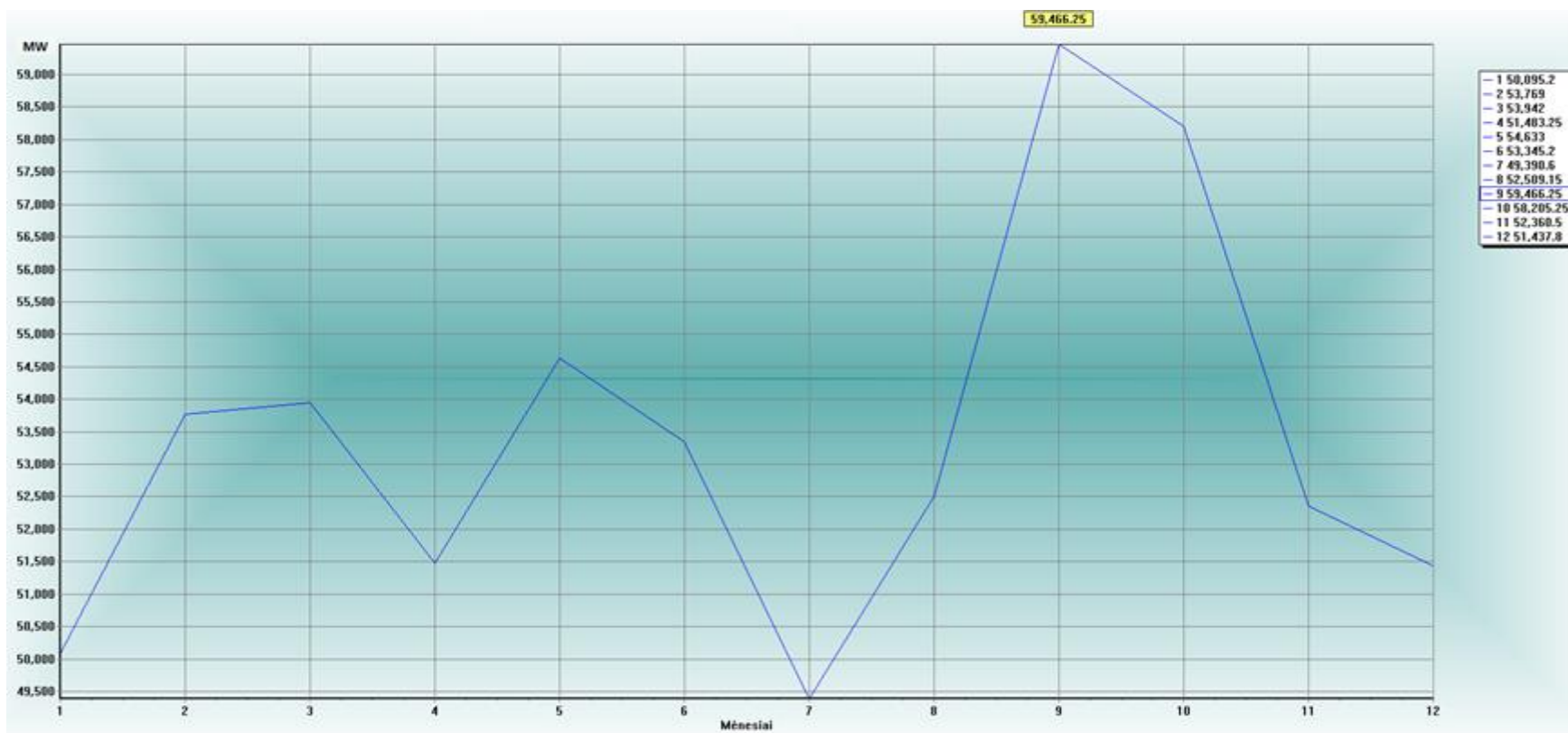
Priedas 1. Programos kodas

```
clear all
P=[50.095 53.769 53.942 51.483 54.633 53.345 49.390 52.509 59.466 58.205
52.360 51.437];
title('Apkrovimas 2016');
%Vidurkis
Vid=(sum(P))/(length(P));
display(Vid,'Vidurkis');
%Dispersija
D=var(P);
display(D,'Dispersija');
%Nuokrypis
N=D^0.5;
display(N,'Nuokrypis');
%Normalusis skirstinis
figure(5);
x=[0.25:0.01:80];
NorSkirs=normpdf(x,Vid,N);%normaliojo skirstinio funkcija
plot(x,NorSkirs);
title('Normaliojo skirstinio grafikas');
grid on;
```


Priedas 2. 2016 m. Maksimalios elektros tinklo apkrovos

P2.1 lentelė. Maksimalios galios pokyčiai 2016 metais

Mėnuo	Sausis	Vasaris	Kovas	Balandis	Gegužė	Birželis	Liepa	Rugpjūtis	Rugsėjis	Spalis	Lapkritis	Gruodis
Maksimali apkrova, MW	50,095	53,769	53,942	51,483	54,633	53,345	49,390	52,509	59,466	58,205	52,360	51,437



P2.1 pav. 2016 metų maksimalių apkrovų grafikas

Priedas 3. Modelio techninė specifikacija

P3.1 lentelė. Modelio techninė specifikacija

Galios reguliatorius	
Galios reguliavimo koeficientas	0,0106
Galios reguliavimas	0-10%
Dažnio svirimo viršutinė riba	2 Hz
Dažnio svirimo apatinė riba	-10 Hz
Dažnio reguliatorius	
K1 (stiprinimo koeficientas)	27 MJ/s/Hz
T1 (diferencijavimo laiko pastovioji)	4 s
T2 (integravimo laiko pastovioji)	6 s
Išėjimo viršutinė riba	124 MJ/s
Išėjimo apatinė riba	10 MJ/s
Servo pozicinis reguliatorius	
K2 (stiprinimo koeficientas)	10 MJ/s/MJ/s
Išėjimo viršutinė riba	200 MJ/s
Išėjimo apatinė riba	-200 MJ/s
Servo ir kuro vožtuvas	
K3 (stiprinimo koeficientas)	10 MJ/s/MJ/s
Eigos viršutinė riba	200 MJ/s
Eigos apatinė riba	0 MJ/s
Kuro sistema	
T3 (laiko pastovioji)	0.4 s
Kompresorius	
K4 (stiprinimo koeficientas)	0,53 MW/MJ/s
T4 (laiko pastovioji)	0,1 s
Turbina ir generatorius	
K5 (turbinos stiprinimo koeficientas)	0.083 Hz/MW
T5 (turbinos laiko pastovioji)	0.3 s
H (generatoriaus inercija)	5,34 Ws/VA
T6 (generatoriaus laiko pastovioji)	12,78 s
K6 (stiprinimo koeficientas)	1,196
D (apkrovos kitimas įtakoiantis 1% dažnio kitimą)	0,836
Bazinė galia	56,25 MVA