

Šiluminių elektrinių generatorinių agregatų režimų modeliavimas

Ramūnas Ponelis,

Vaclovas Ažubalis

*Kauno technologijos universitetas,
Elektros sistemų katedra,
Studentų g. 48-144,
LT-51367 Kaunas
El. paštas: ramunas.ponelis@litgrid.eu*

Kaip galima tikslesnis elektrinių generatorinių agregatų pirminių variklių ir jų reguliavimo sistemų bei valdymo režimų modeliavimas yra svarbus tiriant vidutinės trukmės ir ilgalaikius elektromechaninius pereinamuosius procesus bei dažnio stabilumą. Tai ypač aktualu mažose elektros energetikos sistemose. Straipsnyje pateikiami turbinos su tarpiniu garo nuėmimu modelio schemas sudarymo principai, kai garo nuėmimai yra tarp atskirų turbinos sekcijų ar jų viduje; parodoma alternatyvi suprastinto turbinos modelio schema; šiluminės elektrinės generatorinio agregato atskirų valdymo režimų modelių schemas. Pateikiamos šiluminės elektrinės agregato skirtingų valdymo režimų modelių reakcijos į šuolinį dažnio pokyčio signalą parametrų kitimo kreivės.

Raktažodžiai: elektros energetikos sistema, generatoriniai agregatai, garo turbinos modelis, tarpinis garo nuėmimas, katilo modelis, agregatų valdymo režimų modeliai

ĮVADAS

Elektros energetikos sistemos (EES) elektromechaninių pereinamųjų procesų tyrimo tikslumas ir rezultatų patikimumas priklauso nuo tyrimuose naudojamų generatorinių agregatų elementų: generatorių, žadinimo sistemų, turbinų ir katilų bei jų reguliavimo sistemų modelių tikslumo ir valdymo režimų įvertinimo. Tai ypatingai aktualu tiriant mažų EES statinių ir dinaminį įtampos vektoriaus kampo bei dažnio stabilumą, nes mažų sistemų bendroji besisukančiųjų generatorinių agregatų ir variklių bei apkrovos agregatų inercija yra mažesnė, o dažnio ir įtampos vektoriaus kampo pokyčiai didesni, siauresnės stabilumo sąlygų ribos. Tiriant dažnio stabilumą tenka nagrinėti vidutinės trukmės ir ilgalaikius pereinamuosius procesus, kurių eigą lemia ne tik elektromechaniniai, bet ir termodinaminiai generatorinių agregatų procesai bei tų procesų reguliavimo sistemos. Bendruoju atveju tam reikia kaip galima tiksliau modeliuoti ir šiluminę agregatų dalį: turbinas, katilus, kuro sistemas, jų reguliatorius bei bendrus agregatų reguliavimo režimus.

Modeliavimo netikslumai kyla ne tik dėl atskirų agregatų įrenginių netinkamų modelių struktūrų ir modelių parametrų tikslumo, bet ir rekonstrukcijų bei derinimų metu pakeistų struktūrinių ir funkcinių parametrų ar neįvertintus įrenginių susidėvėjimo. Tačiau pastarųjų veiksmų įtaka šiame straipsnyje nenagrinėjama. Čia nagrinėjamas šiluminių elektrinių vieno veleno generatorinių agregatų su kondensacinėmis ir termofikacinėmis garo turbinomis modeliavimas. EES šiluminių elektrinių generatorinių agregatų sudaro pagrindiniai elektrinės įrenginiai, dalyvaujantys generuojant elektros energiją: generatorius, turbina, katilas, kuro sistema ir jų reguliatoriai.

Generatorių ir žadinimo reguliavimo sistemų modeliavimas yra gana plačiai tyrinėtas užsienio ir Lietuvos elektros energetikos specialistų [1–4]. Mažiau dėmesio skirta šiluminės agregatų dalies modeliavimui elektros energetikos režimų tyrimui. Literatūroje paprastai yra pateikiamos atskirų agregato elementų modeliavimo galimybės [1, 5, 6], tačiau nenagrinėjamas viso agregato pereinamųjų režimų modeliavimas. Literatūroje nesutinkama duomenų apie

turbinų su tarpiniu garo nuėmimu modeliavimą, agregatų su tarpiniu garo nuėmimu dinamikos specifika ilgalaikių elektromechaninių pereinamųjų procesų metu. Šie klausimai yra labai aktualūs salos režimu dirbančioms mažos galios elektros energetikos sistemoms.

GARO TURBINŲ MODELIAVIMAS

Šiluminių elektrinių generatorinių agregatų garo turbinos būna trijų tipų:

- kondensacinės, be tarpinio garo nuėmimo;
- termofikacinės, su garo nuėmimu pramonės vartotojams ir šildymui;
- termofikacinės, su garo nuėmimu tik šildymui.

Klasikinės garo turbinos aukšto, vidutinio ir žemo slėgio cilindruose, vykstant termodinaminiam procesams – plečiantis garui, jo šiluminė energija transformuojama į mechaninę energiją. Suminė turbinos galia P_T yra lygi atskirų turbinos cilindrų galių sumai. Bendruoju atveju, kiekvieno cilindro galia yra proporcinga tuo cilindru tekančio garo srautui:

$$\begin{aligned} P_T &= P_A + P_V + P_Z = \\ &= Q_A \cdot K_A + Q_V \cdot K_V + Q_Z \cdot K_Z; \end{aligned} \quad (1)$$

čia $P_A, P_V, P_Z, Q_A, Q_V, Q_Z, K_A, K_V, K_Z$ – aukšto, vidutinio ir žemo slėgio cilindrų galios, garo srautai ir proporcingumo faktoriai.

Nesant tarpinio garo nuėmimo visų cilindrų garo srautai gali būti laikomi vienodais, suprastėja turbinos galios išraiška:

$$P_T = Q_T (K_A + K_V + K_Z); \quad (2)$$

čia Q_T – turbinos garo srautas.

Esant normaliam režimui, turbinos garo srautas yra lygus aukšto slėgio cilindro garo srautui ($Q_T = Q_A$).

Turbinos garo srautų ir galios dinamikai pereinamųjų procesų metu didelę įtaką turi šilumą akumuliuojančios

turbinos talpos [1]: tarpinis garo perkaitintuvas, pagrindinio reguliavimo vožtuvo garo dėžė, cilindrus jungiantys vamzdynai. Klasikinės komponuotės vieno veleno garo turbinos, sudarytos iš aukšto, vidutinio ir žemo garo slėgio cilindrų, tarpinio garo perkaitintuvo, garotakio tarp vidutinio ir žemo slėgio cilindrų bei turbinos pagrindinio reguliavimo ir vidutinio garo slėgio reguliavimo vožtuvų, dinaminio modelio struktūrinė schema pateikta 1 pav. Čia p_T, p_V, μ_T, μ_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.

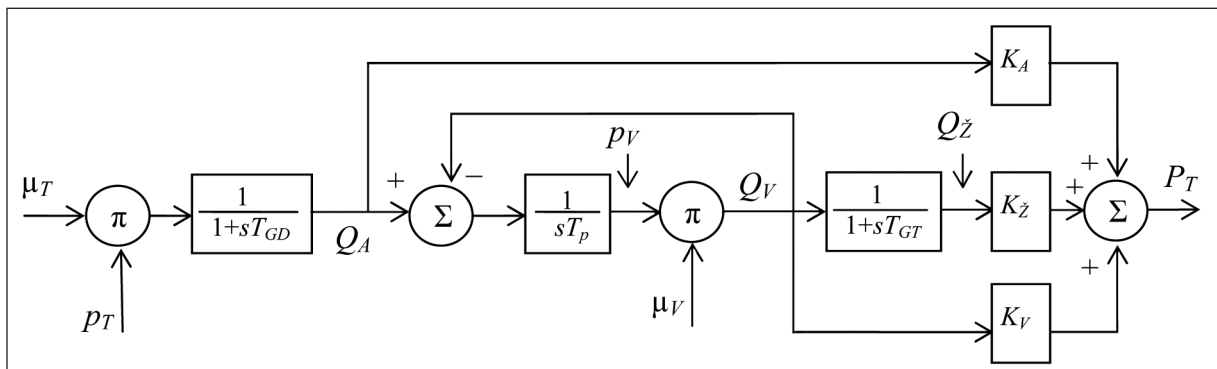
Didžiausios šilumą akumuliuojančios talpos yra tarpiniame garo perkaitintuve. Dėl jų šuoliškai pasikeitus reguliuojančių vožtuvų padėčiai tik dalis galios su nedidele inercija, kuri charakterizuojama garo dėžės šilumos akumuliacija, perduodama turbinos velenui. Kita galios dalis, kurią išvysto vidutinio ir žemo slėgio cilindrai, velenui perduodami su daug didesniu inertiškumu, kuris apibūdinamas tarpinio garo perkaitintuvo šiluminės akumuliacijos geba.

Modeliuojant trumpalaikius pereinamuosius procesus, garo turbinos su tarpiniu garo perkaitintuvu, naudotinas tiesinis matematinis modelis. Jo suminė perdavimo funkcija – operatorinių turbinos galios P_T ir garo srauto Q_p , lygus aukšto slėgio turbinos cilindro garo srautui Q_A , santykis būtų trečios eilės perdavimo funkcija:

$$W_T = \frac{P_T}{Q_T} = \frac{K_V \cdot (1 + T_{GT} \cdot s) + K_Z + K_A \cdot (1 + T_p \cdot s) \cdot (1 + T_{GT} \cdot s)}{(1 + T_{GD} \cdot s) \cdot (1 + T_p \cdot s) \cdot (1 + T_{GT} \cdot s)}; \quad (3)$$

čia K_A, K_V, K_Z – turbinos aukšto, vidutinio ir žemo slėgio cilindrų santykinės galios; T_{GD}, T_p, T_{GT} – garo dėžės, tarpinio garo perkaitintuvo ir garotakio tarp vidutinio slėgio ir žemo slėgio cilindrų laiko pastoviosios.

Be tarpinio garo nuėmimo turbinos aukšto, vidutinio ir žemo slėgio cilindrų santykinė galių suma yra lygi vienetui [1]:



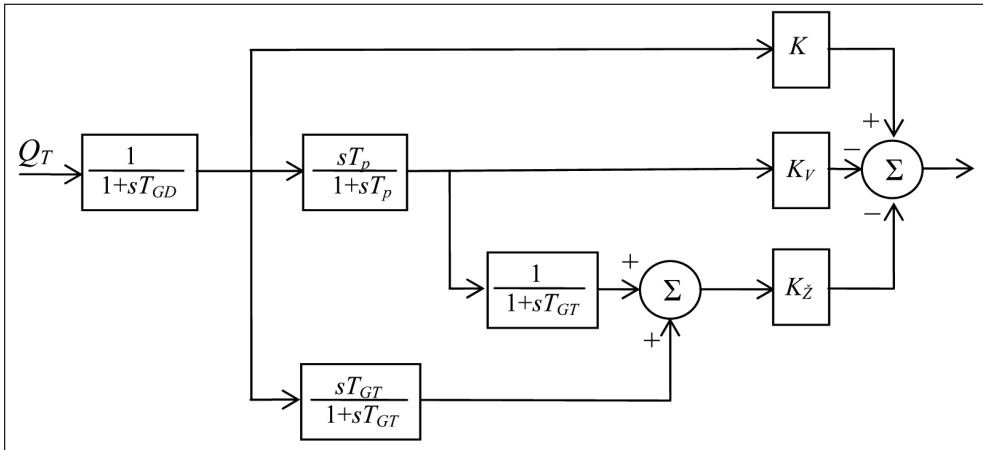
1 pav. Klasikinės komponuotės vieno veleno garo turbinos dinaminio modelio struktūrinė schema

$$K_A + K_V + K_Z = K = 1. \tag{4}$$

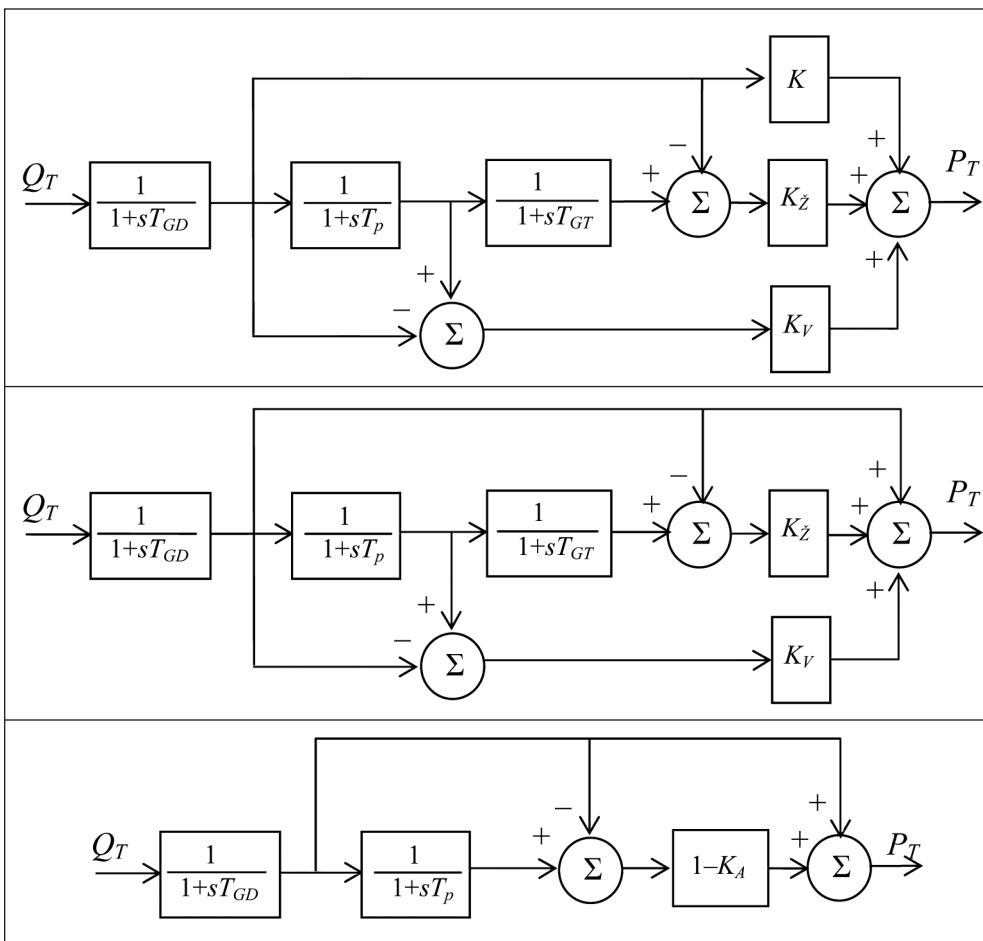
Įvedus suminę santykinę galią K į perdavimo funkciją, gaunama tokia jos išraiška:

$$W_T = \frac{1}{1+T_{GD} \cdot s} \cdot \left[K - K_V \cdot \frac{T_p \cdot s}{1+T_p \cdot s} - K_Z \cdot \left(\frac{T_p \cdot s}{(1+T_p \cdot s) \cdot (1+T_{GT} \cdot s)} + \frac{T_{GT} \cdot s}{(1+T_{GT} \cdot s)} \right) \right]. \tag{5}$$

Pagal šią perdavimo funkciją galima sudaryti alternatyvią turbinos modelio schemą (2 pav.). Suprastinta jos versija parodyta 3a pav. Kai suminė santykinė galia yra lygi vienetui, modelio schema supaprastėja (3b pav.), o neatsižvelgiant į garotakio tarp vidutinio ir žemo slėgio turbinos sekcijų laiko pastoviąją, laikant $T_{GT} = 0$, alternatyvi turbinos modelio schema supaprastėja dar labiau (3c pav.). Pastaruoju atveju skirtingam galių pasiskirstymui tarp turbinos sekcijų modeliuoti tereikia pakeisti vienos grandies perdavimo faktorių.



2 pav. Turbinos dinaminio modelio struktūrinė schema, atitinkanti (5) perdavimo funkciją



3 pav. Alternatyvi suprastinta turbinos dinaminio modelio struktūrinė schema: a) bendruoju atveju, b) santykinėi turbinos galiui K esant lygiai vienetui, c) neatsižvelgiant į T_{GT} ($T_{GT} = 0$)

Esant pastoviam garo slėgiui, garo turbinos perdavimo funkcija būtų turbinos galios ir reguliavimo vožtuvo padėties diferencialinių operatorių išraiškų santykis. Skaitiklyje ir vardiklyje esančius perdavimo funkcijos parametrus pakeitus Laplaso operatoriaus daugianarių koeficientais (5), perdavimo funkciją galima užrašyti taip:

$$W_T = \frac{T_{11} \cdot s^2 + T_{12} \cdot s + K}{T_{21} \cdot s^3 + T_{22} \cdot s^2 + T_{23} \cdot s + 1}; \quad (6)$$

čia

$$\begin{cases} T_{11} = K_A \cdot T_{GT} \cdot T_P; \\ T_{12} = (T_P + T_{GT}) \cdot K_A + T_{GT} \cdot K_V; \\ K = K_A + K_V + K_Z; \\ T_{21} = T_{GD} \cdot T_P \cdot T_{GT}; \\ T_{22} = T_{GD} \cdot T_P + T_{GD} \cdot T_{GT} + T_{GT} \cdot T_P; \\ T_{23} = T_{GD} + T_P + T_{GT} \end{cases} \quad (7)$$

arba

$$W_T = K \cdot \frac{T'_{11} \cdot s^2 + T'_{12} \cdot s + 1}{T'_{21} \cdot s^3 + T'_{22} \cdot s^2 + T'_{23} \cdot s + 1}; \quad (8)$$

čia

$$\begin{cases} T'_{11} = T_{GT} \cdot T_P \cdot K_A / K; \\ T'_{12} = (T_P + T_{GT}) \cdot K_A / K + T_{GT} \cdot K_V / K. \end{cases} \quad (9)$$

Šias išraiškas patogu naudoti identifikuojant turbinų parametrus pagal bandymų rezultatus.

TURBINŲ SU TARPINIŲ GARO NUĖMIMU MODELIAVIMAS

Turbinos galia yra tiesiogiai proporcinga turbinos garo srautui. Ją galima išreikšti garo srauto ir entalpijos pokyčio, besiplečiant garui turbinoje, sandauga [5]. Modeliuojant garo turbinas su tarpiniu garo nuėmimu vardine turbinos

galia P_{TN} reikia taikyti vardinę turbinos garo srautą Q_{TN} atitinkančią galią:

$$P_{TN} = Q_{TN} \cdot \Delta h_{pN}; \quad (10)$$

čia Δh_{pN} – suminis entalpijos pokytis garo (neidealaus, politropinio) plėtimosi turbinoje metu.

Tarpinio nuėmimo garo srautą atitinkančią galią P_{nu} galima įvertinti analogiškai – nuimamo garo srauto ir jo entalpijos pokyčiu $\Delta h_{p,nu}$:

$$P_{nu} = Q_{nu} \cdot \Delta h_{p,nu}. \quad (11)$$

Santykiniais dydžiais būtų:

$$P_{nu*} = Q_{nu*} \cdot \Delta h_{p,nu*} = \frac{Q_{nu}}{Q_{TN}} \cdot \frac{\Delta h_{p,nu}}{\Delta h_{pN}}. \quad (12)$$

Šiuo atveju atskirų turbinos sekcijų santykinę galių suma K nebus lygi vienetui ir bus mažesnė už vienetą santykinėje nuimamo garo srauto galios dalimi K_{nu} :

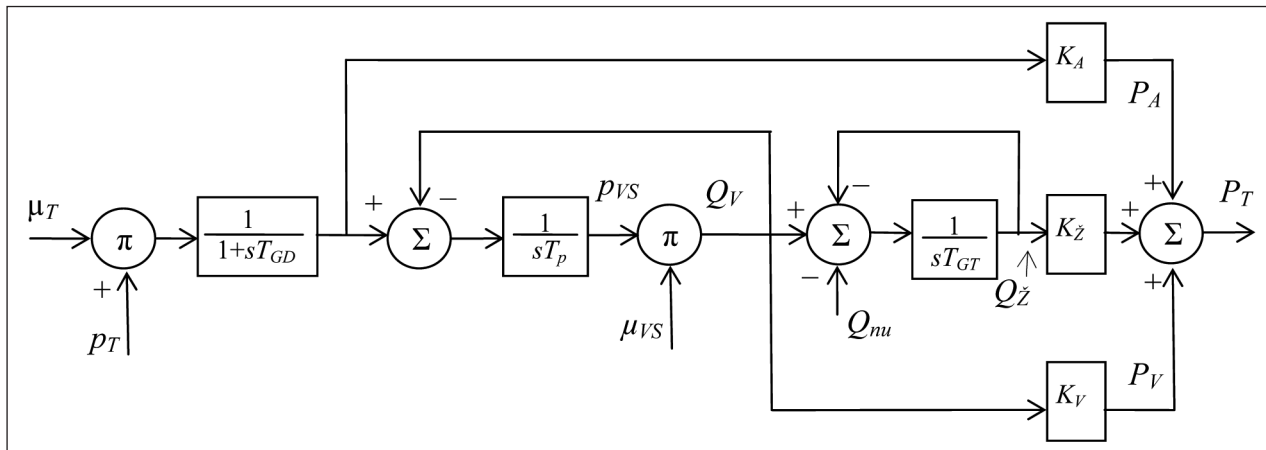
$$K_A + K_V + K_Z + K_{nu} = K + K_{nu} = 1; \quad (13)$$

$$K_{nu} = \frac{P_{nu}}{P_{TN}} = P_{nu*}. \quad (14)$$

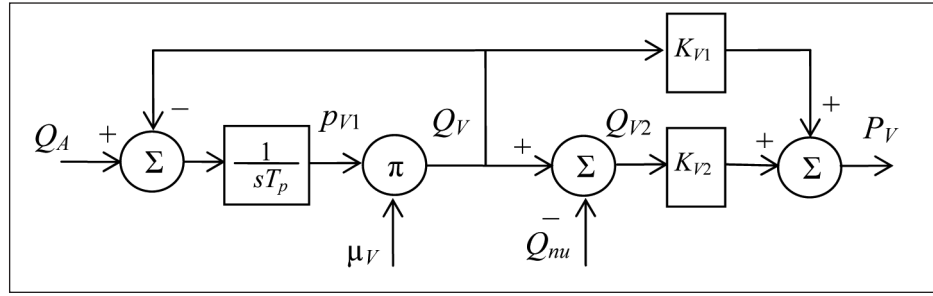
Esant daugiau tarpinių garo nuėmimų, santykinė nuimamo garo srautus atitinkanti galia P_{nu*} įvertinama pagal visų nuėmimų garo srautus atitinkančių dalių galių sumą $\left(\sum_{i=1}^N P_{nu*i} \right)$.

Turbinos su tarpiniu garo nuėmimu už vidutinio slėgio cilindro dinaminis modelis, neatsižvelgiant į turbinos sekcijų vidinius tūrius, pateiktas 4 pav. Čia iš vidutinio slėgio cilindro garo srauto atimamas nuimamo garo srautas Q_{nu} .

Jei tarpinis garo nuėmimas yra cilindro viduje, tai bus dvi vidutinio slėgio sekcijos turbinos galios dedamosios: nuo pradinės cilindro dalies esant pilnam vidutinio slėgio



4 pav. Turbinos su tarpiniu garo nuėmimu už vidutinio slėgio cilindro dinaminio modelio struktūrinė schema



5 pav. Turbinos vidutinio slėgio cilindro dinaminio modelio struktūrinė schema, kai tarpinis garo nuėmimas yra cilindro viduje

garo srautui Q_V ir proporcingumo faktoriui K_{V1} bei likutinės garo srauto dalies Q_{V2} ir proporcingumo faktoriaus K_{V2} (5 pav.). Proporcinių faktoriai gali būti įvertinti pagal santykinius entalpijos pokyčius vidutinio slėgio cilindre: iki tarpinio garo nuėmimo (K_{V1}) ir po tarpinio garo nuėmimo (K_{V2}). Garo srauto vertė po garo nuėmimo bus lygi minėtų srautų santykinį verčių skirtumui:

$$P_{V2} = Q_V - Q_{nu}. \quad (15)$$

Bendruoju atveju, kai vidutinio ir žemo slėgio cilindrus slėgiai yra nereguliuojami, tai kintant nuimamo garo srautui, kuris ir entalpijų pokyčiai besiplečiant garui atskiruose cilindruose, kuris ir turbinos galia. Turbinos galią esant garo nuėmimui P'_T galima išreikšti taip:

$$P'_T = Q_T \cdot (K'_A + K_{V1} + K_{V2} + K'_Z) - Q_{nu} \cdot (K_{V2} + K'_Z); \quad (16)$$

čia K'_A , K'_Z – yra turbinos aukšto ir žemo slėgio cilindrus galių proporcingumo faktoriai esant tarpiniam garo nuėmimui.

Turbinos galia esant tam pačiam garo srautui pakis dydžiu ΔP_T :

$$\Delta P_T = P_T - P'_T = Q_T \cdot (K - K'_A - K_{V1} - K_{V2} - K'_Z) + Q_{nu} \cdot (K_{V2} + K'_Z). \quad (17)$$

Reguliuojant vidutinio slėgio reguliavimo vožtuvą ir difragmą taip, kad vidutinio ir žemo slėgio cilindrus slėgiai išliktų pastovūs, nekistų, galima laikyti, kad

$$K_{V1} + K_{V2} = K_V, \quad (18)$$

$$K'_A = K_A, \quad (19)$$

$$K'_Z = K_Z, \quad (20)$$

Šiuo atveju turbinos galios pokyčio išraiška bus paprasčiau:

$$\Delta P_T = P_T - P'_T = Q_{nu} \cdot (K_{V2} + K'_Z). \quad (21)$$

Santykinis pokyčio dydis δP_T bus:

$$\delta P_T = \frac{\Delta P_T}{P_T} = \frac{Q_{nu}}{Q_T} \cdot \frac{K_{V2} + K'_Z}{K} = Q_{nu*} \cdot (K_{V2*} + K'_{Z*}); \quad (22)$$

čia K_{V2*} , K'_{Z*} – santykiniai turbinos aukšto ir žemo slėgio cilindrus galių proporcingumo faktoriai suminio proporcingumo faktoriaus K atžvilgiu.

Pastaroji išraiška gali būti taikoma ir lyginant turbinos dviejų režimų galias esant tarpiniam garo nuėmimui.

Analogiškai galima modeliuoti ir įvertinti turbinos galias esant tarpiniam garo nuėmimui turbinos žemo slėgio cilindre.

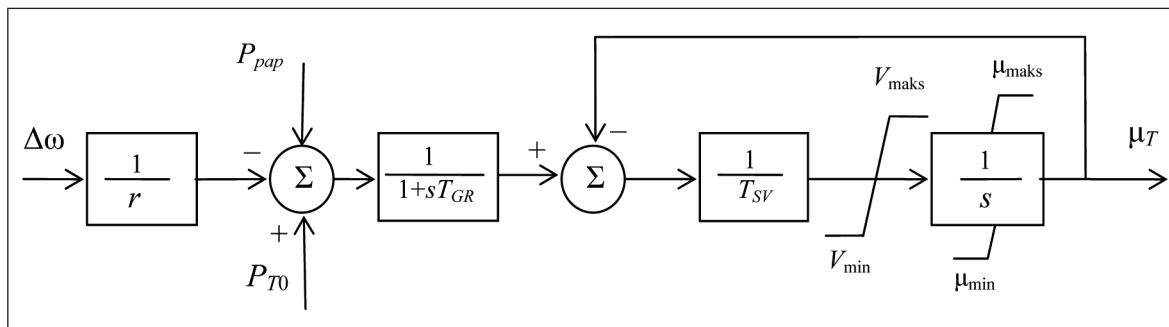
TURBINŲ REGULIATORIŲ MODELIAVIMAS

Pagrindiniai turbinos galios reguliatoriai yra greičio reguliatorius, reaguojantis į veleno greičio nuokrypį nuo nustatytosios vertės, ir vadinamasis turbinos valdymo mechanizmas, keičiantis turbinos darbo tašką, galią P_{T0} . Pagrindinio turbinos valdymo vožtuvo plotą nusako turbinos galia P_{T0} ir jos veleno sukimosi greičio pokytis $\Delta\omega$. Pereinamojo proceso metu reguliavimo vožtuvo eigos pobūdis priklauso nuo turbinos reguliatoriaus statizmo r ir greičio reguliatoriaus bei servovariklio laiko pastoviųjų T_{GR} , T_{SV} . Matematiniam turbinos greičio reguliavimo sistemos modelyje reguliatorius ir servovariklis aprašomi inertinėmis grandimis arba integravimo grandimis su tiesioginiu neigiamu grįžtamoju ryšiu. Suprastinta reguliatoriaus dinaminio modelio struktūra pateikta 6 pav. Čia V_{maks} , V_{min} , μ_{maks} , μ_{min} – didžiausios pagrindinio reguliavimo vožtuvo atidarymo ir uždarymo greičių vertės bei didžiausia ir mažiausia leistinos vožtuvo ploto vertės.

Turbinos greičio reguliavimo procesų tiesinį matematinį modelį galima aprašyti antros eilės perdavimo funkcija:

$$W_{GR} = \frac{\mu_T}{P_{T0} - \Delta\omega/r} = \frac{1}{T_{GR} \cdot T_{SV} \cdot r \cdot s^2 + (T_{GR} + T_{SV}) \cdot r \cdot s + 1}. \quad (23)$$

Analogišku modeliu galima modeliuoti ir turbinos valdymo mechanizmą, keičiantį turbinos darbo tašką – galią P_{T0} , pagal nustatytosios galios vertę ir papildomus slėgio ar galios reguliavimo bei elektros energetikos sistemos centrinio reguliatoriaus signalus.



6 pav. Suprastinta garo turbinos pagrindinio reguliavimo vožtuvo valdymo struktūrinė schema

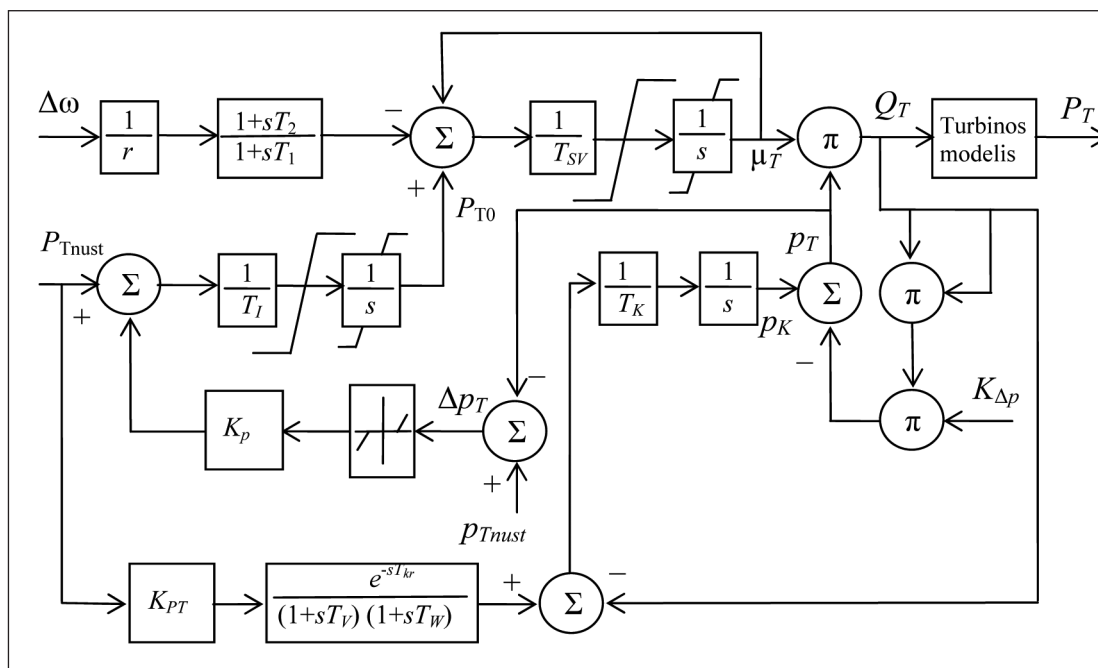
GENERATORINIŲ AGREGATŲ VALDYMO REŽIMŲ MODELIAVIMAS

Pagrindiniai generatorinių agregatų valdymo režimai yra pastovios galios, pastovaus slėgio ir koordinuoto reguliavimo režimai. Šių režimų specifika išryškėja vidutinės trukmės ir ilgalaikių pereinamųjų procesų (trunkančių 30 s ir daugiau) metu. Modeliuojant šiuos režimus reikia atkurti ir lėtesnius šiluminius procesus, vykstančius katiluose.

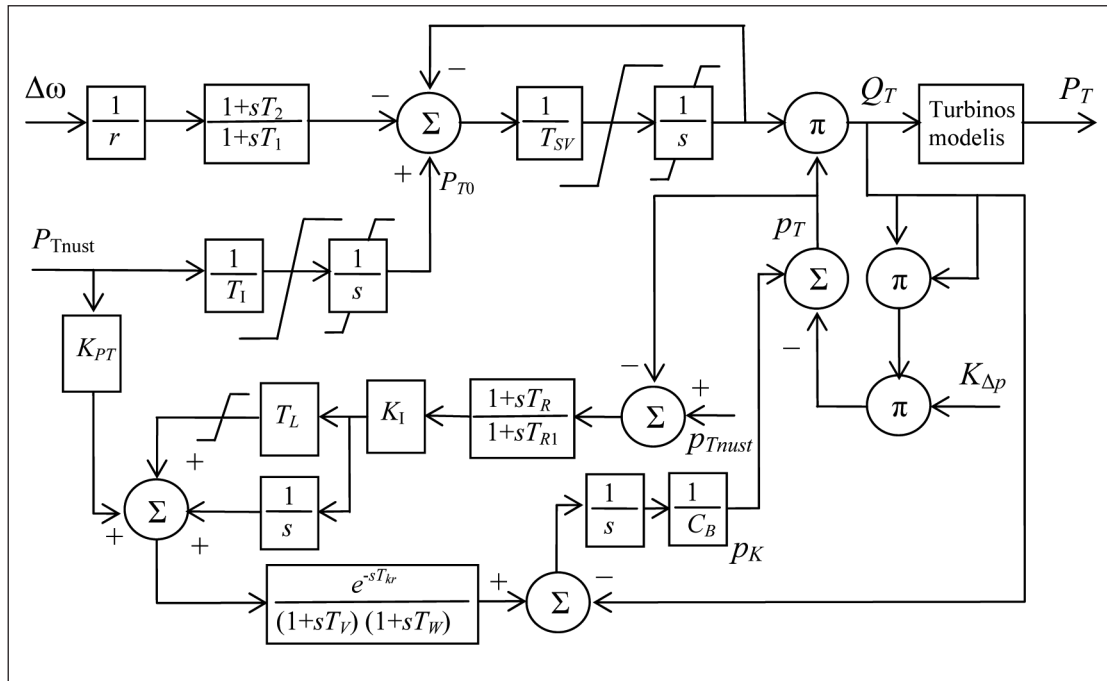
Pastovios galios valdymo režimas yra paprasčiausias režimas, veikia tik turbinos greičio (pirminis) reguliatorius. Agregato galią lemia į katilą paduodamo kuro srautas. Šio režimo metu agregatas gali dalyvauti tik pradinėje pirminio reguliavimo fazėje. Dėl dažnio pokyčio $\Delta\omega$ turbinos greičio reguliatorius padidins pagrindinio turbinos reguliavimo vožtuvo atsідarymo ploto pokytį $\Delta\mu$. Vadinasi, sumažėjus dažniui vožtuvas bus labiau atidaromas, pradinio momentu turbinos galia padidės, o paskui ims mažėti, nes nekeičiant

kuro padavimo ir katilo našumo turbinos slėgis ims mažėti, mažės agregato galia ir nusistos buvusioji nustatytosios galios vertė. Proceso eigą lemia šiluminė katilo laiko pastovioji.

Pastovaus slėgio valdymo režime, dar vadinamam *vedančio* katilo ar reguliavimo „prieš save“ režimu, agregato galią reguliuoja katilo kuro reguliatorius, o pagal turbinos slėgio nuokrypį nuo nustatytosios vertės koreguoja turbinos reguliatorius. Turbinos reguliavimo mechanizmo pagalba jis keičia turbinos darbo tašką. Šio režimo metu agregatas gali dalyvauti tik pradinėje pirminio reguliavimo fazėje, nes pakitus turbinos slėgiui turbinos reguliatorius keičia darbo tašką priešinga kryptimi negu pirminis reguliatorius. Agregatas gali dalyvauti antriniame dažnio reguliavime pagal centrinio reguliatoriaus signalą keisdamas agregato (katilo ir turbinos) nustatytąją galią. Agregato, dirbančio pastovaus slėgio valdymo režimu, modelio schema parodyta 7 pav. Čia turbinos reguliatio-



7 pav. Generatorinio agregato pastovaus slėgio režimo modeliavimo schema



8 pav. Generatorinio agregato koordinuoto valdymo režimo modeliavimo schema

riaus modelio schemoje įvesta fazinės korekcijos grandis, modeliuojanti šiuolaikinių reguliavimo sistemų specifiką. Turbinos darbo tašką keičiančio mechanizmo, pagalbinio variklio modelis yra integravimo grandis su integravimo laiko pastoviąja T_p , turintis turbinos galios P_{T0} ir galios keitimo greičio ribotuvus. Katilo modelį sudaro integravimo grandis, kurios integravimo laiko pastovioji yra lygi katilo šiluminės inercijos laiko pastoviajai T_K , garo slėgio nuostolių modelis su proporcingumo koeficientu $K_{\Delta p}$ ir kuro sistemos modelis, modeliuojantis kuro padavimo vėlavimo laiką T_{kr} ir degimo proceso inerciją, įvertinančią šilumos atidavimą iš liepsnos į vamzdžių metalą ir iš metalo į vandenį bei garą laiko pastoviąsias T_V ir T_W . Slėgio reguliavimo modelyje yra dvi grandys per turbinos darbo taško keitimo pagalbinio variklio modelį koreguojančios turbinos darbo tašką P_{T0} : nejautrumo zonos grandis, modeliuojanti leistinas slėgio nuokrypio ribas, ir proporcingumo koeficiento K_p grandis.

Koordinuoto reguliavimo režime agregato galią reguliuoja turbinos reguliatorius, o turbinos slėgio nuokrypi nuo nustatytosios vertės koreguoja katilo kuro reguliatorius. Kuro reguliatorius yra proporcinio-integrinio tipo ir veikia tol, kol atstato turbinos slėgį iki leistinų ribų. Koordinuoto reguliavimo režime suderinamas turbinos galios keitimo greitis ir kuo tolydesnis kuro reguliavimas.

Šio režimo metu agregatas gali dalyvauti pirminiame ir antriniame reguliavime.

Agregato koordinuoto reguliavimo režimo modelio schema parodyta 8 pav. Čia kuro srauto koregavimo pagal turbinos slėgio nuokrypį reguliatoriaus proporcinės

grandies stiprinimo koeficientas yra $K_I \times T_L$, integravimo grandies – K_p , o fazinės korekcijos grandies laiko pastoviosios – T_R ir T_{R1} .

Tikrinant generatorinio agregato režimų modelių veikimą buvo tirta šiluminės elektrinės agregato režimo parametrų kitimas reaguojant į šuolinį dažnio pokytį. Šiam dažninės reakcijos tyrimui buvo panaudotas MathWorks Simulink® programinis paketas.

Šiluminės elektrinės generatorinio agregato modelio greičio reguliatoriaus, turbinos ir katilo dalies modelio parametrai nustatyti identifikuojant Mažeikių elektrinės 80 MW generatorinio agregato eksperimentinius duomenis. Katilo kuro reguliavimo dalies modelio parametrai parinkti ekspertiniu būdu. Reikiamos reguliatoriaus parametrų vertės turėtų būti parinktos optimizuojant katilo režiminių parametrų kitimą galimų sunkiausių avarinių režimų metu.

Prieš trikdį generavimo agregatas dirbo 75 % apkroviu.

Agregato modelių parametrų vertės santykiniais vienetais esant vardinei agregato galiai: $r = 0,05$; $T_1 = 5$ s; $T_2 = 1$ s; $T_{SV} = 0,2041$ s; $V_{maks} = 0,3$; $V_{min} = -0,3$; $\mu_{maks} = 0,9$; $\mu_{min} = 0,2$; $T_{GD} = 0,1$ s; $K_A = 0,068$; $T_p = 0,752$ s; $K_V + K_Z = 0,932$; $K_{PT} = 1$; $T_I = 1$; $R_{maks} = 0,00011$; $R_{min} = -0,00011$; $L_{maks} = 0,9$; $L_{min} = 0,2$; $K_{\Delta p} = 0,2$; $K_p = 0,1$; $p_{nust} = 1,0$; $T_K = 390$ s; $K_I = 0,04$; $T_L = 70$ s; $T_R = 30$ s; $T_{R1} = 3$ s; $C_{maks} = 1,1$; $C_{min} = -0,8$ (kuro srauto ribos); $T_{Ku} = 13$ s; $T_V = 0$; $T_W = 0$; $\Delta_{pn} = 0$ (slėgio reguliatoriaus nejautros zona); $P_{Tnust} = 0,75$.

Atskirų valdymo režimų generatorinio agregato pagrindinių parametrų kitimas reaguojant į šuolinį $-0,5$ % dažnio

pokytį parodytas 9–12 pav. Turbinos galios, slėgio, pagrindinio valdymo vožtuvo ploto ir kuro srauto kitimo kreivės pateiktos 1 000 s ribose. Dėl santykinai didelės katilo šiluminės inercijos laiko pastoviosios T_K kai kurių parametru kitimo kreivės yra gana lėkštos, tačiau parametru vertės eksponentiškai ar svyrudamos artėja prie stacionarių jų reikšmių.

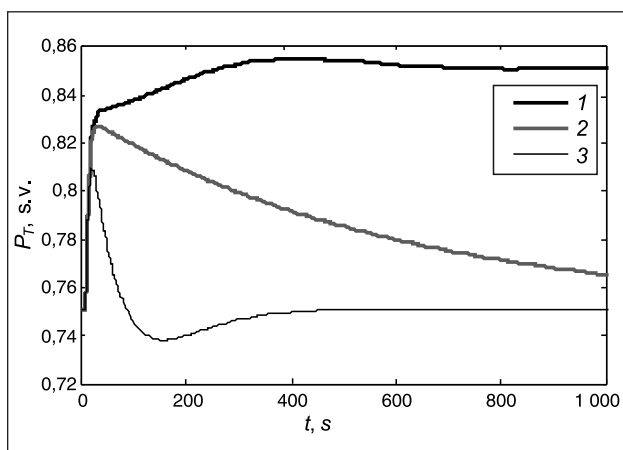
Iš 9 ir 10 pav. kreivių matyti, kad pastovaus slėgio ir koordinuoto reguliavimo režimų turbinos galios ir slėgio kitimas yra analogiškas realių agregatų galios ir garo slėgio kitimui dirbant analogiškais režimais.

Agregatui dirbant pastovios galios režimu, padidėjus pradinei galiai, greičio regulatoriui padidinus pagrindinio reguliavimo vožtuvo plotą, mažėja turbinos garo slėgis, o išliekant didesniai vožtuvo plotui, eksponentiškai mažėja turbinos galia iki prieš trikdį buvusios galios vertės, nes

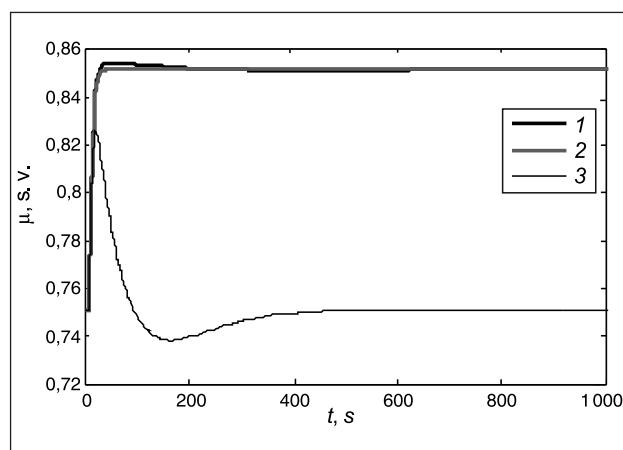
kuro srautas nereguliuojamas, išlieka toks pat kaip ir prieš trikdį.

Agregatui dirbant pastovaus slėgio režimu, turbinos slėgis atstatomas greičiausiai, nes slėgio reguliatorius mažina pagrindinio reguliavimo vožtuvo plotą ir turbinos galią iki mažesnių verčių už buvusias iki trikdžio, kol galiausiai nusistovi buvusiosios jų vertės.

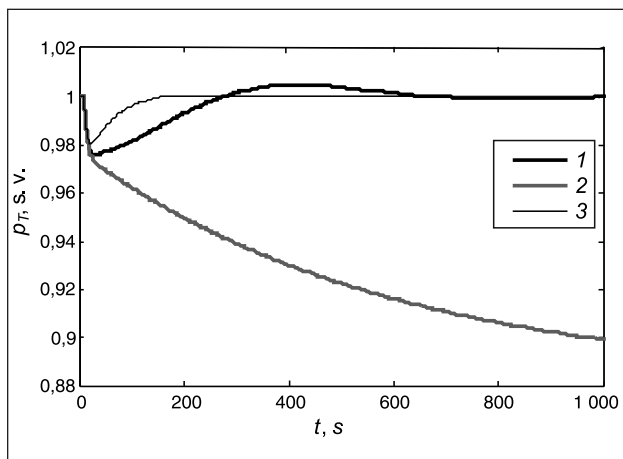
Agregatui dirbant koordinuoto reguliavimo režimu, turbinos slėgis atstatomas lėčiau, tačiau turbinos galia didėja labiausiai ir pasiekia bei išlaiko greičio reguliatorių užduotą vertę, nes reguliuojant kuro srautą padidėja katilo garo srautas ir jį atitinkanti turbinos galia. Vadinasi, agregatas gali dalyvauti pirminiame reguliavime. Tai atitinka ir mažų elektros energetikos sistemų reikalavimą, kad visi šiluminiai generatoriniai agregatai dirbtų koordinuoto reguliavimo režimu.



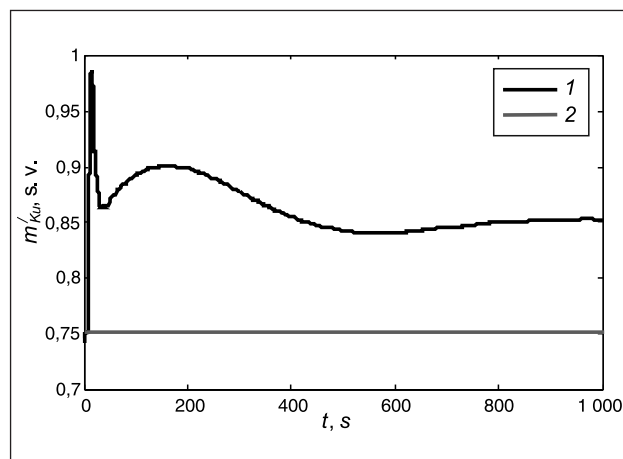
9 pav. Turbinos galios kitimas reaguojant į $-0,5\%$ šuolinį dažnio pokytį, kai generatorinis agregatas dirba koordinuoto reguliavimo režimu (1), pastovios galios režimu (2) ir pastovaus slėgio režimu (3)



11 pav. Turbinos pagrindinio valdymo vožtuvo ploto kitimas reaguojant į $-0,5\%$ šuolinį dažnio pokytį, kai generatorinis agregatas dirba koordinuoto reguliavimo režimu (1), pastovios galios režimu (2) ir pastovaus slėgio režimu (3)



10 pav. Turbinos garo slėgio kitimas reaguojant į $-0,5\%$ šuolinį dažnio pokytį, kai generatorinis agregatas dirba koordinuoto reguliavimo režimu (1), pastovios galios režimu (2) ir pastovaus slėgio režimu (3)



12 pav. Kuro srauto kitimas reaguojant į $-0,5\%$ šuolinį dažnio pokytį, kai generatorinis agregatas dirba koordinuoto reguliavimo režimu (1), pastovios galios ir pastovaus slėgio režimais (2)

IŠVADOS

1. Sudaryta šiluminės elektrinės generatorinio agregato turbinos su tarpiniu garo nuėmimu modelio schema, leidžianti tiksliau įvertinti katilo ir turbinos garo srautų bei turbinos galios dinamiką.

2. Sudaryta alternatyvi suprastinta turbinos dinaminio modelio schema.

3. Generatorinių agregatų režimų modeliai leidžia įvertinti skirtingo reguliavimo sudėtingumo agregatus vidutinės trukmės ir ilgalaikių elektros energetikos sistemos perinamųjų procesų tyrimuose.

Gauta 2011 10 04

Priimta 2012 01 18

Literatūra

1. Kundur P. *Power system stability and control*. New York: McGraw-Hill, 1994. 1176 p.
2. Zhao Z., Zheng F., Gao J., Xu L. A dynamic on-line parameter identification and full-scale system experimental verification for large synchronous machines. *IEEE Transactions on Energy Conversion.*, September, 1995. Vol. 10. No. 3. P. 392–398.
3. Shen M., Venkatasubramanian V., Abi-Samra N., Sobajic D. A new framework for estimation of generator dynamic parameters. *IEEE Transactions on Power Systems*, May, 2000. Vol. 15. No. 2. P. 756–763.
4. Ažubalis M., Ažubalis V., Jonaitis A., Ponelis R. Identification of parameters of synchronous generators' dynamic models. *Electrical and Control Technologies: Proceedings of the 4th International Conference, ECT 2009*. Kaunas: Technologija. 2009. P. 327–332.
5. 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.
6. Zimmer G. Modelling and simulation of steam turbine processes: individual models for individual tasks. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamic Systems*. 2008. Vol. 14. No. 6. P. 469–493.

Ramūnas Ponelis, Vaclovas Ažubalis

MODELING OF OPERATING CONDITIONS FOR THERMAL POWER PLANT UNITS

Summary

Accurate modeling of operating conditions for power plant generating units and their primary movers is essential for investigation of mid-term and long-term electromechanical transients and frequency stability. Accuracy is very important, especially for small power systems. In this article, principles of the development of steam turbine models with the intermediate steam extraction between the turbine sections or within them are presented. An alternative simplified scheme of the steam turbine model and model schemes for different operating conditions of the thermal power unit are presented too. Thermal power plant unit operating parameters variation curves showing the reaction to the frequency step illustrate different operating conditions modeling.

Key words: power system, generating unit, steam turbine model, steam extraction, boiler model, unit operating mode models

Рамунас Понялис, Вацловас Ажубалис

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АГРЕГАТОВ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Резюме

Точное моделирование генераторных агрегатов и их первичных двигателей является важным при исследовании длительных и средней длительности переходных электромеханических процессов и устойчивости частоты. Это очень важно для малых электроэнергетических систем. В этой статье представлены принципы моделирования турбин с промежуточным отбором пара, когда пар снимается между секциями турбины или внутри секции, представлена альтернативная упрощенная схема модели турбины, схемы моделей отдельных режимов работы генерирующих агрегатов тепловой электростанции. Реакция моделей режимов работы агрегатов на скачкообразное изменение частоты иллюстрируется на моделях тепловых электростанций.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, генерирующий агрегат, модель турбины, отбор пара, модель котла, модели режимов управления агрегата