

Elektros energetikos sistemos statinių dažninių charakteristikų parametru įvertinimas

**Vaclovas Ažubalis,
Albertas Nargėlas,
Almantas Bandza,
Audrius Jonaitis,
Mindaugas Ažubalis**

*Kauno technologijos universitetas,
Elektros sistemos katedra,
Studentų g. 48,
LT-51367 Kaunas*

Numatant elektros energetikos sistemos pirminio ir antrinio dažnio reguliavimo režimus, būtinus galios rezervus ar skaičiuojant dažnio pokyčius, pakitus generavimo ir apkrovų galių balansui, būtina žinoti statinių dažninių galios charakteristikų parametrus. Straipsnyje pateikiama metodika, įgalinanti įvertinti pagrindinių statinės dažninės charakteristikos parametru – statizmo ir statumo reikšmes pagal apkrovų ir generavimo agregatų statinius parametrus. Parodyta galimybė įvertinti neįtrauktas zonas, išjungiamų agregatų ir apkrovų įtaką visos sistemos parametrui. Įvertinti Baltijos JES ir Lietuvos elektros energetikos sistemos statinių dažninių charakteristikų parametrai skirtingų režimų metu.

Raktažodžiai: elektros energetikos sistema, statinė dažninė charakteristika, statizmas, statumas, generavimo agregatai, neįtraukimo zona, apkrovos

1. ĮVADAS

Restruktūrizuojant ir privatizuojant elektros energetikos įmones vis aktualesnis tampa dažnio ir galių srautų valdymo bei galios kokybės klausimas. Tai kelia papildomus reikalavimus sistemos operatoriaus darbo planavimui ir dispečeriniam elektros sistemų režimų valdymui. Kartu kyla papildomi reikalavimai elektros energetikos sistemų agregatų ir jų reguliavimo sistemų veikimui ir konstrukcijoms. Todėl planuojant elektros energetikos sistemos (ES) darbą reikia vis tiksliau žinoti elektros energetikos sistemos bei atskirų jos elementų – generavimo agregatų ir apkrovų dažnines charakteristikas [1]. Pagal jas galima nustatyti būtiną galios rezervo reikšmes, dažnio pokytį, kintant galių balansui tarp generuojamų galių ir apkrovų, normalių bei avarinių režimų metu.

Kadangi dažninių charakteristikų tyrimai gana sunkiai atliekami ir brangiai kainuoja, tokių eksperimentų buvo daroma mažai. Literatūros šaltiniai daugiausia remiasi 7–8 dešimtmečio tyrimų rezultatais. Pirmieji Baltijos jungtinės energetikos sistemos (JES) atsijungimo bandymai vykdyti išskiriant vieną Lietuvos elektrinės ir du Kruonio HAE agregatus autonomiam veikimui, patvirtino tokio veikimo galimybę, o 1995 m. vykdyto dalies Estijos ES ir Latvijos ES atjungimo nuo vieningos elektros energetikos sistemos bandymai jau leido nustatyti Baltijos ir Estijos elektrinių bei Rygos TEC-2 agregatų reguliatorių reguliavimo statizmą, buvo įvertintos daugumos Dauguvos kaskado hidroelektrinių reguliatorių statizmas bei neįtraukimo zonos. 2002 m. vykdytas

Baltijos JES atsiskyrimo eksperimentas palietė ir Lietuvos ES elektrines. Jo rezultatai atėity leis patikslinti ir Lietuvos ES elektrinių statinių ir dinaminių dažninių charakteristikų parametrus.

Šiame straipsnyje daugiausia dėmesio skiriama apkrovų bei generavimo galių statinių dažninių charakteristikų parametru tyrimui. Čia pateikti pagrindiniai dažninių charakteristikų parametru santykiai, jų kitimo išjungiant ar įjungiant generavimo agregatus ir apkrovas bei neįtraukimo zonų įtakos šiems parametrui įvertinimo išraiškos. Taip pat pateikiami Baltijos JES ir Lietuvos ES statinių dažninių charakteristikų parametru skaičiavimo rezultatai.

2. ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMOS AKTYVIOSIOS GALIOS STATINĖS DAŽNINĖS CHARAKTERISTIKOS IR JŲ PARAMETRAI

Elektros energetikos sistemos aktyviosios galios statinių dažninių charakteristikų tyrimo supaprastinimui tariama, kad ES generavimo galių, atskirų agregatų galių ir apkrovų galių kitimas kintant dažniui yra aprašomas šių elementų galių dažninėmis charakteristikomis. Statinės dažninės charakteristikos nusako galių dydžius nusistovėjusiuose skirtingo dažnio režimuose ar lėtai kintant dažniui. Statinių dažninių charakteristikų parametru galima išreikšti per atskirų generavimo ir apkrovos elementų ar jų grupių statinių dažninių charakteristikų parametrus.

Statiškai stabilus nusistovėjusio režimo metu, esant bet kuriam dažniui, išlaikomas generuojamų galių ir apkrovų galių balansas ($P_{Gf} = P_{Af}$). Šis ba-

lansas išlaikomas ir lėtai kintant dažniui ar nusistovėjus režimui po greito dažnio kitimo. Vadinasi, ES darbo taškas bus generavimo ir apkrovų galių dažnių charakteristikų susikirtimo taške.

Kadangi ES generavimo galia P_{Gf} yra lygi visų sistemos agregatų generavimo galių (P_{Gfi}) sumai, tai statinė ES generavimo galių dažninė charakteristika (SGDCh) bus sudaryta iš visų veikiančių agregatų galios statinių dažnių charakteristikų.

ES aktyviųjų galių statinės dažninės charakteristikos pagrindiniai rodikliai (parametrai) yra jos statumas (λ) ir atvirkščias jam dydis – statizmas (s).

Dažniausiai statumas yra išreiškiamas vardiniiais vienetais. SGDCh statumas λ_G bus:

$$\lambda_G = \frac{dP_{Gf}}{df} \cong \frac{\Delta P_{Gf}}{\Delta f} \text{ (MW/Hz)}; \quad (1)$$

čia Δf , ΔP_{Gf} – dažnio nuokrypis ir suminis generavimo galių pokytis veikiant pirminiams generavimo agregatų reguliatoriams.

Statumo išraiškos santykiniais vienetais (λ_{G^*}), pagal suminę generavimo agregatų vardinę galią $P_{GN\Sigma}$ ir procentais ($\lambda_{G\%}$) bus šios:

$$\lambda_{G^*} = \frac{\Delta P_{Gf^*}}{\Delta f^*} = \frac{\Delta P_{Gf}}{\Delta f} \cdot \frac{f_0}{P_{GN\Sigma}} = \lambda_G \cdot \frac{f_0}{P_{GN\Sigma}}, \quad (2)$$

$$\lambda_{G\%} = \lambda_{G^*} \cdot 100\% = \lambda_G \cdot \frac{f_0}{P_{GN\Sigma}} \cdot 100\%. \quad (3)$$

Statinės dažninės charakteristikos statizmas yra atvirkščias dydis statumui. Dažniausiai jis išreiškiamas santykiniais vienetais arba procentais. SGDCh statizmą (s_{G^*}) galima išreikšti

$$s_{G^*} = \frac{1}{\lambda_{G^*}} = \frac{\Delta f^*}{\Delta P_{Gf^*}} = \frac{\Delta f}{\Delta P_{Gf}} \cdot \frac{P_{GN\Sigma}}{f_0}, \quad (4)$$

$$s_{G\%} = \frac{\Delta f^*}{\Delta P_{Gf^*}} \cdot 100\% = s_{G^*} \cdot 100\%. \quad (5)$$

Vardiniiais vienetais statizmo išraiška bus

$$\begin{aligned} s_G &= \frac{1}{\lambda_G} = \frac{\Delta f}{\Delta P_{Gf}} = s_{G^*} \cdot \frac{f_0}{P_{GN\Sigma}} = \\ &= \frac{s_{G\%}}{100\%} \cdot \frac{f_0}{P_{GN\Sigma}} \text{ (Hz/MW)}. \end{aligned} \quad (6)$$

Kartais SGDCh statumas ir statizmas išreiškiami santykiniais vienetais ne pagal suminę generatorių vardinę galią $P_{GN\Sigma}$ bet pagal suminę apkrovą P_{A0} :

$$\begin{aligned} \lambda_{G^*A} &= \frac{\Delta P_{Gf^*A}}{\Delta f^*} = \frac{\Delta P_{Gf}}{\Delta f} \cdot \frac{f_0}{P_{A0}} = \\ &= \lambda_{G^*} \cdot \frac{P_{GN\Sigma}}{P_{A0}} = \frac{\lambda_{G^*}}{P_{A0^*}} = \lambda_G \cdot \frac{f_0}{P_{A0}}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} s_{G^*A} &= \frac{\Delta f^*}{\Delta P_{Gf^*A}} = \frac{\Delta f}{\Delta P_{Gf}} \cdot \frac{P_{A0}}{f_0} = \\ &= s_{G^*} \cdot \frac{P_{A0}}{P_{GN\Sigma}} = s_G \cdot \frac{P_{A0}}{f_0}. \end{aligned} \quad (8)$$

Statizmas, kaip ir statumas, yra neigiamas dydis. Tai parodo, kad mažėjant dažniui ($\Delta f < 0$), generavimo galia didinama ($\Delta P_{Gf} > 0$), o didėjant dažniui ($\Delta f > 0$), ji mažinama ($\Delta P_{Gf} < 0$).

SGDCh tiesinės dalies statizmą ir statumą nulemia pirminiame reguliavime dalyvaujančių agregatų reguliatorių statizmai (s_{Gi}):

$$\begin{aligned} s_{G^*} &= \frac{\Delta f^*}{\Delta P_{Gf^*}} = \frac{\Delta f^* \cdot P_{GN\Sigma}}{\sum_{i=1}^n \Delta P_{Gfi}} = \\ &= \frac{\Delta f^* \cdot P_{GN\Sigma}}{\Delta f^* \cdot \sum_{i=1}^n \frac{P_{GNi}}{s_{Gi^*N}}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{P_{GNi^*}}{s_{Gi^*N}}}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$P_{GN\Sigma} = \sum_{i=1}^n P_{GNi}, \quad \Delta P_{Gf} = \sum_{i=1}^n \Delta P_{Gfi},$$

$$P_{GNi^*} = \frac{P_{GNi}}{P_{GN\Sigma}}, \quad \Delta P_{Gf^*} = \frac{\Delta P_{Gf}}{P_{GN\Sigma}};$$

čia P_{GNi} , P_{Gmi^*} , ΔP_{Gfi} , s_{Gi^*N} – i -ojo agregato vardinė galia, jos santykinis dydis, generuojamos galios pokytis ir statizmas santykiniais vienetais, esant vardinėms sąlygoms.

SGDCh statizmas vardiniiais vienetais per atskirų agregatų statizmus s_{Gi} išreiškiamas taip:

$$s_G = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{s_{Gi}}} \text{ (Hz/MW)}. \quad (10)$$

Jei visi agregatai dalyvauja pirminiame dažnio reguliavime ir jų reguliatorių statizmai yra vienodi, tai SGDCh statizmas irgi bus toks pat. Jei ne visi agregatai dalyvauja pirminiame dažnio reguliavime, SGDCh statizmas bus didesnis ir atvirkščiai proporcingas santykiniai suminei vardinei pirminiame reguliavime dalyvaujančių agregatų galiai P_{GNR^*} :

$$\begin{aligned} s_{G^*} &= \frac{s_{Gi^*N}}{\sum_{i=1}^R \frac{P_{GNi}}{P_{GN\Sigma}}} = \frac{s_{Gi^*N}}{P_{GNR^*}}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$P_{GNR^*} = \sum_{i=1}^R \frac{P_{GNi}}{P_{GN\Sigma}};$$

čia R – pirminiame reguliavime dalyvaujančių agregatų skaičius.

Pavyzdžiui, jei agregatų $s_{Gi^*N} = 0,05$ (5%), o pirminiame reguliavime dalyvauja pusė generatorių, $P_{GNR^*} = 0,5$, tai suminis statizmas bus 0,1 (10%).

Jei atskirų agregatų reguliatorių statizmai yra nevienodi, bet visi agregatai dalyvauja pirminiame dažnio reguliavime, tai SGDCh statizmas bus tarp mažiausios ir didžiausios atskirų agregatų statizmo reikšmės, jei ne visi dalyvauja – tai jis bus didesnis už mažiausią atskirų agregatų statizmo reikšmę.

SGDCh statusas λ_G vardiniais vienetais bus lygus atskirų agregatų statumų λ_{Gi} sumai:

$$\lambda_G = \sum_{i=1}^n \lambda_{Gi} \quad (\text{MW/Hz}). \quad (12)$$

SGDCh statusas santykiniais vienetais ir procentais gali būti taip išreikšti per atskirų agregatų statumus λ_{Gi^*N} :

$$\begin{aligned} \lambda_{G^*} &= \frac{\Delta P_{Gf^*}}{\Delta f^*} = \frac{\Delta f^* \cdot \sum_{i=1}^n \lambda_{Gi^*N} \cdot P_{GNi}}{\Delta f^* \cdot P_{GN\Sigma}} = \\ &= \sum_{i=1}^n \lambda_{Gi^*N} \cdot P_{GNi^*}. \end{aligned} \quad (13)$$

Jei visi agregatai dalyvauja pirminiame dažnio reguliavime ir jų reguliatorių statumai santykiniais vienetais yra vienodi, tai ir SGDCh statusas santykiniais vienetais bus toks pat, jei nevienodi, tai SGDCh statusas bus tarp didžiausios ir mažiausios reikšmių, o jei ne visi agregatai dalyvauja pirminiame dažnio reguliavime, tai tegalima tvirtinti, kad SGDCh statusas bus dar mažesnis ir mažesnis už didžiausią statumą (iš visų agregatų). Agregatų, nedalyvaujančių pirminiame dažnio reguliavime, statumai yra lygūs nuliui, $\lambda_{Gi} = \lambda_{Gi^*N} = 0$.

Jei visų pirminiame dažnio reguliavime dalyvaujančių agregatų statumai yra vienodi ($\lambda_{Gi^*N} = \lambda_{G^*N} = \text{const.}$), tai sistemos SGDCh statusas priklausys nuo pirminiame reguliavime dalyvaujančių agregatų santykinės suminės vardinės galios P_{GNR^*} :

$$\begin{aligned} \lambda_{G^*} &= \frac{\lambda_{G^*N} \cdot \sum_{i=1}^R P_{GNi}}{P_{GN\Sigma}} = \lambda_{G^*N} \cdot \frac{P_{GNR}}{P_{GN\Sigma}} = \\ &= \lambda_{G^*N} \cdot P_{GNR^*}. \end{aligned} \quad (14)$$

ES regiono ar apkrovų mazgų aktyviosios galios yra lygios visų jų apkrovų aktyviųjų galių sumai. Kadangi ES dažnis kinta gana siaurame diapazone – 50 ± 5 Hz, santykiniais dydžiais tai būtų – $1 \pm 0,1$, praktiniuose skaičiavimuose visoms apkrovoms galima taikyti tiesinę dažninę priklausomybę. Vadinasi, atskirų apkrovų galių (P_{Afi}) ir visos ES apkrovų galių (P_{Af}) statinės dažninės charakteristikos bus tiesinės

$$P_{Afi} = P_{Ai} + \lambda_{Ai} \cdot \Delta f = P_{Ai} \cdot (1 + \lambda_{Ai^*} \cdot \Delta_{f^*}) = P_{Ai} + \Delta P_{Afi} \quad (15)$$

$$P_{Af} = P_{AO} + \lambda_A \cdot \Delta f = P_{AO} \cdot (1 + \lambda_{A^*} \cdot \Delta_{f^*}) = P_{AO} + \Delta P_{Af} \quad (16)$$

čia P_{Afi} , P_{AO} – atskirų imtuvų ir visos ES apkrovų aktyviosios galios esant vardiniam dažniui;

λ_{Ai} , λ_{Ai^*} , λ_A , λ_{A^*} – atskirų imtuvų ir visos ES apkrovų galių statinių dažninių charakteristikų statumai vardiniais ir santykiniais dydžiais.

Literatūroje apkrovų galių statinių dažninių charakteristikų (SADCh) statumai dažniausiai vadinami apkrovų aktyviųjų galių reguliavimo efektais pagal dažnį.

Išreiškiant apkrovų galių statumus vardiniais dydžiais, suminių mazgo, regiono ar sistemos SADCh statumai surandami sudedant atskirų apkrovų statumus:

$$\lambda_A = \sum_{i=1}^m \lambda_{Ai} \quad (\text{MW/Hz}). \quad (17)$$

Dažniausiai atskirų apkrovų SADCh statumai išreiškiami santykiniais dydžiais λ_{Ai^*} :

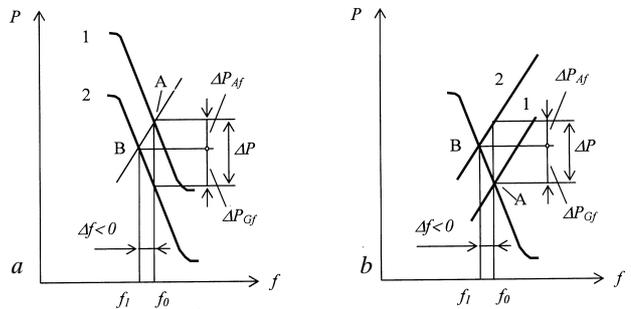
$$\lambda_{Ai^*} = \frac{\Delta P_{Afi}}{P_{Ai}} : \frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\Delta P_{Afi^*}}{\Delta f^*}. \quad (18)$$

Tada

$$\lambda_{A^*} = \frac{\Delta f^* \cdot \sum_{i=1}^m \lambda_{Ai^*} \cdot P_{Ai}}{\Delta f^* \cdot P_{AO}} = \sum_{i=1}^m \lambda_{Ai^*} \cdot P_{Ai^*}; \quad (19)$$

čia P_{Ai^*} , m – santykinė i -osios apkrovos dalis suminėje apkrovoje ir bendras apkrovų skaičius.

Dėl pirminio galių nebalanso ΔP elektros sistemoje atsiradus dažnio pokyčiui Δf kinta jos generavimo (pagal SGDCh) bei apkrovų (pagal SADCh) galia ir kompensuoja pirminį galių nebalansą ΔP . Pav. parodomi dažniausiai pasitaikantys pirminio galios nebalanso ΔP atvejai: netekus generatoriaus (pav., a) ir staiga padidėjus apkrovai (pav., b).



Pav. Elektros energetikos sistemos generuojamų galių ir apkrovų reakcija netekus generatoriaus (a) bei staiga padidėjus apkrovų galiai (b). A, B – pradinis ir galinis ES darbo taškai; 1, 2 – pradinės ir galinės generuojamų galių bei apkrovų dažninės charakteristikos, ΔP – pirminis galių nebalansas, ΔP_{Gf} , ΔP_{Af} – generavimo ir apkrovos galių pokyčiai, f_0 , f_1 , Δf – pradinis ir galinis dažniai bei dažnio pokytis

Galiniame režime ES darbo tašką nulemia šio režimo generuojamų galių ir apkrovų dažninės charakteristikos. Netekus generatoriaus ir sumažėjus dažniui, dėl apkrovų galių sumažėjimo generuojama galia sumažėja dydžiu ΔP_{Af} ir pirminių reguliatorių atstatoma galia ΔP_{Gf} bus mažesnė už netekto generatoriaus galią ΔP . Analogiškai, staiga padidėjus galiai ir sumažėjus dažniui apkrovų galia padidėja dydžiu ΔP_{Gf} mažesniu už pradinį apkrovos padidėjimą. Abiem atvejais

$$\Delta P_{Gf} = \Delta P - \Delta P_{Af} \quad (20)$$

ES bendros aktyviosios galios statinės dažninės charakteristikos statusas λ vardinais dydžiais būtų lygus naujojo (galinio) režimo SGDCh ir SADCh statumų skirtumui:

$$\lambda = \frac{\Delta P}{\Delta f} = \frac{\Delta P_{Gf} - \Delta P_{Af}}{\Delta f} = \lambda_{G^*} - \lambda_{A^*} \quad (\text{MW/Hz}). \quad (21)$$

Kadangi santykiniais dydžiais SGDCh statusas išreikštas per suminę generatorių vardinę galią ($P_{GN\Sigma}$), o apkrovų per suminę apkrovų galią P_{AO^*} , tai λ santykiniais vienetais, išreiškiant per $P_{GN\Sigma}$ bus

$$\lambda_* = \frac{\Delta P_*}{\Delta f_*} = \frac{\Delta f_* \cdot (\lambda_{G^*} \cdot P_{GN\Sigma} - \lambda_{A^*} \cdot P_{AO^*})}{\Delta f_* \cdot P_{GN\Sigma}} = \lambda_{G^*} - \frac{\lambda_{A^*}}{K_{rez}} = \lambda_{G^*} - \lambda_{A^*} \cdot P_{AO^*}, \quad (22)$$

$$K_{rez} = \frac{P_{GN\Sigma}}{P_{AO}}, \quad (23)$$

$$P_{AO^*} = \frac{P_{AO}}{P_{GN\Sigma}} = \frac{1}{K_{rez}}; \quad (24)$$

čia P_{AO^*} , K_{rez} – santykinis ES apkrautumas ir rezervo koeficientas.

Išreiškiant santykiniais dydžiais pagal suminę apkrovos galią

$$\lambda_{*A} = \lambda_{G^*} \cdot K_{rez} - \lambda_{A^*} = \frac{\lambda_{G^*}}{P_{AO^*}} - \lambda_{A^*}. \quad (25)$$

Generavimo galių SGDCh statusas λ_{G^*} yra neigiamas, o aktyviųjų apkrovų SADCh statusas λ_{A^*} dažniausiai teigiamas. Todėl paprastai ES bendros aktyviosios galios statinės dažninės charakteristikos statusas absoliutiniu dydžiu bus didesnis už generuojamų galių SGDCh statumą.

ES bendrosios aktyviosios galios charakteristikos statusas s_* bus:

$$s_* = \frac{\Delta f_*}{\Delta P_*} = \frac{\Delta f_*}{\frac{\Delta P_{Gf} - \Delta P_{Af}}{P_{GN\Sigma}}} = \frac{1}{\frac{1}{s_{G^*}} - \lambda_{A^*} \cdot P_{AO^*}}. \quad (26)$$

Išreiškiant santykiniais dydžiais pagal suminę apkrovų galią

$$s_{*A} = \frac{1}{\frac{1}{s_{G^*} \cdot P_{AO^*}} - \lambda_{A^*}} = \frac{1}{\frac{K_{rez}}{s_{G^*}} - \lambda_{A^*}}. \quad (27)$$

Kadangi s_{G^*} yra neigiamas, tai dėl apkrovų įtakos ES bendras statusas absoliutiniu dydžiu bus mažesnis už generuojamų aktyviųjų galių statusą s_{G^*} absoliutiniu dydžiu.

Išjungiant generavimo agregatus ar apkrovas didelės galios sistemoje jos dažninės charakteristikos parametrai pakinta labai nežymiai. Tačiau mažos galios elektros energetikos sistemoje (Baltijos JES ar Lietuvos ES) tokie išjungimai gali pastebimai pakeisti dažninės charakteristikos statuso ir statizmo reikšmes.

Išjungiant agregatą, dalyvaujantį pirminiame reguliavime, kinta visi parametrai, nes pakinta likusiųjų generavimo agregatų reakcija į dažnio pokytį. Likusiųjų generavimo agregatų parametrai vardiniai ir santykiniais vienetais bus

$$\lambda_{G^*} = \lambda_{G^*} - \lambda_{AG} \quad (\text{MW/Hz}), \quad (28)$$

$$s_{G^*} = \frac{1}{\frac{1}{s_G} - \frac{1}{s_{AG}}} \quad (\text{Hz/MW}), \quad (29)$$

$$\lambda_{G^*A^*} = \frac{\Delta P_{G^*}}{P_{AO^*} \cdot \Delta f_*} = \frac{\lambda_{G^*} - \lambda_{AGN^*} \cdot P_{AGN^*}}{P_{AO^*}}, \quad (30)$$

$$s_{G^*A^*} = \frac{P_{AO^*}}{\frac{1}{s_{G^*}} - \frac{P_{AGN^*}}{s_{AG^*N}}} \quad (31)$$

ir visos likusios sistemos –

$$\lambda_{G^*} = \lambda - \lambda_{AG} \quad (\text{MW/Hz}), \quad (32)$$

$$s_{G^*} = \frac{1}{\frac{1}{s_G} - \frac{1}{s_{AG}} - \lambda_A} \quad (\text{Hz/MW}), \quad (33)$$

$$\lambda_{*A^*} = \frac{\lambda_{G^*} - \lambda_{AG^*N} \cdot P_{AGN^*}}{P_{AO^*}} - \lambda_{A^*}, \quad (34)$$

$$s_{*A\infty} = \frac{P_{AO*}}{1 - \frac{P_{AGN*}}{s_{G*}} - \lambda_{A*}}, \quad (35)$$

$$P_{AGN*} = \frac{P_{AGN}}{P_{GN\Sigma}}; \quad (36)$$

čia λ_{AG} , λ_{AG^*} , s_{AG} , s_{AG^*N} , P_{AGN} , P_{AGN^*} – išjungiamo agregato SGDCh statusas ir statizmas vardiniams bei santykiniais dydžiais ir jo vardinė galia bei santykinė jos reikšmė.

Išjungus agregatą, nedalyvaujantį pirminiame dažnio reguliavime, likusiųjų generavimo galių ir sistemos dažniųjų charakteristikų statumai bei statizmai, išreikšti vardiniams ir santykiniais vienetais, esant bazinei apkrovų galiai P_{A0} , nepakis ($\lambda_{G\infty} = \lambda_{G^*}$, $s_{G\infty} = s_{G^*}$, $\lambda_{\infty} = \lambda$, $s_{\infty} = s$, $\lambda_{G^*A\infty} = \lambda_{G^*A}$, $s_{G^*A\infty} = s_{G^*A}$, $\lambda_{*A\infty} = \lambda_{*A}$, $s_{*A\infty} = s_{*A}$).

Tačiau, jei bazinė galia bus $P_{GN\Sigma}$, jų reikšmės keisis:

$$\lambda_{G^*\infty} = \lambda_{G^*} \cdot \frac{P_{GN\Sigma}}{P_{GN\Sigma} - P_{AGN}} = \lambda_{G^*} \cdot \frac{1}{1 - P_{AGN^*}}, \quad (37)$$

$$s_{G^*\infty} = s_{G^*} \cdot (1 - P_{AGN^*}), \quad (38)$$

$$\lambda_{*\infty} = \lambda_* \cdot \frac{1}{1 - P_{AGN^*}}, \quad (39)$$

$$s_{*\infty} = s_* \cdot (1 - P_{AGN^*}). \quad (40)$$

Išjungiant apkrovos mazgą ar jų grupę, kurių suminė aktyvioji galia yra P_{AA} , o dažninės charakteristikos statusas λ_{AA} , likusių apkrovų statusas $\lambda_{A\infty}$ pakinta:

$$\lambda_{A\infty} = \lambda_A - \lambda_{AA} \quad (\text{MW/Hz}), \quad (41)$$

$$\lambda_{A^*\infty} = \frac{\Delta P_{A\infty}}{(P_{AO} - P_{AA})\Delta f_*} = \frac{\lambda_{A^*} - \lambda_{AA^*} \cdot P_{AA^*A}}{1 - P_{AA^*A}}, \quad (42)$$

$$P_{AA^*A} = \frac{P_{AA}}{P_{AO}}; \quad (43)$$

čia P_{AA^*A} , λ_{AA^*} – išjungtos apkrovos santykinis aktyviosios galios dydis ir dažninės charakteristikos statusas, esant vardinėms sąlygoms.

Visos likusios sistemos statumo ir statizmo išraiškos bus:

$$\lambda_{\infty} = \lambda_G - (\lambda_A - \lambda_{AA}) = \lambda + \lambda_{AA} \quad (\text{MW/Hz}), \quad (44)$$

$$s_{\infty} = \frac{1}{\frac{1}{s_G} - \lambda_A + \lambda_{AA}} \quad (\text{Hz/MW}), \quad (45)$$

$$\lambda_{*A\infty} = \lambda_{G^*A\infty} - \lambda_{A^*\infty} = \frac{\lambda_{G^*}}{P_{AO^*} \cdot (1 - P_{AA^*A})} - \frac{\lambda_{A^*} - \lambda_{AA^*} \cdot P_{AA^*A}}{1 - P_{AA^*A}}, \quad (46)$$

$$s_{*A\infty} = \frac{1}{\frac{1}{s_{G^*A\infty}} - \lambda_{A^*\infty}} = \frac{1 - P_{AA^*A}}{\frac{1}{s_{G^*} \cdot P_{AO^*}} - \lambda_{A^*} + \lambda_{AA^*} \cdot P_{AA^*A}}, \quad (47)$$

$$s_{G^*A\infty} = \frac{\Delta f_*}{\frac{\Delta P_G}{P_{AO} - P_{AA}}} = \frac{\Delta f_*}{\frac{\Delta f_* \cdot P_{GN\Sigma}}{s_{G^*} \cdot (P_{AO} - P_{AA})}} = s_{G^*} \cdot P_{AO^*} \cdot (1 - P_{AA^*A}); \quad (48)$$

čia $s_{G^*A\infty}$ – generavimo agregatų statizmas likusioje sistemoje, kai bazinė galia lygi likusių apkrovų galiai $P_{A0} - P_{AA}$.

Jei išjungtos apkrovos dažninės charakteristikos santykinis statusas yra lygus vidutiniam sistemos apkrovų santykiniam statumui $\lambda_{AAP^*} = \lambda_{AP^*}$, likusios sistemos apkrovų statusas santykiniais vienetais bus toks pat $\lambda_{A^*\infty} = \lambda_{A^*}$.

Jei išjungtos apkrovos galia nepriklauso nuo dažnio, tai likusios sistemos apkrovų dažninės charakteristikos statusas, išreikštas vardiniams vienetais, nepakis ($\lambda_{AP\infty} = \lambda_{AP}$ (MW/Hz)), tačiau statumo ir statizmo išraiškos santykiniais vienetais keisis:

$$\lambda_{A^*\infty} = \frac{\lambda_{A^*}}{1 - P_{AA^*A}}, \quad (49)$$

$$\lambda_{*A\infty} = \frac{\lambda_{G^*}}{P_{AO^*} \cdot (1 - P_{AA^*A})} - \frac{\lambda_{A^*}}{1 - P_{AA^*A}}, \quad (50)$$

$$s_{*A\infty} = \frac{1 - P_{AA^*A}}{\frac{1}{s_{G^*} \cdot P_{AO^*}} - \lambda_{A^*}}. \quad (51)$$

Bendruoju atveju, išjungiant ir įjungiant generavimo agregatus bei apkrovas, likusios sistemos dažninės charakteristikos statumo ir statizmo išraiškos bus:

$$\lambda_{\infty} = \lambda_G - \lambda_{AG} + \lambda_{PG} - \lambda_A + \lambda_{AA} - \lambda_{PA} \quad (\text{MW/Hz}), \quad (52)$$

$$s_{\infty} = \frac{1}{\frac{1}{s_G} - \frac{1}{s_{AG}} + \frac{1}{s_{PG}} - \lambda_A + \lambda_{AA} - \lambda_{PA}} \quad (\text{Hz/MW}), \quad (53)$$

$$\lambda_{*\infty} = \frac{1}{1 - P_{AA^*A} + P_{PA^*A}} \cdot \left(\frac{\lambda_{G^*} - \lambda_{AG^*N} \cdot P_{AGN^*} + \lambda_{PG^*N} \cdot P_{PGN^*}}{P_{AO^*}} - \lambda_{A^*} + \lambda_{AA^*} \cdot P_{AA^*A} - \lambda_{PA^*} \cdot P_{PA^*A} \right), \quad (54)$$

$$s_{*\infty} = \frac{1 - \frac{1}{P_{AO^*}} \left(\frac{1}{s_{G^*}} - \frac{P_{AGN^*}}{s_{AG^*N}} + \frac{P_{PGN^*}}{s_{PG^*N}} \right) - \frac{-P_{AA^*A} + P_{PA^*A}}{-\lambda_{A^*} + \lambda_{AA^*} \cdot P_{AA^*A} - \lambda_{PA^*} \cdot P_{PA^*A}}}{-P_{AA^*A} + P_{PA^*A}}; \quad (55)$$

čia P_{PA^*A} , P_{PGN^*} , λ_{PG^*N} , λ_{PA^*} , s_{PG^*N} – santykinės įjungtų apkrovų galių, įjungtų generavimo agregatų vardinių galių, statumų ir statizmų reikšmės;

P_{AA^*A} , P_{AGN^*} , λ_{AG^*N} , λ_{AA^*} , s_{AG^*N} – santykinės išjungtų apkrovų galių, išjungtų generavimo agregatų vardinių galių, statumų ir statizmų reikšmės.

Išraiškos (52)–(55) gali būti prastinamos. Jei išjungtas ar įjungtas generavimo agregatas nedalyvauja pirminiame reguliavime, tai $\lambda_{AG} = 0$, $\lambda_{AG^*N} = 0$, $\lambda_{PG} = 0$, $\lambda_{PG^*N} = 0$ ir $s_{AG} \rightarrow \infty$, $s_{AG^*N} \rightarrow \infty$, $s_{PG} \rightarrow \infty$, $s_{PG^*N} \rightarrow \infty$.

Jei išjungtos ar įjungtos apkrovos aktyvioji galia nepriklauso nuo dažnio, tai $\lambda_{AA} = 0$, $\lambda_{AA^*} = 0$, $\lambda_{PA} = 0$, $\lambda_{PA^*} = 0$.

Jei neišjungta ar neįjungta jokia apkrova, tai $P_{AA} = 0$, $P_{AA^*A} = 0$, $P_{PA} = 0$, $P_{PA^*A} = 0$.

Jei neišjungtas ar neįjungtas generavimo agregatas, tai $P_{AGN} = 0$, $P_{AGN^*} = 0$, $P_{PGN} = 0$, $P_{PGN^*} = 0$.

Šios išraiškos gali būti panaudotos po automatinio dažninio nukrovimo (ADN) veikimo likusios sistemos statumui ir statizmui įvertinti. Tik čia tenka prisiminti, kad didžiausias dažnio nuokrypis ir pradėjusios veikti ADNI eilė bei išjungtos apkrovos galia priklauso ne tik nuo suminio galių deficito ΔP , sudaryto iš išjungtų ir įjungtų generavimo agregatų bei apkrovų galių

$$\Delta P = P_{AG} - P_{PG} - P_{AA} + P_{PA} \quad (56)$$

bet ir nuo likusių generavimo agregatų dinaminį parametrų.

3. GENERAVIMO AGREGATŲ NEJAUTRUMO ZONOS ĮVERTINIMAS

Šiuolaikinės elektroninės ir skaitmeninės generavimo agregatų reguliavimo sistemos turi mažą nejautrumo zoną (mažesnę už $\pm 0,01$ Hz) ir ji praktiškai neturi įtakos reguliavimo procesui.

Ankstesnės kartos mechaninių-hidraulinių reguliavimo sistemų nejautrumo zonos yra kur kas didesnės (0,15 Hz ir daugiau) ir jas reikia vertinti nustatant ES parametrus.

Nejautrumo zona įvertinama skirtingai esant mažiems dažnio nuokrypiams, kai dažnio nuokrypis yra mažesnis už pusę nejautrumo zonos ε , $\Delta f \leq \varepsilon$, ir kai jis didesnis, $\Delta f \geq \varepsilon$ [2].

Dydis ε ir dažnio nuokrypis $\Delta f = \varepsilon$, atitinkantis galių disbalansą $\Delta P_{G\varepsilon}$, gali būti surandami pagal sistemos vidutinę nejautrumo zoną $\Delta f_{n.vid}$.

$$\varepsilon = \frac{\Delta f_{n.vid}}{2} = \frac{1}{P_{GNR^*}} \cdot \sum_{i=1}^R \varepsilon_i \cdot P_{GNI^*}, \quad (57)$$

$$\Delta P_\varepsilon = \left| \varepsilon \left(\frac{\lambda_G}{2} - \lambda_A \right) \right|; \quad (58)$$

čia R , P_{GNR^*} – pirminiame reguliavime dalyvaujančių generavimo agregatų skaičius, jų santykinė suminė vardinė galia, tariant, jog bazinė yra suminė visų agregatų, arba likusių agregatų, vardinė galia, jei buvo atjungtas nors vienas agregatas,

λ_G , λ_A – generavimo agregatų ir apkrovų (likusių, jei buvo atjungtas nors vienas iš jų) statumai.

Esant mažiems dažnio nuokrypiams ($\Delta f \leq \varepsilon$) ir mažam galių disbalansui (ΔP , $\Delta P \leq \Delta P_\varepsilon$), realūs, tikėtiniausi sistemos statusas λ_r ir statizmas s_r skaičiuojami taip:

$$\lambda_r = \lambda_{Gr} - \lambda_A = -\frac{\lambda_A}{2} - \sqrt{\left(\frac{\lambda_A}{2} \right)^2 + \frac{\Delta P}{\Delta P_\varepsilon + \varepsilon \cdot \lambda_A} \cdot \left(\frac{\lambda_G}{2} \right)^2}, \quad (59)$$

$$s_r = \frac{2}{-\sqrt{2 \cdot \frac{\Delta P}{\varepsilon \cdot S_G} + \lambda_A^2} - \lambda_A}. \quad (60)$$

Kai dažnio nuokrypis yra didesnis ($\Delta f \geq \varepsilon$ ir $\Delta P \geq \Delta P_\varepsilon$), realios, tikėtiniausios statumo ir statizmo reikšmės skaičiuojamos taip:

$$\lambda_r = \lambda \cdot \frac{\Delta P}{\Delta P + \Delta P_\varepsilon + \varepsilon \cdot \lambda_A}, \quad (61)$$

$$s_r = s \cdot \frac{\Delta P + \Delta P_\varepsilon + \varepsilon \cdot \lambda_A}{\Delta P}. \quad (62)$$

Išraiškos (57)–(62) tinka skaičiuoti ir santykiniais dydžiais, jei galios pokyčiai, statumai ir statizmai apskaičiuoti esant toms pačioms bazinėms sąlygoms, pavyzdžiui, likusios sistemos suminei apkrovos galiai.

**4. DAŽNINIŲ CHARAKTERISTIKŲ TYRIMAS
BALTIJOS JUNGTINEI ELEKTROS
ENERGETIKOS SISTEMAI ATSIJUNGUS NUO
RUSIJOS SISTEMOS**

Apkrovų aktyviosios galios dažninės charakteristikos statusas skaičiuojamas remiantis (19) išraiška, pagal atskirų vartotojų grupių galios–dažnio charakteristikos vidutinius statusus. Nesant duomenų apie Lietuvos ES apkrovų dažnines charakteristikas, atskirų vartotojų grupių SDACH vidutinės statusų reikšmės įvertintos pagal literatūros duomenis [3].

Gautos apkrovų aktyviosios galios dažninės charakteristikos statusų λ_{A^*} reikšmės Baltijos JES yra nuo 1,87 iki 1,92, vidutinė reikšmė – 1,9, o Lietuvos ES – λ_{A^*} yra nuo 1,95 iki 2,08, vidutinė reikšmė – apie 2,0.

Modeliuojant Lietuvos apkrovas kompleksiniais dinaminiais modeliais gautos vidutinės λ_{AP^*} reikšmės yra apie 2,0. Todėl šią apkrovos statuso reikšmę tikslinga naudoti praktiniams skaičiavimams.

Baltijos JES statinės dažninės charakteristikos statuso ir statuso skaičiavimo pagrindas – (9), (19), (25), (27), (61) ir (62) išraiškos. Skaičiavimo rezultatai pateikti 1 lentelėje. 2 lentelėje pateikti Lietuvos ES dažninės charakteristikos statuso ir statuso reikšmės, kai ji veikia Baltijos JES sudėtyje.

Idealus Baltijos JES statusas yra nuo 5,4 iki 6,0 s. v., statusas – nuo 16,0 iki 18,5 s. v., vardiniais dydžiais, priklausomai nuo režimo, tai atitiktų 600–1550 MW/Hz.

Atskirų režimų vidutinės pirminių reguliatorių neįturtumo zonos yra 0,12–0,18 Hz. Neįturtumo zonų įtaka buvo tiriama trims galių deficito reikšmėms: 3

1 lentelė. Baltijos JES dažninės charakteristikos parametų įvertinimo suvestinė

Režimas	Statizmas %				Statusas				
	idealus	vertinant neįturtumo zoną, kai $\Delta P =$			idealus		vertinant neįturtumo zoną [MW/Hz], kai $\Delta P =$		
		$0,03 \times P_{A0}$	$0,1 \times P_{A0}$	750 MW	s.v.	MW/Hz	$0,03 \times P_{A0}$	$0,1 \times P_{A0}$	750 MW
ŽMA	6	10,2	7,5	7,0	16,0	1550	960	1300	1380
ŽMIN	5,6	8,4	6,4	6,1	18,0	1010	670	880	920
VMA	5,5	7,8	6,2	6,0	18,1	1110	790	990	1030
VMIN	5,4	7,1	5,9	5,7	18,5	600	460	550	570
ŽMA TE	4,8	9,0	6,1	5,6	20,8	2020	1090	1610	1730
ŽMA + KHAE siurblys + LE 6 blokas	5,9	9,7	7,1	6,7	16,8	1640	1006	1370	1700

Pastaba. ŽMA – žiemos maksimalus režimas, ŽMIN – žiemos minimalus režimas, VMA – vasaros maksimalus režimas, VMIN – vasaros minimalus režimas, ŽMA TE – žiemos maksimalus režimas, visos TE veikia pagrindinės turbinos režimu, ŽMA + KHAE siurblys + LE 6 blokas – žiemos maksimalus režimas, kai veikia KHAE siurblys ir Lietuvos elektrinės 6 blokas.

2 lentelė. Lietuvos ES, veikiančios Baltijos JES, dažninės charakteristikos parametų įvertinimo suvestinė

Režimas	Statizmas %				Statusas				
	idealus	vertinant neįturtumo zoną, kai $\Delta P =$			idealus		vertinant neįturtumo zoną [MW/Hz], kai $\Delta P =$		
		$0,03 \times P_{A0}$	$0,1 \times P_{A0}$	750 MW	s.v.	MW/Hz	$0,03 \times P_{A0}$	$0,1 \times P_{A0}$	750 MW
ŽMA	19,3	24	21	20	5,2	230	180	210	220
ŽMIN	22,8	29	25	24	4,4	166	130	150	160
VMA	22,7	25	24	23	4,4	165	150	160	170
VMIN	40,2	65	47	44	2,5	50	30	44	46
ŽMA TE	10,2	14	12	11	9,7	430	320	380	390
ŽMA + KHAE siurblys + LE 6 blokas	29,8	52	36	34	3,4	150	85	120	130

ir 10% apkrovos galios bei 750 MW. Dėl neįturtumo zonos įtakos tikėtiniausias Baltijos JES statizmas žiemos didžiausių apkrovų metu esant 3% galių deficitui padidėja nuo 6,0% (nevertinant neįturtumo zonos įtakos) iki 10,2%, o statumas sumažėja nuo 1550 MW/Hz iki 960 MW/Hz. Esant didesniam galių deficitui neįturtumo zonos įtaka yra mažesnė. Jei to paties režimo metu galios deficitas būtų 750 MW (15%), tai sistemos statizmas padidėtų tik iki 7,0%.

Sistemos apkrautumas P_{A0}^* kinta nuo 0,4 vasaros mažiausių apkrovų metu iki 0,74 žiemos didžiausių apkrovų metu.

Vasaros mažiausių apkrovų metu pirminiame reguliavime dalyvauja tik 27% visos generavimo galios, kituose režimuose – iki 49%.

Lietuvos ES statinės dažninės charakteristikos statizmas yra gerokai didesnis, o statumas – kur kas mažesnis, nes dauguma Lietuvos šiluminių elektrinių veikia režimu „prieš save“ (pagrindinio katilo režimu), reguliuodamos savo agregatus taip, kad palaikytų pastovią galią arba pastovų garo slėgį prieš turbinas. Lietuvos ES vasaros mažiausių apkrovų metu pirminiame reguliavime dalyvauja tik 1% besisukančių generavimo galių, kituose režimuose – 11–20%. Jei visos Lietuvos ES šiluminės elektrinės veiktų pagrindinės turbinos režimu, Lietuvos ES statizmas būtų beveik dvigubai mažesnis, o statumas – beveik dvigubai didesnis. Tuo tarpu esant režimui, analogiškam Baltijos JES atsidalijimo nuo vieningos elektros energetikos sistemos režimui, veikiant vienam Kruonio HAE agregatui siurblio režimu ir Lietuvos elektrinės šeštajam blokui režimu „prieš save“, Lietuvos ES statinės dažninės charakteristikos parametrai pablogėja, nes, veikiant siurblio režimu, neveikia šio Kruonio HAE agregato turbinų reguliatoriai.

5. IŠVADOS

1. Sudaryta elektros energetikos sistemos statinės dažninės charakteristikos statizmo ir statumo skaičiavimo metodika, įgalinanti įvertinti išjungiamus generavimo agregatus bei apkrovas ir neįturtumo zonų įtaką sistemos dažniniams parametrams.

2. Skaičiuojant apkrovų dažninės charakteristikos statumą pagal vartotojų grupių statumus nustatyta, kad Lietuvos ES apkrovų statumo reikšmės apytiksliai lygios 2,0 s.v., o Baltijos JES – 1,9 s.v.

3. Nevertinant neįturtumo zonos Baltijos JES statizmas žiemos didžiausių apkrovų metu yra lygus 6,0%, veikiant kitu režimu – apie 5,5%.

4. Baltijos JES dažninės charakteristikos statumas kinta nuo 16 iki 18,5 s.v., vardinais dydžiais, priklausomai nuo režimo, tai būtų 600–1550 MW/Hz.

5. Lietuvos ES statizmas apytiksliai lygus 20%, o vasaros mažiausių apkrovų metu jis siekia 40%. Pagrindinėms Lietuvos šiluminėms elektrinėms veikiant pagrindinės turbinos režimu, statizmą galima sumažinti iki 10%.

6. Baltijos JES pirminiame reguliavime dalyvaujančių generavimo agregatų vidutinės neįturtumo zonos skirtinguose režimuose yra nuo 0,12 iki 0,18 Hz.

7. Tiriant pirminių reguliatorių neįturtumo zonų įtaką nustatyta, kad esant galių deficitui apie 3% nuo suminės apkrovos galios, tikėtiniausias Baltijos JES statizmo reikšmės padidėja iki 7,1–10,2%, o statumo reikšmės sumažėja iki 460–960 MW/Hz. Esant didesniam galių deficitui neįturtumo zonų įtaka yra mažesnė.

8. Gerinant Lietuvos ES statinės dažninės charakteristikos parametrus reikia šiluminių agregatų reguliavimą pervesti iš pagrindinio katilo režimo į pagrindinės turbinos režimą.

Gauta
2003 11 21

Literatūra

1. Anderson P. M., Fouad A. A. Power System Control and Stability. New York: IEEE Press, 2003.
2. Экспериментальные исследования режимов энергосистем. Под ред. С. А. Совалова. Москва: Энергоатомиздат, 1985.
3. IEEE Task Force. Load Representation for Dynamic Performance Analysis // IEEE Transactions on Power Systems. May 1993. Vol. 8. N 2. P. 472–482.

Vaclovas Ažubalis, Albertas Nargėlas, Almantas Bandza, Audrius Jonaitis, Mindaugas Ažubalis

ESTIMATION OF STATIC PARAMETERS OF POWER SYSTEM POWER FREQUENCY CHARACTERISTICS

S u m m a r y

For planning the primary and secondary frequency control a power system, required power reserves and for investigation of frequency deviation due to imbalance of generation and load power it is necessary to know the main parameters of static power frequency characteristic, which are droop and steepness. The methodology for evaluation of these parameters depending on generating units and load power frequency characteristics is presented. The possibilities of the evaluation of dead band, the tripping impact of generators and loads these parameters are shown. The droop and steepness values of the Baltic joint power system and Lithuanian power system in different operating conditions are calculated.

Key words: power system, frequency response characteristic, droop, steepness, generating unit, dead band, load

**Вацловас Ажубалис, Альбертас Наргелас,
Алмантас Бандза, Аудрюс Йонайтис,
Миндаугас Ажубалис**

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СТАТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Резюме

При планировании режимов первичного и вторичного регулирования частоты, определении необходимых резервов мощности и при расчетах изменения частоты в случае нарушения баланса мощностей генерации и нагрузки необходимо знать значения параметров статической частотной характеристики мощности электро-энергетической системы.

В статье представлена методика, позволяющая оценить основные параметры статической частотной характеристики мощности электроэнергетической системы – статизм и крутизну в зависимости от параметров статических характеристик мощности нагрузок и генерирующих агрегатов. Показана возможность оценки зоны нечувствительности регуляторов генерирующих агрегатов, влияния отключаемых нагрузок и генерирующих агрегатов на параметры статической частотной характеристики. Приведена оценка параметров ОЭС Балтия и электроэнергетической системы Литвы в разных режимах работы.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, статическая частотная характеристика, статизм, крутизна, генерирующий агрегат, зона нечувствительности, нагрузка