

# Kruonio HAE manevringumo įtakos Lietuvos elektros energetikos sistemos balansavimui matematinis modeliavimas

**Aušra Pažėraitė,**

**Mindaugas Krakauskas**

*Lietuvos energetikos institutas,  
Kompleksinių energetikos tyrimų laboratorija,  
Breslaujos g. 3, LT-44403 Kaunas  
El. paštas: mindaugas.krakauskas@dokeda.lt*

**Vidmantas Baltakis**

*Vytauto Didžiojo universitetas*

**Ramūnas Bikulčius,**

**Daivis Virbickas**

*AB „Lietuvos energija“  
Dispečerinis centras*

Elektros energetikos sistemos balansui užtikrinti naudojama vadinamoji reguliuojama energija, kurią sistemos operatorius perka iš gamintojų arba importuoja. Lietuvai būdingas tokios elektros energijos importas iš Rusijos. Kai kuriose šalyse sistemos operatoriai savo nuosavybėje laiko specialiai tam skirtas elektrines, pasižyminčias išskirtiniu manevringumu. Lietuvoje tokia elektrine galėtų būti KHAE. Tačiau jos panaudojimą šiam tikslui riboja nepakankamas manevringumas. Straipsnyje nagrinėjamas tikslinumas didinti KHAE manevringumą. Šiuo tikslu suformuojamas matematinis modelis ir pateikiama jo kompiuterinė realizacija. Modelio pagalba parodoma, kad KHAE manevringumo padidinimas gerokai sumažintų reguliavimo ir balansavimo energijos apimtį iš Rusijos.

**Raktažodžiai:** Kruonio HAE, elektros energetikos sistema, manevringumas, sistemos balansas, reguliavimo energija, matematinis modelis

## 1. ĮVADAS

Lietuvos elektros energetikos sistemos patikimumą ir kokybę labiausiai nulemia tinkamas balanso užtikrinimas atliepant vartojimo grafiką kiekvienu laiko momentu. Kuo toliau, tuo labiau šį procesą apsunkina didėjanti vėjo energijos dalis gamybos balanse. Tinkamą balansavimo funkcijos vykdymą galima pasiekti turint reikiamą kiekį reguliuojamos energijos.

Deja, Lietuva negali pasigirti nuosavais reguliuojamos energijos ištekliais, ir tokia elektros energija paprastai atkeliauja iš Rusijos. Nepatikimas šios elektros energijos tiekimas susijęs su dažnio nukrypimais arba netgi nepateikta elektros energija vartotojams. Ateityje ši problema gali būti itin aktuali, nes pastaruoju metu pralaidumas iš Rusijos per Baltarusiją tampa kuo toliau, tuo labiau ribotas. Todėl nuosavas reguliavimo energijos šaltinis yra svarbus veiksnys siekiant palaikyti kokybišką Lietuvos energetikos sistemos funkcionavimą.

Tokiu reguliavimo šaltiniu galėtų būti Kruonio HAE (hidroakumuliacinė elektrinė). Tačiau dėl nepakankamo manevringumo ji šiuo metu naudojama kaip avarinis rezervas ir iš dalies grafiko lyginimui. Kruonio HAE, savaitgaliais įjungtą siurblio režimu, pakelia sistemos apkrovimą, o darbo dienomis maksimalių apkrovų periodu įsijungia kaip generatorius. Taip suda-

romos sąlygos didesnėmis apimtimis išnaudoti bazines elektrines – pirmiausia Ignalinos AE (atominę elektrinę).

Visgi toks apkrovos grafiko lyginimas yra sąlyginis, nes agregatai, įjungiami visa galia, sąlygoja šuolinius grafiko pokyčius, kurie savo ruožtu lemia papildomos reguliavimo energijos poreikį, sukelia dažnio ir įtampų svyravimus. Siekiant geresnio KHAE panaudojimo, reikalingas atitinkamas modernizavimas didinant jos manevringumą. Visame pasaulyje šiai problemai yra skiriama daug dėmesio [1].

## 2. KHAE MANEVRINGUMO DIDINIMO VERTINIMO PRINCIPAI

Kruonio HAE agregatų modernizavimas manevringumo didinimo linkme ne tik sumažintų reguliuojamos energijos poreikį, bet ir pati jėgainė galėtų tapti reguliavimo energijos ir dažnio reguliavimo paslaugos teikėja. Siekiant šio tikslo, būtina turėti technines galimybes keisti agregatų galią, atsižvelgus į apkrovos grafiko kitimą, sugebėti reaguoti į dažnio nukrypimus. Taip pat, siekiant saugesnio elektros energijos tiekimo, naudinga turėti galimybę startuoti po totalinės avarijos arba pereiti į salos režimą.

Tokiose situacijose generacijos šaltiniai paprastai turi sugebėti dirbti į savo nuosavą apkrovą. Šiam tikslui hidroakumuliaci-

nės jėgainės galėtų būti panaudojamos todėl, kad dalis agregatų galėtų pradėti dirbti kaip generatoriai, o kiti, dirbdami siurblio režimu, galėtų būti pirmiesiems kaip tam tikra apkrova. Taip pat Kruonio HAE agregatai tokia apkrova galėtų tarnauti kitoms jėgainėms, patekusioms į bendrą šalą. Tokiais atvejais agregatų manevringumo galimybės vaidina lemiamą vaidmenį. Šias galimybes galėtų suteikti vienokia ar kitokia agregatų modernizacija. Todėl yra svarbu turėti vieningus modernizavimo procesų vertinimo principus. Šiame straipsnyje autoriai siūlo Kruonio HAE modernizaciją vertinti pagal jos galimybę:

- minimizuoti reguliavimo energijos poreikį;
- tapti reguliavimo energijos šaltiniu;
- tapti dažnio reguliavimo paslaugos teikėju;
- užtikrinti kuo geresnes sąlygas baziniams generacijos šaltiniams;
- dalyvauti reguliuojant reaktyvinę energiją ir įtampas;
- dalyvauti likviduojant totalines avarijas;
- pelningai dalyvauti elektros energijos rinkose.

Po modernizacijos, įvaldžius minėtas galimybes, Kruonio HAE gerokai prisidėtų prie Lietuvos elektros energetikos sistemos darbo patikimumo ir kokybės bei ekonomiškumo.

Prieš atliekant modernizaciją, būtų labai naudinga mokėti nustatyti minėtų galimybių lygį, atsižvelgus į tam tikrą modernizavimo kryptį. Todėl tikslinga sukurti matematinį modelį tokiems vertinimams atlikti.

### 3. MATEMATINIO MODELIO SUFORMAVIMAS KHAE MANEVRINGUMO IŠPLĖTIMO EFEKTYVUMUI VERTINTI

Bendruoju atveju tokio modelio formavimas galėtų būti grindžiamas sveikaskaitinio programavimo principais [2]. Tačiau uždavinio specifika leidžia sukurti kur kas paprastesnį algoritmą.

Matematinis modelis formuojamas remiantis anksčiau aptartais Kruonio HAE manevringumo didinimo principais, kurie daugiausia siejami su balanso palaikymu. Modeliavimo procesas yra suskirstytas į penkis etapus:

1. Būdingų paros apkrovimo grafikų suformavimas.
2. Reguliavimo žemyn energijos poreikių grafiko suformavimas, kai visas apkrovos grafikas dengiamas iš bazinės elektros energijos generavimo.
3. Skaičiuotino (idealaus) akumuliacinio–generavimo ciklo, vertinant tik n. k., kuris visiškai panaikina reguliavimo žemyn elektros energijos poreikį, nustatymas.
4. Realus akumuliacinio–generavimo ciklo, įvertinant reguliavimo diapazoną, nustatymas.
5. Reguliavimo elektros energijos papildomo poreikio ir jo grafiko dėl nepakankamo Kruonio HAE manevringumo nustatymas.

Pirmame etape paruošiami būdingi Lietuvos energetikos sistemos paros apkrovimo grafikai. Daugeliu atvejų pakanka paruošti keturis tokius paros apkrovimo grafikus, būdingus šioms dienoms:

- žiemos darbo dienai;
- žiemos nedarbo dienai;
- vasaros darbo dienai;
- vasaros nedarbo dienai.

Antrame etape nustatomas reguliavimo žemyn elektros energijos grafikas, teigiant, kad paros apkrovimo grafikas būtų

dengiamas nereguliuojamos bazinės elektros energijos šaltiniu. Toliau daroma prielaida, kad bazinis šaltinis dirba visą parą su tokia galia, kuri lygi paros apkrovimo maksimaliai galiai. Suprantama, kad visomis kitomis valandomis perteklinės galios kompensavimui yra reikalinga reguliavimo žemyn elektros energija ir jos poreikis per parą kinta. Kiekvienai valandai ši poreikį galima nustatyti pagal formulę:

$$R_{zj} = P_j - P_{\max} \quad (\text{kai } j = 1, \dots, 24);$$

čia  $R_j$  – reguliavimo žemyn elektros energijos poreikiai  $j$ -ąją paros valandą;  $P_{\max}$  – maksimali paros apkrovimo grafiko reikšmė.

Trečiame etape, mažinant bazinio šaltinio galios lygį, mažėja reguliavimo žemyn elektros energijos poreikis minimalių apkrovų metu, tačiau atsiranda reguliavimo aukštyn elektros energijos poreikis didelių apkrovų metu. Kuomet šių elektros energijų kiekis susivienodina, galima teigti, kad, esant tokiam bazinės elektros energijos lygiui, reguliavimo funkciją gali atlikti hidroakumuliacinės jėgainės su šimtaprocentiniu reguliavimo diapazonu. Toks HAE darbo ciklas vadinamas skaičiuotinu ir matematiškai gali būti išreiškiamas taip:

$$P_{sj} = P_b - R_{zj}, \text{ tenkinant tokią sąlygą:}$$

$$\Sigma(P_b - R_{zj}) = 0 \quad (\text{kai } j = 1, \dots, 24);$$

čia  $P_{sj}$  – skaičiuotinas akumuliacinio–generavimo ciklo, visiškai eliminuojančio reguliavimo elektros energijos poreikį, galinumas  $j$ -ąją paros valandą;  $P_b$  – bazinės galios sumažėjimas nuo  $P_{\max}$  reikšmės.

Ketvirtame etape nustatomas realus akumuliacinio–generavimo darbo ciklas, jau įvertinant tikruosius reguliavimo diapazonus generavimo ir akumuliacinio režimuose, ir stengiantis kiek įmanoma nenukrypti nuo skaičiuotino akumuliacinio–generavimo grafiko. Tai reiškia reguliavimo energijos iš kitų šaltinių, tarp jų ir iš Rusijos, minimizaciją.

Penktame etape yra palyginami skaičiuotinas ir realus akumuliacinio darbo ciklai tam, kad būtų galima nustatyti reguliavimo energijos poreikį. Akivaizdu, kad toks poreikis bus tuo didesnis, kuo bus mažesnis reguliavimo diapazonas per visą akumuliacinio generavimo ciklą.

### 4. MATEMATINIO MODELIO ALGORITMINĖ REALIZACIJA

Aprašyto matematinio modelio programavimo pagrindą iš esmės turėtų sudaryti kryptingas galimų variantų parinkimas remiantis loginėmis funkcijomis, toliau pateikiamas iš keturių žingsnių sudarytas skaičiavimo algoritmas. Algoritmui suformuoti yra naudojami tokie simboliai:

$P_s$  – KHAE skaičiuotinas apkrovimas MW;

$P$  – KHAE apkrovimas MW;

$G$  – vardinė KHAE vieno agregato generavimo galia MW;

$N$  – vardinė KHAE vieno agregato siurbimo galia MW;

$g$  – KHAE agregato reguliavimo diapazonas generavimo režime;

$a$  – KHAE agregato reguliavimo diapazonas siurbimo režime;

$n$  – agregatų skaičius;

$i$  – agregatų eilės indeksas.

## 1 žingsnis. Nustatoma, ar gali esamas siurbimo reguliavimo diapazonas tiksliai padengti skaičiuotiną apkrovą, nesukuriant reguliavimo energijos poreikio

Ar skaičiuotina galia patenka į siurblio reguliavimo diapazoną? $a \times N < ABS(P_s) < N$	Taip	$P = P_s$
Ne		
Ar skaičiuotina galia patenka į dviejų siurblių reguliavimo diapazoną? $2 \times a \times N < ABS(P_s) < 2 \times N$	Taip	$P = P_s$
Ne		
Ar skaičiuotina galia patenka į $i$ siurblių reguliavimo diapazoną? $i \times a \times N < ABS(P_s) < i \times N$	Taip	$P = P_s$
Ne		
Ar skaičiuotina galia patenka į $n$ siurblių reguliavimo diapazoną? $n \times a \times N < ABS(P_s) < n \times N$	Taip	$P = P_s$
Ne		

## 2 žingsnis. Nustatoma, koks suminis agregatų galingumas paliekamas siurbimo režime mažiausiai nukrypstant nuo skaičiuotinos galios

Jei skaičiuotina galia viršija $n$ agregatų suminę galią, tai paleidžiami visi agregatai, o likusi grafiko dalis lieka nepadengta. $ABS(P_s) > n \times N$	Taip	$P = -N \times 8$	
Ne			
Jei skaičiuotina galia viršija $n - 1$ agregatų suminę galią, bet yra mažesnė už $n$ agregatų minimalią galią, tai paleidžiami $n - 1$ agregatai maksimalia galia arba $n$ minimalia galia, atsižvelgus į tai, kuri reikšmė yra artimesnė. Todėl grafikas šiame taške lieka nepadengtas arba viršytas. $(n - 1) \times N < ABS(P_s) < n \times N \times a$	Taip	$ n \times N \times a - P_s  <  (n - 1) \times N - P_s $	Taip $P = -n \times N \times a$
Ne			$P = -(n - 1) \times N$
Jei skaičiuotina galia viršija $(i - 1)$ agregatų suminę galią, bet yra mažesnė už $i$ agregatų minimalią galią, tai paleidžiami $(i - 1)$ agregatai maksimalia galia arba $i$ minimalia galia, atsižvelgus į tai, kuri reikšmė yra artimesnė. Todėl grafikas šiame taške lieka nepadengtas arba viršytas. $(i - 1) \times N < ABS(P_s) < i \times N \times a$	Taip	$ n \times N \times a - P_s  <  (n - 1) \times N - P_s $	Taip $P = -i \times N \times a$
Ne			$P = -(i - 1) \times N$
Jei skaičiuotina galia yra mažesnė už 1 agregato minimalią galią, tai nepaleidžiamas nei vienas agregatas arba paleidžiamas tik vienas agregatas minimalia galia, atsižvelgus į tai, kuri reikšmė yra artimesnė. Todėl grafikas šiame taške lieka nepadengtas arba viršytas. $ABS(P_s) < a \times N$	Taip	$ N \times a - P_s  < 0,5 \times N \times a$	Taip $P = -N \times a$
Ne			Ne $P = 0$
KLAIDA			

## 3 žingsnis. Nustatoma, ar gali esamas generavimo reguliavimo diapazonas tiksliai padengti skaičiuotiną apkrovą, nesukuriant reguliavimo energijos poreikio

Ar skaičiuotina galia patenka į $P_s$ agregato reguliavimo diapazoną? $a \times G < (P_s) < G$	Taip	$P = P_s$
Ne		
Ar skaičiuotina galia patenka į dviejų agregatų reguliavimo diapazoną? $2 \times a \times G < (P_s) < 2 \times G$	Taip	$P = P_s$
Ne		
Ar skaičiuotina galia patenka į $i$ agregatų reguliavimo diapazoną? $i \times a \times G < (P_s) < i \times G$	Taip	$P = P_s$
Ne		
Ar skaičiuotina galia patenka į $n$ agregatų reguliavimo diapazoną? $n \times a \times G < (P_s) < n \times G$	Taip	$P = P_s$
Ne		

## 4 Žingsnis. Nustatoma, koks suminis agregatų galingumas paliekamas generavimo režime, mažiausiai nukrypstant nuo skaičiuotinos galios

<p>Jei skaičiuotina galia viršija <math>n</math> agregatų suminę galią, tai paleidžiami visi agregatai, o likusi grafiko dalis lieka nepadengta.</p> $(P_s) > n \times G$ <p style="text-align: center;">Ne</p>	Taip	$P = n \times G$		
<p>Jei skaičiuotina galia viršija <math>n - 1</math> agregatų suminę galią, bet yra mažesnė už <math>n</math> agregatų minimalią galią, tai paleidžiami <math>n - 1</math> agregatai maksimalia galia arba <math>n</math> minimalia galia, atsižvelgus į tai, kuri reikšmė yra artimesnė. Todėl grafikas šiame taške lieka nepadengtas arba viršytas.</p> $(n - 1) \times G < (P_s) < n \times G \times g$ <p style="text-align: center;">Ne</p>	Taip	$ n \times G \times g - P_s  <  (n - 1) \times G - P_s $	Taip	$P = n \times G \times g$
<p>Jei skaičiuotina galia viršija <math>(i - 1)</math> agregatų suminę galią, bet yra mažesnė už <math>i</math> agregatų minimalią galią, tai paleidžiami <math>(i - 1)</math> agregatai maksimalia galia arba <math>i</math> minimalia galia, atsižvelgus į tai, kuri reikšmė yra artimesnė. Todėl grafikas šiame taške lieka nepadengtas arba viršytas.</p> $(i - 1) \times G < (P_s) < i \times G \times g$ <p style="text-align: center;">Ne</p>	Taip	$ i \times G \times g - P_s  <  (i - 1) \times G - P_s $	Taip	$P = i \times G \times g$
<p>Jei skaičiuotina galia yra mažesnė už 1 agregato minimalią galią, tai nepaleidžiamas nė vienas agregatas arba paleidžiamas tik vienas agregatas minimalia galia, atsižvelgus į tai, kuri reikšmė yra artimesnė. Todėl grafikas šiame taške lieka nepadengtas arba viršytas.</p> $(P_s) < G \times g$ <p style="text-align: center;">Ne</p>	Taip	$ G \times g - P_s  < 0,5 \times G \times g$	Taip	$P = G \times g$
KLAIDA	Ne	$P = 0$		

## 5. KHAE MANEVRINGUMO PADIDINIMO ĮTAKOS ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMOS BALANSUI MODELIAVIMAS IR ANALIZĖ

Remiantis aprašyta metodika ir matematiniais modeliais, buvo atlikta daug skaičiavimų, atspindinčių būdingus sistemos apkrovimus. Siekiant skaičiavimus supaprastinti, modeliavimas, kaip gali būti panaudojami Kruonio HAE agregatai apkrovos grafikų pikinėje dalyje, buvo atliekamas parinkus keturis būdingus valandinius paros sistemos apkrovimo grafikus. Tiksliau – buvo naudojami žiemos ir vasaros darbo ir nedarbo dienų apkrovos būdingi grafikai, kurių datos buvo 2006.06.18, 2006.06.21, 2006.12.17 ir 2006.12.20. Buvo modeliuojamas Kruonio HAE darbo ciklas esant kiekvienam paros apkrovimo grafikui su agregatais prieš modernizaciją ir po jos.

Modelio skaičiavimai parodė, kaip Kruonio HAE agregatai gali sekti besikeičiančią sistemos apkrovą per parą, minimizuojant nukrypimus, kurie ir yra dažnio nukrypimų nuo standartų ir neatleistos elektros energijos priežastis.

Prieš modernizaciją agregatai modelyje buvo vertinami naudingumo koeficientu, lygiu 70%, ir reguliavimo diapazonu generavimo režime ( $G_{\min}$ ), lygiu 20%. Siurbimo režime reguliavimo diapazonas ( $N_{\min}$ ) buvo vertinamas tik 2%. Atsižvelgiant į partnerių atliktą tyrimą, po modernizacijos naudingumo koeficientas buvo vertinamas 74%, o generavimo diapazonas išaugo iki 40%. Siurbimo režime diapazonas radikalčiai pasikeitė ir buvo priimtas taip pat 40%.

Taigi, priėmus šias pradines sąlygas, buvo atliktas modeliavimas, minimizuojant papildomos reguliavimo energijos poreikį, kartu nustatant tiksliai subalansuotą didesnę bazinės elektros ener-

gijos poreikį ( $\Delta P_{baz}$ ). Taip pat buvo skaičiuojami ir keletas kitų svarbių kriterijų. Tai papildomo reguliavimo žemyn energijos poreikis (Reg. žemyn), papildomo reguliavimo aukštyn energijos poreikis (Reg. aukštyn), Kruonio HAE akumuliavimo–generavimo ciklo balansas (Akum. balansas), idealaus reguliavimo atveju Kruonio HAE akumuliotos elektros energijos pokytis, atlikus šį reguliavimą (Idealus balansas), suminis papildomos reguliavimo žemyn ir aukštyn energijos poreikis (Papildomas reg.) ir papildomo reguliavimo žemyn ir aukštyn energijos poreikio sumažėjimas po modernizacijos ( $\Delta Reg$ ). Modeliavimo rezultatai pateikti lentelėje.

Lentelėje  $P_{\max}$  reiškia paros maksimalią apkrovą,  $P_{\text{pik}}$  yra paros minimalios ir maksimalios apkrovos skirtumas,  $P_{\text{pik.akum}}$  – likusi pikinė apkrova virš aukštesnio bazinio elektros energijos poreikio,  $N_s$  – maksimali galima vieno įrenginio galia siurbimo režime,  $G$  – maksimali galima vieno įrenginio galia generatoriaus režime. Toliau detaliau bus nagrinėjamos kiekviena iš keturių būdingų dienų apkrovų reguliavimo galimybės prieš modernizaciją ir po jos.

Pirma pasirinkta sistemos tipinė situacija – žiemos darbo diena ir pavaizduota 1 paveiksle, kuriame tamsūs stulpeliai reiškia dirbančius agregatus atitinkamai siurbimo ar generavimo režimu (minusinėje dalyje vyksta siurbimas, pliusinėje generavimas). Šviesūs stulpeliai atspindi papildomos reguliavimo energijos poreikį. Linija atspindi vartojimo grafiko pikinę dalį, kuri yra virš bazinės dalies, o nulinė ašis pikinę grafiko dalį skiria į dvi dalis, taip sumažinant pikinę grafiko dalį ir padidinant bazinę.

Taigi matyti, kad tipinę žiemos darbo dieną sistemos apkrovimas pasižymi dideliu pikiškumu, siekiančiu 720 MW. Ši viršutinė grafiko dalis, be kita ko, yra pakankamai dinamiška per parą. Esant nepakankamam agregatų manevringumui, atsiranda

Lentelė. KHAE modernizacijos, išplečiant agregatų reguliavimo ribas, įtakos modeliavimo rezultatai

Kriterijai	KHAE darbo ciklai būdingomis dienomis							
	Žiemos periodu				Vasaros periodu			
	Darbo diena		Ne darbo diena		Darbo diena		Ne darbo diena	
	Prieš mod.	Po mod.	Prieš mod.	Po mod.	Prieš mod.	Po mod.	Prieš mod.	Po mod.
$P_{\max}$ (MW)	1817	1817	1545	1545	1450	1450	1142	1142
$P_{\text{pik}}$ (MW)	720	720	575	575	519	519	304	304
$\Delta P_{\text{baz}}$ (MW)	481,2	475,2	294,6	290,4	343,0	339,0	209,0	207,0
$P_{\text{pik,akum}}$ (MW)	238,8	244,8	280,4	284,6	176,0	180,0	95,0	97,0
N. k. (s. v.)	0,70	0,74	0,70	0,74	0,70	0,74	0,70	0,74
$N_s$ (MW)	220	220	220	220	220	220	220	220
$N_{\min}$ (s. v.)	0,98	0,60	0,98	0,60	0,98	0,60	0,98	0,60
$G$ (MW)	200	200	200	200	200	200	200	200
$G_{\min}$ (s. v.)	0,80	0,60	0,80	0,60	0,80	0,60	0,80	0,60
Reg. žemyn (MWh)	-364,4	-90,8	-538,6	-26,8	-598,0	-198,0	-155,0	-363,0
Reg. aukštyn (MWh)	348,6	26,4	452,2	297,4	234,4	41,0	1142,2	479,0
Akum. balansas (MWh)	19,1	64,9	15,6	-243,2	262,3	125,1	-896,4	-131,0
Idealus balansas (MWh)	1,2	0,5	0,0	-0,4	0,6	0,8	3,7	-1,7
Papildomas reg. (MWh)	713,0	117,2	990,8	324,2	832,4	239,0	1297,2	842,0
$\Delta \text{reg}$ (MWh)		595,8		666,6		593,4		455,2

problemų palaikant sistemos balansą. Tačiau situacija ženkliai pagerėja, jei išplečiamas Kruonio HAE manevringumas. Tai galima matyti 4 paveiksle.

Palyginus 1 ir 2 paveiksluose pavaizduotus Kruonio HAE darbo ciklus prieš modernizaciją ir po jos tipinę žiemos darbo dieną, labai aiškiai matyti, kiek papildomos reguliavimo energijos reikėtų vienu ir kitu atveju. Skaitinę išraišką galima matyti lentelėje.

Prieš modernizaciją reikėjo -364,4 MWh papildomo reguliavimo aukštyn ir 348,6 MWh žemyn, iš viso tai sudarė 713 MWh, tuo tarpu po modernizacijos Kruonio HAE gali sumažinti bendrą reguliuojamos energijos poreikį iki 117,2 MWh.  $\Delta \text{Reg}$  595,8 MWh skirtumas tampa pakankamai ženklu. Be to, reikėtų atkreipti dėmesį ir į pasikeitusį Kruonio HAE darbo ciklo energijos balansą. Jei nemodernizuotos Kruonio HAE jis buvo 19,1 MWh, tai modernizavus jis taptų 64,9 MWh. Teigiamas skaičius reiškia, kad buvo suakumuliuota elektros energijos daugiau, nei jos panaudota.

Kita, šiek tiek mažesnio pikiškumo (575 MW) tipinė situacija yra žiemos nedarbo diena. Kaip matyti 3 paveiksle, vartojimo pikai yra mažesni, bet grafikas ne taip staigiai pereinantis iš minimalaus vartojimo būsenos į maksimalaus vartojimo būseną.

Tokia situacija Kruonio HAE reguliavimui yra labai nepalanki, nes šiuo atveju reikia ilgiau truncančio mažo reguliavimo aukštyn arba žemyn (iš viso nemodernizuotos Kruonio HAE atveju tai būtų apie 991 MWh). Tuo tarpu po modernizacijos situacija pagerėja, nes reguliavimo energijos poreikis sumažėja 666,6 MWh iki 324 MWh. Sumažėjimas siekia net 67%. Vizualiai tai labai aiškiai matyti 4 paveiksle.

Tačiau kaip neigiamą efektą galima pažymėti atsiradusį didesnę darbo ciklo energijos nebalansą. Jei prieš modernizaciją nebalansas būtų tik 15,6 MWh, tai antruoju atveju jis pasikeistų iki -243,2 MWh. Tačiau tai tesudarytų tik apie 0,2 MWh, arba 2% visos akumuliuojamos elektros energijos kiekio.

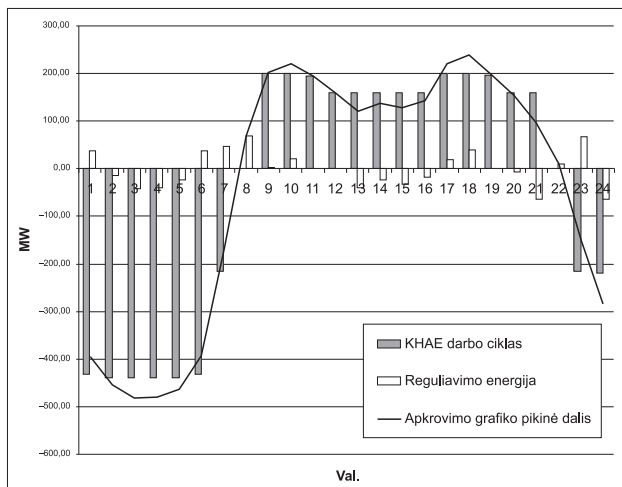
Lyginant 3 ir 4 paveikslus galima pastebėti, kad pirmuoju atveju Kruonio HAE nepavyksta tiksliai subalansuoti sistemos

per visą parą, tuo tarpu po modernizacijos elektrinė nevisiškai subalansuotą sistemą praktiškai tik pereinamais laikotarpiais tarp siurbimo ir generavimo režimų. Beje panašią tendenciją galima matyti ir tipiniu žiemos darbo dienos atveju (1 ir 2 pav.). Vasaros darbo dienos tipinė situacija (5 pav.) iš dalies atkartoja žiemos darbo dienos tipinės apkrovos grafiką. Tačiau reikėtų atkreipti dėmesį į tai, kad skirtumas tarp ekstremalių vartojimo taškų yra mažesnis. Jei žiemos atveju jis buvo 720 MWh, tai vasarą jis sumažėjo maždaug iki 519 MWh (duomenys iš lentelės). Tai automatiškai turėjo įtakos nemodernizuotos Kruonio HAE gebėjimui efektyviai vykdyti sistemos reguliavimą. Šiuo atveju prirėkė net 832,4 MWh papildomos pagalbos iš šalies beveik visu paros metu tiekiant reguliavimo energiją. Tiesa, palanki situacija susiklostė dienos metu, tarp 11 ir 16 val., kai papildomo reguliavimo energijos neprireikė.

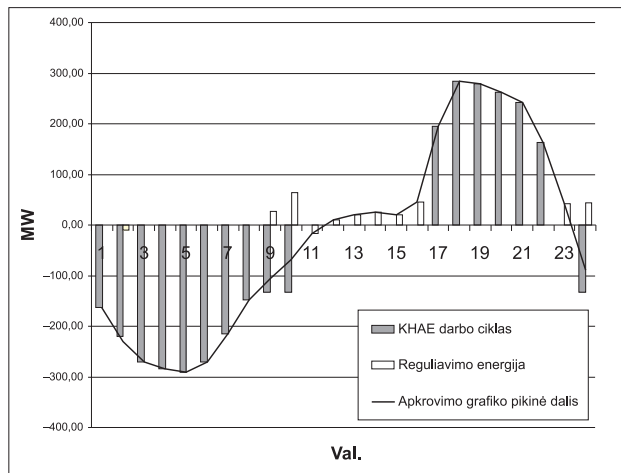
Modernizavus Kruonio HAE tipiniu vasaros darbo dienos atveju vartojimo grafiką sekti pavyksta daug geriau (6 pav.). Ir vėl, kaip ankstesniais atvejais, daugiausiai papildomos reguliavimo energijos reikia elektrinės nedarbo metu, pereinant iš siurbimo režimo į generavimo režimą, o apskritai Kruonio HAE dalyvavimas reguliavimo procese pagerėja, nes reguliavimo energijos poreikis iš šalies sumažėja nuo 832,4 MW iki 239 MW. Taigi  $\Delta \text{Reg}$  šiuo atveju yra 593,4 MW.

Likusioje vasaros nedarbo dienos tipinėje situacijoje jau galima pastebėti kitokią tendenciją. Kaip matyti 7 ir 8 paveiksluose, elektrinei darosi sunku balansuoti sistemą, nes minimalios ir maksimalios grafiko reikšmių skirtumas tapo per mažas, tesiekiantis 304 MW. Taigi šiuo atveju Kruonio HAE reguliavimas darosi nebetikslingas, nes labai išauga papildomos reguliavimo energijos poreikis (iki 1297,2 MWh). Tuo labiau, kad nemodernizuotos Kruonio HAE atveju pasireiškia didelis paros darbo ciklo energijos nebalansas (-896,4 MWh), t. y. situacija dar labiau pablogėtų, jei būtų bandoma pagerinti pastarąjį kriterijų.

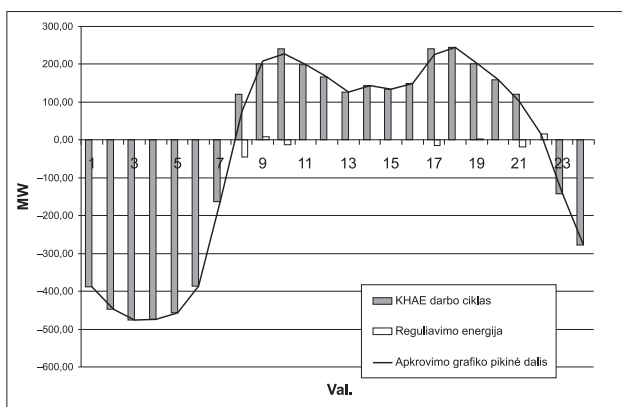
Nors modernizavus situacija pagerėja (8 pav.), tačiau vis dar išlieka 842 MWh papildomo reguliavimo poreikis.



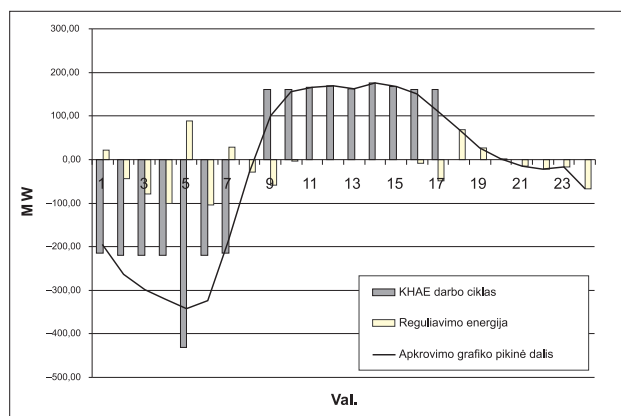
1 pav. Kruonio HAE paros darbo ciklas prieš modernizaciją (darbo diena 06.12.20)



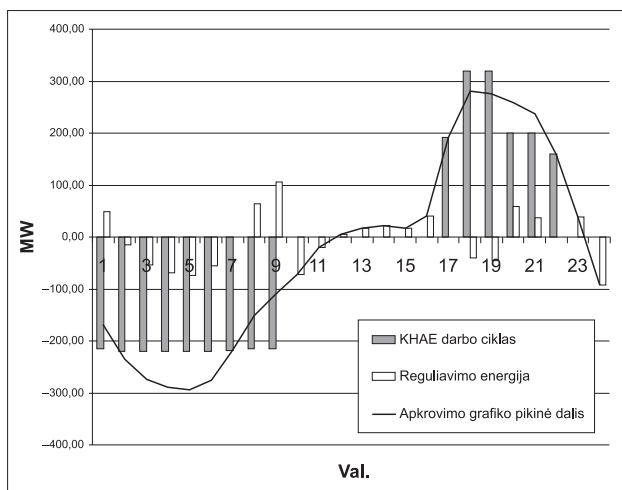
4 pav. Kruonio HAE paros darbo ciklas po modernizacijos (nedarbo diena 06.12.17)



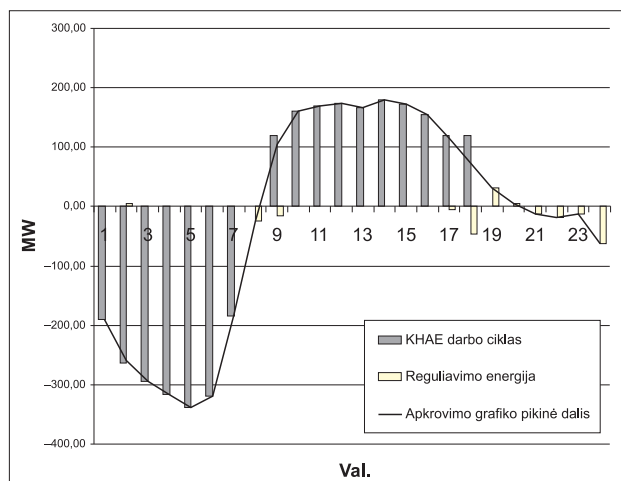
2 pav. Kruonio HAE paros darbo ciklas po modernizacijos (darbo diena 06.12.20)



5 pav. Kruonio HAE paros darbo ciklas prieš modernizaciją (darbo diena 06.06.21)



3 pav. Kruonio HAE paros darbo ciklas prieš modernizaciją (nedarbo diena 06.12.17)



6 pav. Kruonio HAE paros darbo ciklas po modernizacijos (darbo diena 06.06.21)

Suakumuliuotos elektros energijos perteklius yra ženkliai mažesnis ir tesudaro –131 MWh.

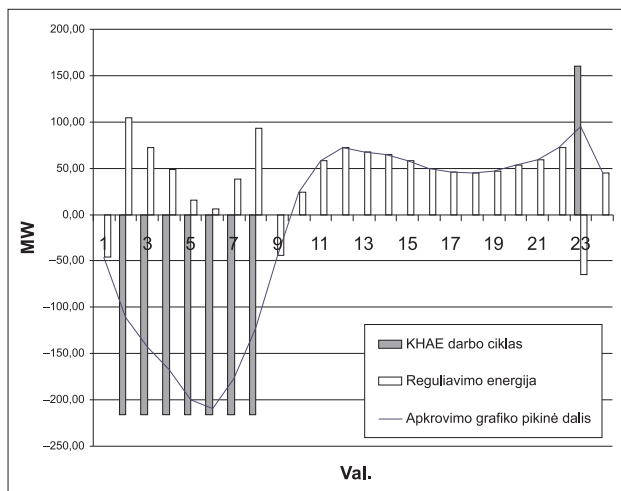
Siekiant apibendrinti šio modeliavimo rezultatus, reikėtų akcentuoti, jog:

- Kruonio HAE modernizavimas ženkliai pagerintų galimybes dalyvauti reguliuojant vartojimo grafiką. Modeliuotais atvejais po modernizavimo reguliavimas pagerėjo tarp 455,2 MW ir 666,6 MW, arba tai sudarė nuo 35 iki 83%;

- Po modernizavimo dažniausiai papildomą sistemos reguliavimą reikėtų atlikti pereinant Kruonio HAE iš akumuliavimo režimo į generavimo režimą;

- Didėjant Kruonio HAE reguliavimo diapazonui  $P_{pik}$ , padidėtų ir reguliavimo efektyvumas;

- Lietuvos elektros energetikos sistemos galios ir energijos balansavimo procese dėl mažo poreikio Kruonio HAE po modernizacijos galėtų dalyvauti tik ne visu pajėgumu (vienu arba



7 pav. Kruonio HAE paros darbo ciklas prieš modernizaciją (nedarbo diena 06.06.18)

dviem agregatais), todėl išlieka mažesnio galingumo ir didesnio manevringumo agregatų poreikis;

- Nors šis modelis ir atskleidė Kruonio HAE modernizacijos privalumus, tačiau jų visokeriopam įvertinimui būtų tikslinga modeliuoti visos savaitės ciklą.

## 5. IŠVADOS

1. Šiuolaikiniai elektros energetikos sistemų ypatumai iškelia naujus reikalavimus sistemos patikimumo ir efektyvumo užtikrinimui, ir hidroakumuliacinės elektrinės tampa ypač svarbios.

2. Hidroakumuliacinės elektrinės turi būti pakankamai manevringos, kad užtikrintų elektros energetikos sistemų galios ir energijos balansą. Todėl ankstesnio tipo hidroakumuliacinės elektrinės negali tinkamai dalyvauti užtikrinant tokių sistemų patikimą darbą.

3. Iki šiol Lietuvos Kruonio HAE pagrindinė užduotis buvo užtikrinti sistemos stabilumą, dirbant Ignalinos AE. Tačiau dabartinės technologijos leistų ją panaudoti ir kitoms funkcijoms, tokioms kaip reguliavimo energijos tiekimas, dažnio reguliavimo paslaugos teikimas, reaktyvinės energijos ir įtampos reguliavimas bei efektyvesnis dalyvavimas likviduojant totalinę avariją.

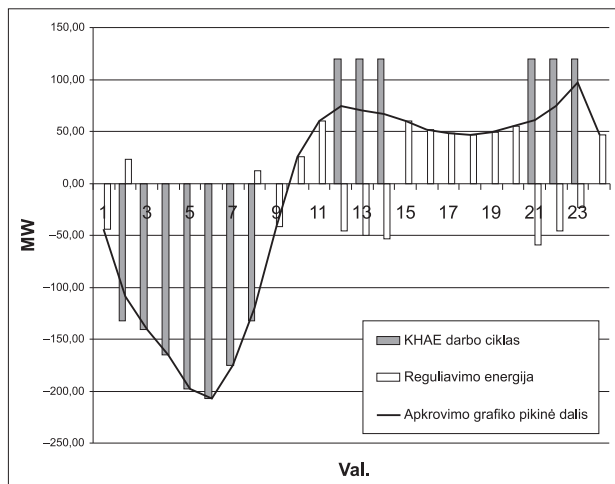
4. Kruonio HAE agregatų reguliavimo diapazono išplėtimas yra viena pagrindinių krypčių, siekiant įgyvendinti jai priskiriamas funkcijas.

5. Šiuo metu Kruonio HAE reguliavimo diapazonas generavimo režime yra apie 20%, o akumuliavimo režime jo praktiškai nėra. Tokį mažą reguliavimo diapazoną seno tipo agregatuose sąlygoja vibracijų hidroagregate atsiradimas.

6. Bendroju atveju Kruonio HAE reguliavimo diapazono išplėtimas sudaromas iš reguliavimo diapazono išplėtimo ir generavimo, ir siurbimo režimuose.

7. Įgyvendinus numatomas priemones, reguliavimo diapazonas abiejuose režimuose padidėtų iki 40%.

8. Kruonio HAE modernizavimo efektyvumo tyrimui sukurtu matematinio modeliu nustatyta, kad po modernizacijos reguliavimo energijos poreikiai galios ir energijos balan-



8 pav. Kruonio HAE paros darbo ciklas po modernizacijos (nedarbo diena 06.06.18)

so užtikrinimui, atsižvelgus į metų laiką, sumažėja nuo 35 iki 83%; dabartinėmis Lietuvos sąlygomis šios elektrinės agregatų per daug ir jie per stambūs tiksliai galiu balanso užtikrinimui, todėl juos galima naudoti kitoms funkcijoms (rezervo sudarymui, komercinei prekybai kitose rinkose); Kruonio HAE dalyvavimas užtikrinant sistemos balansą mažina reguliavimo energijos poreikį iš kitų valstybių tuo didinant sistemos patikimumą.

Gauta 2008 08 20

Priimta 2008 09 22

## Literatūra

1. Tentative PSP World Survey. THDC, Indija, 2007.
2. Schrijver A. Theory of Linear and Integral Programming. John Wiley & Sons, 1998.

Aušra Pažėraitė, Mindaugas Krakauskas, Vidmantas Baltakis, Ramūnas Bikulčius, Daivis Virbickas

## THE MATHEMATICAL MODEL OF THE INFLUENCE OF THE KRUONIS HAES MANOEUVRING ON THE BALANCING OF THE ELECTRIC POWER SYSTEM OF LITHUANIA

### Summary

Usually the system operator buys the regulating energy from generators to maintain the system's balance between supply and demand. System operators own a special power plant for this purpose in some countries. In the case of Lithuania, it could be the Kruonis hydropump storage. Unfortunately, its regulating diapason is not flexible enough. Therefore, the need of improving the flexibility of this plant is considered in the article. The mathematical model for evaluating the impact of the regulating diapason of the KHPS on the minimization of regulating power import is presented.

**Key words:** power system, pump storage, regulation flexibility, balancing, mathematical model

Аушра Пажерайте, Миндаугас Кракаускас, Видмантас Балтакис,  
Рамунас Бикучюс, Дайвис Вирбицкас

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ МАНЕВРЕННОСТИ КРУОНЯЙСКОЙ ГАЭС НА БАЛАНСИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЛИТВЫ

#### *Резюме*

Для обеспечения системного баланса в электроэнергетической системе используется регулировочная электроэнергия, которую системный оператор покупает у производителей и которая не была продана потребителям или даже импортирована. Для Литвы характерным является импорт такой энергии из России. В некоторых странах системные операторы для этой цели в своей собствен-

ности имеют специальные электростанции с исключительной маневренностью. В Литве такой электростанцией могла бы стать Круоняйская гидроаккумуляционная электростанция (КГАЭС). Однако недостаточная маневренность ограничивает ее использование на полную мощность. Анализируется целесообразность увеличения ее маневренности. Представлены математическая модель и ее программная реализация, позволяющая оценить эффективность увеличения маневренности. С помощью предложенной математической модели показано, что увеличение маневренности КГАЭС позволит значительно снизить импорт регулировочной электроэнергии из России.

**Ключевые слова:** электроэнергетическая система, Круоняйская гидроаккумуляционная электростанция, маневренность, системный баланс, математическая модель