

---

# Lietuvos elektros energetikos sistemos savaitinio darbo režimo optimizacinis modelis

---

**Egidijus Norvaiša,  
Arvydas Galinis**

*Lietuvos energetikos institutas,  
Kompleksinių energetikos tyrimų  
laboratorija,  
Breslaujos g. 3, LT-3035 Kaunas*

Šiame darbe aprašomas elektros energetikos sistemos optimizacinis režiminis modelis, sukurtas EFOM-ENV matematinio paketo bazėje, nagrinėjami specifiniai energetinės sistemos modeliavimo klausimai, taip pat trumpai apžvelgiamos EFOM-ENV modelio galimybės. Šis modelis įgalina modeliuoti savaitinį elektros energetikos sistemos darbą, įvertinant kintantį elektrinį ir šiluminį elektrinių apkrovimą. Modeliuojant ES darbą ypač daug dėmesio buvo skiriama Kruonio hidroakumuliacinei elektrinei. Modelis gali būti naudojamas analizuojant elektros energetikos sistemos savaitinius darbo režimus, taip pat sudarant perspektyvinius apkrovimo trukmės grafikus, įvertinančius Kruonio HAE darbą ir naudojamus elektros energetikos sistemos plėtros analizės matematiniuose modeliuose (EFOM-ENV, WASP-III Plus, U-Plane).

**Raktažodžiai:** matematinis modeliavimas, elektros energetikos sistema, darbo režimas, akumuliacijimas

---

## 1. ĮVADAS

Lietuvos elektros energetikos sistemoje esanti Kruonio hidroakumuliacinė elektrinė (Kruonio HAE) yra labai specifinis objektas. Ši elektrinė gali būti naudojama vartotojų įprastiniams elektros energijos poreikiams patenkinti, apkrovimo grafikui išlyginti per parą ir savaitę, galios deficitui greitai panaikinti, netikėtai sustojus vienam ar kitam šiluminės elektrinės agregatui, galingumo balansavimui normalių eksploatacijos darbo režimų metu ir t. t. Kruonio HAE specifika yra susijusi su tuo, kad ji negamina elektros energijos, o tik perslenka laike kitų elektrinių pagamintos energijos pateikimą vartotojui, keisdama elektros energetikos sistemos apkrovimo grafiką turi nemažą įtaką kitų elektrinių darbo režimams, jos panaudojimo galimybes riboja viršutinio baseino talpa ir kt. Dar vienas minėtos elektrinės specifinis bruožas yra tai, kad ji gerokai apsunkina elektros energetikos sistemos perspektyvinės raidos analizę.

Lietuvoje, analizuojant elektros energetikos raidos perspektyvas naudojami matematiniai modeliai EFOM-ENV, WASP-III Plus, U-Plane. Visi jie naudoja iš anksto numatytus apkrovimo trukmės grafikus – metinius, sezoninius, mėnesinius. Hidroakumuliacinė elektrinė keičia apkrovimo grafiko konfigūraciją ir numatytą apkrovimo trukmės grafiką. Šitaip gaunasi užburtas ratas – norime žinoti, kokias elektrines perspektyvoje tikslinga turėti ir koku režimu jos turėtų dirbti. Tačiau apkrovimo trukmės

grafiką jau turime turėti, nežinodami, kaip dirbs didelį galingumą turinti ir apkrovimo grafiką keičianti Kruonio HAE. Šią problemą galima spręsti ekstrapoliuojant Kruonio HAE darbo režimą ir energijos gamybos apimtį į ateitį ir, tuo remiantis, paruošiant perspektyvinius apkrovimo trukmės grafikus. Pastarieji būtų pradinė informacija analizuojant kitų elektrinių raidą ir jų eksploataavimo režimus. Tačiau šis elektros energetikos sistemos raidos analizės metodas nėra visai korektiškas, nes, keičiantis elektrinių struktūrai, keičiasi ir Kruonio HAE darbo režimai bei energijos išdirbis.

Kitas minėtos problemos sprendimo būdas galėtų būti matematinis modelis, nuodugnai aprašantis Kruonio HAE darbą ir tuo pačiu metu modeliuojantis visos elektros energetikos sistemos raidą ilgalaikėje perspektyvoje. Tačiau šio būdo praktinis realizavimas yra labai sudėtingas, o gal ir iš viso neįmanomas dėl labai didelės uždavinio apimties, susijusios su HAE darbo režimų aprašymu [1], tikimybinių reiškinų ir diskretinių kintamųjų (galingumų).

Vadinasi problemos sprendimo objektyvumui padidinti galima taikyti kiek supaprastintą iteracinį metodą, kurio esmė tokia:

1. Elektros energetikos sistemos trumpalaikius darbo režimus modeliuojančiu modeliu išanalizuojami Kruonio HAE darbo režimai ilgalaikėje perspektyvoje, darant prielaidas apie generuojančių galingumų struktūros raidą:

2. Atsižvelgiant į gautus Kruonio HAE darbo režimus koreguojami Lietuvos elektros energetikos sistemos apkrovimo trukmės grafikai;

3. Naudojant pakoreguotus apkrovimo trukmės grafikus matematiniais modeliais EFOM-ENV, WASP-III Plus, U-Plane analizuojama generuojančių šaltinių struktūros raida ilgalaikėje perspektyvoje;

4. Jei 3 punkte gaunami skirtumai generuojančių galingumų struktūroje, priimtoje vykdant 1 punktą, daroma pataisa prielaidose ir procesas kartojamas iki 3 punkto imtinai.

Kad būtų galima vykdyti anksčiau minėtą elektros energetikos sistemos raidos analizę, buvo sukurtas režiminis energetikos sistemos (ypatingą dėmesį skiriant Kruonio HAE) savaitinius darbo režimus modeliuojantis matematinis modelis. Elektros energetikos sistema buvo modeliuojama, pasitelkus EFOM-ENV matematinį paketą, pastarąjį panaudojant nestandartiškai. Toliau trumpai apžvelgiamos standartinės EFOM-ENV modelio galimybės, aprašomas sukurtas elektros energetikos sistemos savaitinio darbo režimo modeliavimo matematinis modelis, specifiniai modeliavimo klausimai ir jų realizavimas EFOM-ENV modelio bazėje.

## 2. BENDRA EFOM-ENV MODELIO CHARAKTERISTIKA

Darbe naudojamas EFOM-ENV [2] modelis yra galingas energetikos planavimo instrumentas, sukurtas Europos Sąjungos GDXVII komisijai. Jis buvo naudojamas nuo 1980-ųjų metų pradžios energetikos planavimui daugelyje Europos Sąjungos ir kitų šalių.

EFOM-ENV modelis apibūdinamas šiais bruožais:

- tai techninis ekonominis ilgalaikio energetikos planavimo modelis;
- tai energijos tiekimo modelis, apimantis energijos išgavimo, transformavimo ir vartojimo sritis bei įtaką gamtinei aplinkai kenksmingų medžiagų išskyrimo prasme;
- tai optimizacinis energijos tiekimo modelis, iš numatytų alternatyvių technologijų aibės tam tikro kriterijaus (paprastai tai yra energetikos sistemos funkcionavimo ir plėtros diskontuotos išlaidos) atžvilgiu parenkantis efektyviausias technologijas, reikalingas energijai išgauti, transformuoti ir transportuoti;
- modelis dirba, esant numatytiems naudingai suvartojamos energijos poreikiams;
- modelyje taikomas matematinis metodas – tiesinis programavimas.

Energetikos sistema, aprašytą EFOM-ENV modelio priemonėmis, sudaro orientuotas grafai, susidedantis iš šakų ir mazgų. Šakas atitinka įvairūs procesai (energijos gamyba, vartojimas, transportavimas), o mazgai atlieka ryšio tarp šių procesų funkciją. Ap-

rašant kiekvieną procesą (šaką), nurodomi jo parametrai ir grupė vardų, leidžiančių identifikuoti patį procesą. Tuo tarpu mazgai turi tik savo numerį ir tipą, kuris nusako srautų, ateinančių į tą patį mazgą ar išeinančių iš jo, santykį. Energetikos sistemoje vykstantys procesai ir atskirų sistemą apibūdinančių veiksnių tarpusavio ryšiai aprašomi teisinėmis lygtimis visose energijos srauto grandyse, pradedant pirminių energijos išteklių išgavimu ir baigiant naudingą energijos suvartojimu.

Kiekviena technologija apibūdinama daugeliu parametru (instaliuoti galingumai, lyginamieji kapitaliniai įdėjimai, kintamosios ir pastoviosios eksploatacijos išlaidos, naudingumo koeficientas, tarnavimo laikas ir t. t.), kurie įvedami į modelio duomenų bazę. Pagal pateiktus technologijų duomenis specialiu matricų generatoriumi formuojamas tiesinio programavimo uždavinio pavidalo energetikos sistemos matematinis modelis. Modelio rezultatas – aibė technologijų, galinčių patenkinti numatytus energijos poreikius, sunaudojami atskirų kuro rūšių kiekiai, išskiriami teršalai, taip pat investicijos ir eksploatacijos išlaidos.

Energetikos sistemos darbas modeliuojamas atskirai žiemos ir vasaros sezonams, įvertinant pikinį ir bazinį darbo režimus. Sistemos darbo režimams aprašyti naudojami žiemos ir vasaros sezonų apkrovimų trukmės grafikai.

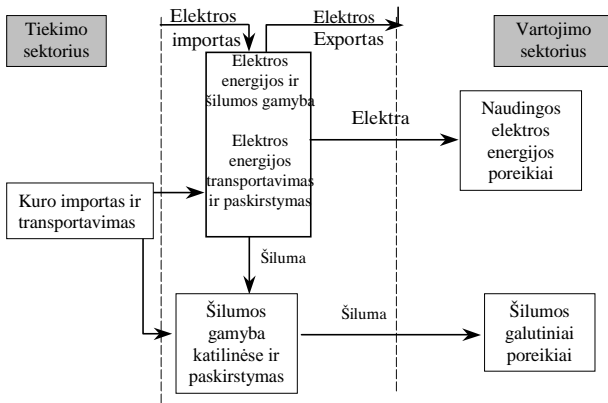
## 3. ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMOS SAVAITINĮ DARBO REŽIMĄ APRAŠANČIO MODELIO STRUKTŪRA

Bet kurios energetikos sistemos modelį sudaro 3 pagrindinės dalys, kurias sąlyginai galima apibrėžti šitaip:

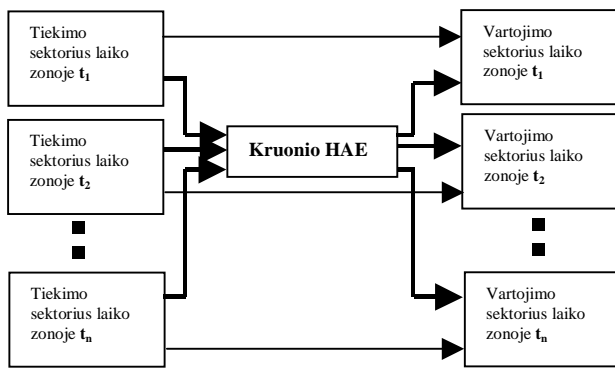
- Žaliavos (išteklių) bei jų apdorojimas ir transportavimas;
- Energijos transformavimas (kuro vertimas elektra ir šiluma). Į šią dalį taip pat įeina ir gamtosauginės technologijos;
- Galutinės energijos panaudojimas (jį lemia numatyti elektros ir šilumos poreikiai).

Atsižvelgiant į Lietuvos energetikos sistemos specifiką bei bendrus modeliavimo dėsnius, elektros energetikos sistemos analizės modelis turėtų struktūrą, parodytą 1 pav. [3].

Jungtiniame „Elektros energijos ir šilumos gamybos“ bei „Elektros energijos transportavimo ir paskirstymo“ bloke yra Kruonio HAE darbą modeliuojanti šaka. Ji bus skirtingas laiko zonas modeliuojančių grafų jungiamoji grandis. Todėl šią šaką išskirsime kaip atskirą modelio elementą. Taigi savaitinį elektros energetikos sistemos darbo režimą aprašančio matematinio modelio struktūra galėtų būti tokia (2 pav.).



1 pav. Elektros energetikos sistemos analizės modelio struktūra, vienoje laiko zonoje



2 pav. Savaitinį darbo režimą modeliuojančio modelio struktūrinė schema

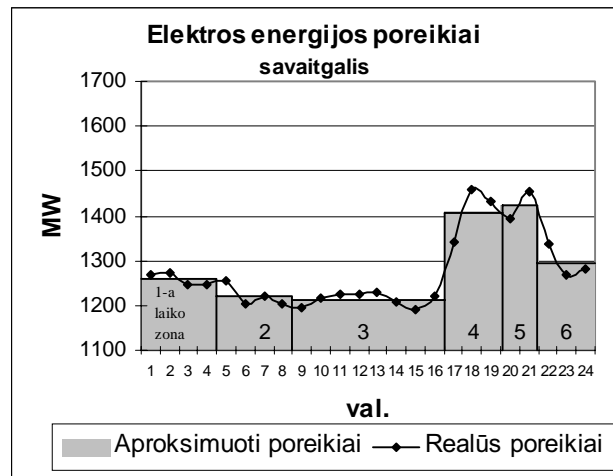
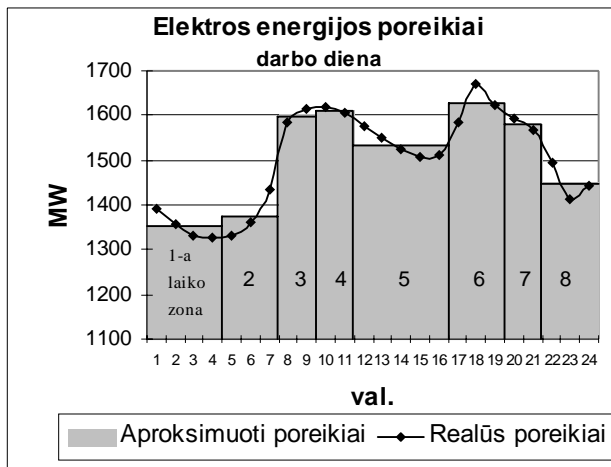
EFOM-ENV modelis skirtas ilgalaikiam planavimui, bet kadangi mūsų tikslas buvo sumodeliuoti savaitinį ES darbo režimą, jį reikėjo panaudoti nestandartiniu būdu. Dėl modelio lankstumo tai galima padaryti, parengiant atitinkamą grafą ir sugeneruojant atitinkamas savaitinį darbo režimą aprašančias lygtis. Be to, pastoviasias elektrinių funkcionavimo išlaidas reikia perskaiciuoti savaitės trukmei,

išjungti standartinę EFOM-ENV modelio režimų reprezentavimo funkciją, kada yra modeliuojami tik žiemos ir vasaros sezonai ir pikinis/bazinis apkrovimai, nenaudoti standartinės dinaminį procesų modeliavimo procedūros su keletu laiko intervalų (metų). Šitaip tariamai apsiribojame vienerių metų modeliavimu, o realiai, specialiai sukurtomis lygtimis išsamiai modeliuojame vieną metų savaitę. Sistemos funkcionavimo atskirose savaitės laiko zonose modeliavimą atliekame kartodami energetikos sistemos funkcionavimą vienoje laiko zonoje modeliuojantį tinklinį grafą tiek kartų, kiek savaitėje išskirsime būdingų laiko zonų. Vienos laiko zonos ryšys su kita palaikomas, pasitelkus Kruonio HAE modeliujančią šaką, aprašant elektrinių manevrines charakteristikas ir Kruonio HAE aukštutinio baseino energijos balansą.

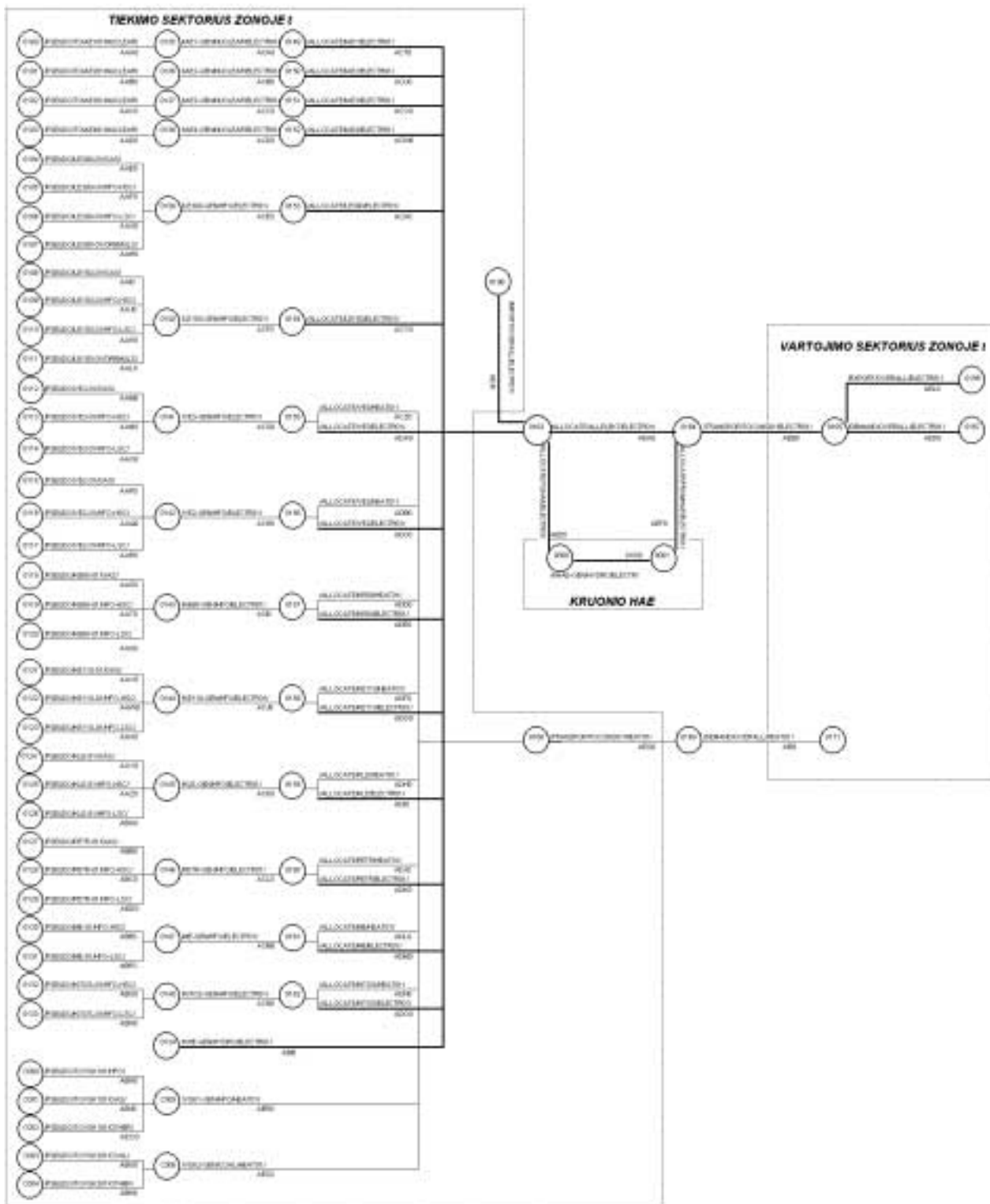
#### 4. APKROVIMO GRAFIKO SKIRSTYMAS Į ZONAS

Savaitė suskirstoma į tam tikras laiko zonas, ir energetikos sistema modeliuojama kiekvienai laiko zonai. Laiko zona – tai laikas per parą, kai energijos vartojimas yra sąlyginai pastovus. Laiko zonų skaičius per parą ir jų trukmė valandomis parenkama atsižvelgiant į apkrovos grafiką. Pavyzdžiui, viena laiko zona gali būti nagrinėjamos savaitės pirmadienio 1–7 valandos (naktis iš sekmadienio į pirmadienį). Kita laiko zona galėtų būti rytinio apkrovimo augimą atitinkantis laikotarpis ir t. t. Savaitės skirstymas į būdingas laiko zonas yra laisvas modelio vartotojo pasirinkimas, siekiant maksimaliai tiksliai atspindėti apkrovimo grafiko kitimą per savaitę (žr. 3 pav.) ir neviršyti suminio lygčių skaičiaus, kuris EFOM-ENV modelyje yra 12500.

Išsamus tinklinis grafas, modeliuojantis energetikos sistemos funkcionavimą vienoje laiko zonoje, parodytas 4 pav. Energetikos sistema kitose laiko zonose mo-



3 pav. Paros skirstymas į būdingas laiko zonas

4 pav. Išsamus modelio  $t$ -osios laiko zonos tinklinis grafas

deliuojama analogiškai. Visos šio grafo dalys turi vieną bendrą jas jungiančią šaką – Kruonio HAE darbą modeliuojančią šaką – XXXO. Tuo būdu per paskirstymo šaką AEA0 energija gali būti tiekiamas tiesiogiai vartotojams arba per Kruonio HAE perduodama į kitas laiko zonas (šakos AEE0, AEF0).

1 lentelėje pateikiamos kuro tiekimo sektorių modeliuojančios šakos. Pagrindiniai parametrai, apibūdinantys šias šakas, yra importuojamo kuro kainos.

Energijos transformavimo bloke modeliuojamos visos šiuo metu egzistuojančios elektrinės (2 lentelė), ypač daug dėmesio skiriant kuo tikslesniam elek-

1 lentelė. Kuro tiekimo sektorių modeliuojančios šakos								
Elektrinė	Elektrinės kodas	Elektrinei tiekiamo kuro rūšis ir kuro kodas modelyje						
		branduolinis kuras	dujos	sieringas mazutas	mažai sieringas mazutas	orimulsija	anglys	kitas kuras
		NUCLEAR	GAS	HFO-HSC	HFO-LSC	ORIMULS	COAL	OTHER
Ignalinos AE 1 bloko 1 turbina	IAE1	AAA0						
Ignalinos AE 1 bloko 2 turbina	IAE2	AAB0						
Ignalinos AE 2 bloko 1 turbina	IAE3	AAC0						
Ignalinos AE 2 bloko 2 turbina	IAE4	AAD0						
Lietuvos el., 300 MW blokai	LE300		AAE0	AAF0	AAG0	AAH0		
Lietuvos el., 150 MW blokai	LE150		AAI0	AAJ0	AAK0	AAL0		
Vilniaus TE-3	VE3		AAM0	AAN0	AAO0			
Vilniaus TE-2	VE2		AAQ0	AAQ0	AAQ0			
Kauno TE, 60 MW blokas	KE60		AAS0	AAT0	AAU0			
Kauno TE, 110 MW blokas	KE110		AAV0	AAW0	AAZ0			
Klaipėdos TE	KLE		AAY0	AAZ0	ABA0			
Petrašiūnų TE	PETR		ABB0	ABC0	ABD0			
Mažeikių TE	ME			ABE0	ABF0			
Pramoninės elektrinės	KITOS			ABG0	ABH0			
Vandens šildymo katilai	VSK1		AEN0	AEM0				AEO0
Vandens šildymo katilai	VSK2						AEP0	AEQ0

tros energijos ir šilumos gamybos bloko aprašymui. Norint korektiškai modeliuoti termofikacines elektrines, tam tikrus jų agregatus (t. y. garo katilus, turbinos-generatoriaus bloką, vandens šildymo katilus) reikia modeliuoti atskirai. Sudėtingiausiai modeliuojamas objektas yra TE turbinos, kadangi jos dalyvauja dviejų rūšių energijos – šilumos ir elektros energijos gamyboje. Šių elektrinių turbinos yra dviejų skirtingų tipų – kondensacinės ir priešslėginės. Jų darbas ir modeliavimas iš principo skiriasi. Priešslėginėse turbinose šilumos tiekimas glaudžiai susietas su elektros energijos gamyba, tuo tarpu kondensacinėse turbinose šilumos tiekimas, esant stabiliai elektros energijos gamybai, gali kisti labai plačiose ribose. Šios turbinų sąvybės modelyje atspindimos šitaip:

2 lentelė			
Elektrinė	Modeliuojamo agregato kodas EFOM-ENV modelyje		
	turbina	generatorius	šilumos nuėmimas iš turbinos
Ignalinos AE	ACA0	ACT0	
	ACB0	ACU0	
	ACC0	ACV0	
	ACD0	ACW0	
Lietuvos elektrinės 300 MW blokai	ACE0	ACX0	
Lietuvos elektrinės 150 MW blokai	ACF0	ACV0	
Vilniaus TE-3	ACG0	ADA0	ACZ0
Vilniaus TE-2	ACH0	ADC0	ADB0
Kauno TE 60 MW blokas	ACI0	ADE0	ADD0
Kauno TE 110 MW blokas	ACJ0	ADG0	ADF0
Klaipėdos TE	ACK0	ADI0	ADH0
Petrašiūnų TE	ACL0	ADK0	ADJ0
Mažeikių TE	ACM0	ADM0	ADL0
Pramonės įmonių TE	ACN0	ADO0	ADN0
Kauno HE		ABI0	

- priešslėginėms turbinoms numatomas fiksuotas tiekiamos šilumos ir elektros energijos santykis. Techniniai ekonominiai rodikliai atitinka elektrinės termofikacinį darbo režimą;

- kondensacinių turbinų visi techniniai ekonominiai parametrai atitinka kondensacinį darbo režimą, tačiau modeliuojama galimybė techniškai prieinamoje ribose tiekti šilumą vartotojams [4]. Tuo būdu įvertinamas visas galimas šių turbinų darbo režimų diapazonas, o jų ekonomiškumas priklauso nuo tiekiamos elektros ir šilumos energijos kiekio.

Pavyzdžiui, šaka ACGO (4 pav.), modeliuojančia Vilniaus TE-3 turbinas, tekančią energijos srautą atitinka kondensacinio darbo režimo elektros energijos išdirbį ir, jei toks darbo režimas numatytais sąlygomis ekonominiu požiūriu yra tikslingas, visas energijos srautas toliau jau teka šaka ADA0, modeliuojančia tik elektros energijos išdirbį. Jei numatytais sąlygomis reikalingas ir tam tikras šilumos tiekimas, dalis energijos srauto, tekančio šaka ACG0 (Vilniaus TE-3 maksimalaus šiluminio apkrovimo atveju tai sudaro iki 17,2%), pasuka į šaką ACZ0, kurios išėjime dėl naudingumo koeficiento, gerokai didesnio už 1 (Vilniaus TE-3 turbinoms jis lygus 7,2), gauname realų šilumos tiekimą iš turbinos. Elektros energijos gamybą modeliuojančia šaka ADA0 šiuo atveju teka šį termofikacinį darbo režimą atitinkantis elektros energijos kiekis. Anksčiau minėti techniniai parametrai apskaičiuojami iš konkrečios turbinos techninių charakteristikų arba eksploatacijos duomenų.

Šilumos energija gali būti gaminama ne tik termofikacinėse elektrinėse, bet ir vandens šildymo katiluose, jei tai naudinga ekonominiu požiūriu. Todėl, siekiant objektyviai įvertinti situaciją šilumos rinkoje, modeliuojami ir vandens šildymo katilai, kūrenami kietu AER0, skystu ir dujiniu kuru AES0.

Šalia elektrinių taip pat modeliuojamas elektros energijos importas (AEJ0 šaka) ir eksportas (AEL0 šaka), išskiriant skirtingas kainas bazinei ir pikinei elektros energijai. Importo ir eksporto tikslingumas priklauso nuo elektros energijos gamybos bei transportavimo išlaidų šalyje, taip pat nuo jos kainos tarptautinėje rinkoje.

Modelyje elektros energijos perdavimą ir vartojimą modeliuoja AEB0 ir AED0 šakos (žr. 4 pav.). Šilumos poreikius modeliuoja AEG0 ir AEI0 šakos.

Šiame skyriuje aprašytam grafui apibūdinti reikalingi techniniai ir ekonominiai rodikliai: įvairių elektrinių įrengti galingumai, mažiausi ir didžiausi elektrinės eksploatacijos galingumai, energijos sąnaudos saviems reikalams, naudingumo ir avarinių prastovų koeficientai, teršalų emisija į atmosferą, pastoviosios ir kintamosios elektrinių eksploataavimo išlaidos ir t. t.

## 5. VEIKSNIAI, KURIŲ NEVERTINA STANDARTINIS EFOM-ENV MODELIO MATEMATINIS APARATAS

Dauguma lygčių naudojama tiek standartinėje EFOM-ENV modelio versijoje, tiek režiminiame elektros energetikos sistemos matematiname modelyje. Tačiau kai kuriuos aspektus reikia papildomai matematiškai aprašyti.

Pirmiausia reikia, kad elektrinės ar katilinės galingumas atskiroje laiko zonoje nebūtų didesnis už instaliuotą galingumą. Standartinės EFOM-ENV matematinio modelio lygtys šį reiškinį galėtų aprašyti, jei nenorėtume vertinti energetikos objektų pastoviųjų išlaidų dedamosios. Tačiau pastarąją būtina vertinti, norint apskaičiuoti sumines energijos gamybos išlaidas bei, esant generuojančių galingumų pertekliui, daryti prielaidas apie tam tikrų objektų nereikalingumą.

Antrasis veiksnys, kurį reikia aprašyti papildomomis lygtimis, yra Kruonio HAE viršutinio baseino energijos balansas arba jo neperpildymo kontrolė. Trečiasis elementas, kurio neaprašo standartinio EFOM-ENV modelio lygtys, yra energetikos objektų manevrinės charakteristikos – galingumo didinimo ar mažinimo greitis.

## 6. GALINGUMO TAM TIKROSE LAIKO ZONOSE RIBOJIMAS

Būtiną sąlygą, kad konkretaus energetikos objekto galingumas tam tikroje laiko zonoje nebūtų didesnis už instaliuotą galingumą, matematiškai galima išreikšti paprasta lygtimi.

$$P_{j,t} \leq P_{j,inst}; \quad (1)$$

čia  $P_{j,t}$  –  $j$ -ojo objekto galingumas  $t$ -ojoje laiko zonoje;

$P_{j,inst}$  –  $j$ -ojo objekto instaliuotas galingumas.

Tačiau reikia, kad EFOM-ENV modelio lygčių generatorius šią lygtį sugeneruotų. Todėl naudosis standartinėmis šio modelio galimybėmis ir procesų kodavimo taisyklėmis. EFOM-ENV modelyje yra numatyta pagalbinių medžiagų, naudojamų energijos gamybos procese, apskaitos kontrolė. Pavyzdžiui, jeigu turime  $k$  objektų, per tam tikrą laikotarpį pagaminančių elektros energijos kiekius  $W_i$  ( $i = 1, k$ ) ir gamybos procese naudojančių pagalbinę medžiagą  $ANCXXX$ , tai EFOM-ENV modelio matricių generatorius sukuria lygtį

$$W - \sum_{i=1}^k W_i \cdot ANCXXX \geq 0; \quad (2)$$

čia  $W$  – pagalbinės medžiagos srautas per tam tikrą laikotarį jos poreikį modeliuojančioje šakoje. (Papildomą šaką, modeliuojančią pagalbinės medžiagos  $ANCXXXX$  poreikį, modeliuotojas turi būti numatęs ir atitinkamai užkodavęs).

Šią EFOM-ENV modelio savybę galima panaudoti galingumo ribojimo lygtims generuoti režiminiame elektros energetikos sistemos matematiname modelyje. Tam tikslui šalia šakų (EL-GEN), modeliuojančių  $j$ -ojo energetikos objekto energijos srautus  $W_{j,t}$  (žr. 5 pav.), įdedame ir atitinkamai užkoduojame šaką EL-INST, modeliuojančią  $j$ -ojo energetikos objekto maksimaliai galimą energijos gamybą per parą  $W_{j,max}$ , taip pat fiktyvios pagalbinės medžiagos  $ANCXXXX$  tiekimo šaką (ANC) (pagalbinės medžiagos srautas šioje šakoje yra  $W$ ).

Šias šakas tarpusavyje susieja parametras  $ANCXXXX$  (vietoj  $XXXX$  gali būti bet kurie simboliai, padedantys identifikuoti medžiagą). EL-GEN ir EL-INST šakos aprašomos parametru  $ANCXXXX$ , o fiktyvi šaka atpažįstama pagal raktažodį  $ANCXXXX$  jos kodavime.

Kadangi EFOM-ENV modelis operuoja ne galingumais, o energijos srautais,  $t$ -ajai laiko zonai gauname tokią lygtį:

$$W - (W_{j,t} \cdot ANCXXXX_1 + W_{j,max} \cdot ANCXXXX_2) \geq 0; \quad (3)$$

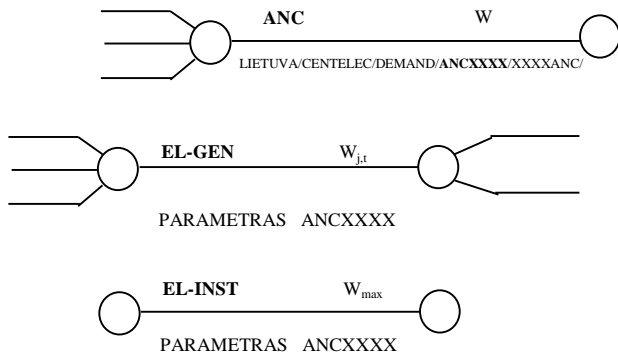
čia  $ANCXXXX_1$ ,  $ANCXXXX_2$  – koeficientai, reiškiantys pagalbinės medžiagos „poreikį“ EL-GEN ir EL-INST šakose.

Jei energijos srautas  $W$  fiktyvia šaka ANC yra lygus 0 (tai pasiekiamo pasitelkę parametru  $FLOWMAX = 0$ ), gauname:

$$-W_{j,t} \cdot ANCXXXX_1 - W_{j,max} \cdot ANCXXXX_2 \geq 0 \quad (4)$$

arba

$$W_{j,t} \cdot ANCXXXX_1 \leq -W_{j,max} \cdot ANCXXXX_2; \quad (5)$$



5 pav. Galingumo ribojimui modeliuoti naudojamos šakos

Jeigu  $t$ -osios laiko zonos trukmę pažymėsime  $T_t$ , (1) lygtį galėsime perrašyti:

$$W_{j,t} \frac{1}{T_t} \leq W_{j,max} \cdot \frac{1}{24}, \text{ arba } W_{j,t} \frac{24}{T_t} \leq W_{j,max} \cdot (6)$$

Palyginus (5) su (6), matyti, kad norėdami EFOM-ENV modelio matricių generatoriumi sugeneruoti (1) lygtį, turime naudoti 5 pav. parodytą modeliavimo principą, o pagalbinių medžiagų „poreikio“ koeficientų reikšmes  $t$ -ojoje laiko zonoje pasirinkti tokias:

$$\begin{aligned} \text{EL-GEN šakoje} &- ANCXXXX_1 = 24/T_t, \\ \text{EL-INST šakoje} &- ANCXXXX_2 = -1. \end{aligned}$$

Šiuo atveju (5) lygtyje esantys koeficientai  $ANCXXXX_1$  ir  $ANCXXXX_2$  reiškia ne pagalbinės medžiagos naudojimą energijos gamybos procese, o energijos ir galingumo sąryšį.

## 7. KRUONIO HAE AUKŠTUTINIO BASEINO NEPERPILDYMO KONTROLĖ

Kruonio HAE aukštutinio baseino neperpildymo kontrolė atliekama, remiantis toliau pateiktomis lygtimis:

$$W_{už,t} \cdot \eta - W_{gen,t} \leq W_{limitas}; \quad (7)$$

$$(W_{už,t} + W_{už,t+1}) \cdot \eta - (W_{gen,t} + W_{gen,t+1}) \leq W_{limitas}; \quad (8)$$

$$\dots$$

$$(W_{už,t} + W_{už,t+1} + \dots + W_{už,n}) \cdot \eta - (W_{gen,t} + W_{gen,t+1} + \dots + W_{gen,n}) \leq W_{limitas}; \quad (9)$$

čia  $W_{už,t}$  – elektros energija, naudojama HAE užkrovimui laiko zonoje  $t$ ,

$W_{gen,t}$  – HAE generuojama elektros energija laiko zonoje  $t$ ,

$W_{limitas}$  – HAE aukštutinio baseino talpa, išreikšta galimu sukaupti elektros energijos kiekiu,

$\eta$  – HAE darbo ciklo naudingumo koeficientas,

$n$  – laiko zonų skaičius.

Šios lygtys režiminiame modelyje sugeneruojamos pasinaudojus anksčiau aprašytu pagalbinių medžiagų apskaitos modeliavimo principu. Šiuo atveju šalia šakų, modeliuojančių Kruonio HAE užkrovimą ir energijos gamybą, sukuriama viršutinio baseino talpą modeliuojanti šaka ir tiek fiktyvių ANC šakų, kiek laiko zonų yra modeliuojama. Kiekvienai laiko zonai išskiriamas skirtingas  $ANCXXXX$  parametro pažymėjimas, o jų skaitinės reikšmės yra šios:

šakose, modeliuojančiose HAE užkrovimą, –  $ANCXXXX = \eta$ ,

šakose, modeliuojančiose HAE energijos gamybą ir viršutinio baseino talpą, –  $ANCXXXX = -1$ .

Šiuo atveju HAE viršutinio baseino talpą modeliuojančiai šakai priskiriama  $n$  skirtingų  $ANCXXXX$  parametrų.

## 8. ENERGETIKOS OBJEKTŲ MANEVRINGUMO ĮVERTINIMAS

Energetikos objektų manevringumas gali būti apibūdinamas galingumo didinimo ir mažinimo greičiu arba minimalaus ir maksimalaus eksploatacijos galingumo santykiu. Kadangi atskirų laiko zonų trukmė ir galingumo didinimo ar mažinimo greitis yra žinomi, energetikos objektų manevrinės charakteristikos gali būti išreiškiamos galingumo atskirose laiko zonos santykiu. Šiuo atveju apkrovos mažinimą ribojančią lygtį būtų galima užrašyti:

$$\frac{P_{t+1}}{P_t} \geq k; \text{ arba } P_t \cdot k \leq P_{t+1}; \quad (10)$$

čia  $P_t$  – objekto galingumas  $t$ -ojoje laiko zonoje,

$P_{t+1}$  – objekto galingumas  $t + 1$ -ojoje laiko zonoje,

$k$  – koeficientas, nusakantis objekto galingumo galimą reikšmę  $t + 1$  zonoje, palyginti su  $t$ -ąja zona  $k < 1$  apkrovos mažinimo lygtyse ir  $k > 1$  apkrovos didinimo ribojimo lygtyse. Apkrovos didinimo lygtyse nelygybės ženklas pakeičiamas priešingu.

Energetikos objektų darbą aprašant (10) lygtimi, panaudojamas tam tikras apribojimas, neleidžiantis staiga keisti galingumo. Parenkant įvairias koeficiento  $k$  reikšmes galima modeliuoti daugiau ar mažiau manevringus objektus.

Jei energetikos objekto manevrinės charakteristikos gali būti nusakomos minimalaus ir maksimalaus eksploatacijos galingumo santykiu, matematiniam uždavinio formulavimui taip pat gali būti naudojama (10) lygtis. Skirtumas tik tai, kad šiuo atveju tarpusavyje lyginamas ne gretimų laiko zonų galingumas, o nagrinėjamo laiko periodo maksimalus ir minimalus galingumai.

Energetikos objektų manevringumo ribojimas irgi modeliuojamas pasitelkus fiktyvias šakas. Šakoms, modeliuojančioms atskiro objekto gaminamą energiją laiko zonos  $t$  ir  $t+1$ , sukuriama fiktyvi šaka, kurioje energijos srautas  $W$  prilyginamas nuliui. Gauname šias lygtis:

$$W - (W_t \cdot ANCXXXX_1 + W_{t+1} \cdot ANCXXXX_2) \geq 0; \quad (11)$$

čia  $W_t$ ,  $W_{t+1}$  – energetikos objekto pagaminta energija laiko zonos  $t$  ir  $t+1$ ;

$ANCXXXX_1$  ir  $ANCXXXX_2$  – koeficientai.

Kai  $W = 0$ , (11) virsta į šią lygtį:

$$W_t \cdot ANCXXXX_1 \leq -W_{t+1} \cdot ANCXXXX_2. \quad (12)$$

Šioje lygtyje taip pat figūruoja energija, bet ne galingumai, kaip norėjome (10) lygtyje. Todėl koeficientai  $ANCXXXX_1$  ir  $ANCXXXX_2$  turi būti parinkti taip, kad, be tam tikrų galingumo santykių skirtingose laiko zonos, atliktų ir energijos transformavimo į galingumą funkciją. Remiantis (10) ir (12) lygčių analogija, koeficientas  $ANCXXXX_1$  turi įvertinti objekto nukrovimo reikšmę ( $k$ ), taip pat energijos  $W_t$  transformavimo į galingumą laiko zonoje  $t$  skaitinę reikšmę. Taigi:

$$ANCXXXX_1 = k \cdot \frac{1}{T_t} = \frac{k}{T_t}; \quad (13)$$

čia  $T_t$  –  $t$ -osios laiko zonos trukmė.

Analogiškai koeficiento  $ANCXXXX_2$  reikšmė yra:

$$ANCXXXX_2 = -\frac{1}{T_{t+1}}; \quad (14)$$

(13) ir (14) įrašę į (12), gauname (10).

## 9. IŠVADOS

Sukurtas elektros energetikos sistemos režiminis modelis įgalina:

1. Įvertinant Kruonio HAE įtaką nuodugniam modeliuoti elektros energetikos sistemos darbą per savaitę;
2. Vertinti ir besikeičiantį elektrinį apkrovimą, ir šiluminio apkrovimo kitimą per savaitę;
3. Termofikacinių elektrinių darbą parinkti, atsižvelgus į kitų elektrinių technines charakteristikas, ekonominius rodiklius, taip pat vandens šildymo katilų panaudojimo galimybes ir ekonomiškumą;
4. Optimizuoti kuro balanso struktūrą, atsižvelgiant į tam tikrų kuro rūšių kainą, panaudojimo efektyvumą ir gamtosauginius apribojimus;
5. Remiantis skaičiavimo rezultatais, sudaryti perspektyvinius apkrovimo trukmės grafikus, įvertinančius Kruonio HAE darbą ir naudojamus elektros energetikos sistemos plėtros analizės matematinuose modeliuose EFOM-ENV, WASP-III Plus, U-Plane.

Gauta  
2001 05 02

## Literatūra

1. Rentz O., Haasis H. D. et al. Optimal control strategies for reducing emissions from energy conversion and energy use. Institute for Industrial Production, Karlsruhe, 1988. 156 p.



2. E. van der Voort, Donni E., Thonet C. et al. Energy supply modeling package EFOM-12C Mark I: Mathematical description. CABAY, Louvain-la-Neuve, Belgium, 1984.
3. Galinis A. Least cost power sector development programme for Lithuania // Galinis A., Jankauskas V., Miškinis V., Vilemas J. Global energy transitions: 19th IAAE international conference proceedings [Budapest, Hungary, May 27–30, 1996]. Budapest, 1996. P. 234–243.
4. Galinis A. Bottom up modeling of an integrated power market with hydro reservoirs // Galinis A., Hindberger M., Ravn H. F. Simulation, gaming, training and business process reengineering in operations: second international conference [Riga, Latvia, September 8–9, 2000]. Riga, 2000. P. 75–79.

Egidijus Norvaiša, Arvydas Galinis

#### THE OPTIMIZATION MODEL OF WEEKLY WORK OF THE LITHUANIAN ENERGY SYSTEM

##### Summary

Description of the optimization regime model of the energy system, created on the basis of the EFOM-ENV mathematical package, and a short introduction to the EFOM-ENV model itself are presented. The created mathematical model enables modeling of the weekly work of the energy system, evaluating the alternative electric and thermal load of power plants. Special attention was paid to the Kruonis HPSPP during the modeling process of the energy system. The model may be used for analysis of operation regimes of power systems and preparation of load duration curves reflecting the impact of the Kruonis HPSPP and used in mathematical models (EFOM-ENV,

WASP-III Plus, U-Plane) for analysis of the developing energy system.

**Key words:** mathematical modeling, power systems, operation regime storage

Эгидиус Норвайша, Арвидас Галинис

#### ОПТИМИЗАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РЕЖИМА НЕДЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ЛИТОВСКОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

##### Резюме

В статье рассматривается оптимизационная режимная модель электроэнергетической системы, разработанная на базе математического пакета EFOM-ENV, исследуются специфические вопросы моделирования электроэнергетических систем, а также коротко представляются возможности модели EFOM-ENV. Разработанная модель позволяет моделировать недельную работу электроэнергетической системы с учетом меняющейся тепловой и электрической нагрузки электростанций. В процессе моделирования электроэнергетической системы особое внимание было сосредоточено на Круонисскую гидроаккумулирующую электростанцию. Модель может быть использована для анализа недельной работы электроэнергетической системы, а также для построения перспективных графиков по продолжительности нагрузки, учитывающих работу Круонисской гидроаккумулирующей электростанции и используемых в математических моделях (EFOM-ENV, WASP-III Plus, U-Plane), предназначенных для исследования перспективного развития электроэнергетических систем.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, электроэнергетическая система, режим работы, аккумулярование