

Šilumos akumuliacinės talpos parinkimo ekonominis vertinimas, esant skirtingai mažos galios kogeneracinės jėgainės veikimo strategijai

Giedrė Streckienė,

Vytautas Martinaitis,

Giedrius Šiupšinskas

Pastatų energetikos katedra,

Vilniaus Gedimino

technikos universitetas,

Saulėtekio al. 11–2410,

LT-10223 Vilnius

El. paštas: giedre.streckiene@vgtu.lt,

vsmart@vgtu.lt,

giedrius@vgtu.lt

Straipsnyje nagrinėjamas šilumos akumuliacinės talpos veikimas ir jos dydžio ekonominis parinkimas mažos galios kogeneracinėje jėgainėje, esant įvairiems elektros tarifų variantams. Naudojant imitacinį jėgainių modeliavimo įrankį energyPRO, analizuojami skirtingų akumuliacinių talpų veikimo režimai. Atlikta analizė parodo, kad talpos dydis ir veikimas gerokai priklauso nuo vartotojo elektros ir buitinio karšto vandens poreikių bei jėgainės veikimo strategijos, kuriai įtaką turi ekonominės sąlygos.

Raktažodžiai: kogeneracija, šilumos akumuliacinė talpa, veikimo režimas, elektros tarifas, grynoji dabartinė vertė

ĮVADAS

Ekonominės, ekologinės ir energijos tiekimo patikimumo bei saugumo problemos, susijusios su energijos gamyba, verčia ieškoti būdų kaip efektyviau panaudoti pirminę kuro energiją. Vienai pažangiausių energijos gamybos technologijų galima priskirti kogeneraciją, t. y. vienalaikę gamybą, kai to paties proceso metu gaminama šiluma ir elektros arba mechaninė energija. Šitaip pagamintai elektrai ir šilumai sunaudojama 20–30 % mažiau kuro negu jėgainėse, kurios gamina šias energijos rūšis atskirai [1].

Didelės galios kogeneracinės jėgainės Lietuvoje naudojamoms centralizuoto šilumos tiekimo įmonėse. Tuo tarpu mažos galios kogeneracinės jėgainės (iki 1 MWe) gali būti panaudotos pastatų kompleksuose, visuomeniniuose ir pramoniniuose pastatuose. Energijos gamybos potencialas, naudojant kogeneraciją tiek Lietuvoje, tiek daugumoje ES valstybių, yra nepanaudotas [2].

Pastaraisiais metais padėtis Lietuvos elektros energetikos sektoriuje gerokai pasikeitė – buvo uždaryta Ignalinos atominė elektrinė, pradėjo formuotis ir Skandinavijos elektros biržos „Nord Pool Spot“ principais veikti Lietuvos elek-

tros birža, o ateities planuose numatytas Baltijos ir Šiaurės šalių elektros rinkų susijungimas. Laisvosios elektros rinkos sąlygomis kogeneracinės jėgainės operatorius turi parduoti elektrą tada, kai jos kaina aukšta, ir kartu užtikrinti visą reikalingą šilumos poreikį. Šiuo atveju jėgainės operatorius turi priimti sprendimus, esant tam tikrai nežinomybei, nes elektros kaina elektros biržoje nuolat kinta. Elektros kaina laisvojoje rinkoje veikiama kuro kainų pokyčių, vartotojų elektros poreikių, elektros gamybos kitose jėgainėse, atsinaujinančiųjų energijos išteklių indėlio į elektros gamybą ir kt. Pavyzdžiui, Danijoje augant vėjo jėgainėse pagamintos elektros kiekiui, elektros kaina rinkoje mažėja. Gebėjimas pasinaudoti kiekvieną valandą kintančiomis elektros pardavimo kainomis gali būti pasiekiamas, pasirenkant kogeneratorių kiekį ir galią, taip pat šilumos akumuliacinio įrenginio, suteikiančio gamybos įrenginiams lankstumo jėgainėje [1, 3].

Parinkant mažos galios kogeneracinę jėgainę, svarbus vaidmuo tenka vartotojo poreikiams, kurie paprastai smarkiai kinta per savaitę, parą ar net valandą, tuo tarpu greitai ir labai keisti šilumos gamybos agregato galią ne visada įmanoma ir dažnai neefektyvu. Mažos galios kogeneracinės jėgainės,

užtikrinančios skirtingus ir kintančius vartotojo poreikius laike, optimizavimo galimybė – šilumos akumuliacinės talpos, kurios dydžio nustatymas yra svarbus uždavinys planuojant visos sistemos veiklą, įrengimas. Šiame darbe analizuojama problema – kogeneracinės jėgainės šilumos akumuliacinės talpos parinkimas, būdinga ne tik Lietuvai, bet ir kitose ES šalyse, siekiant padidinti kogeneracinių technologijų panaudojimą ir kartu energijos gamybos efektyvumą. Darbo tikslas – parodyti mažos galios (iki 1 MWe) kogeneracinės jėgainės su akumuliacine talpa veikimo galimybes, esant skirtingoms sistemos veikimo strategijoms ir elektros tarifams, bei išanalizuoti akumuliacinės talpos įkrovimo ir iškrovimo būdingus režimus.

ŠILUMOS AKUMULIACINĖS TALPOS DYDŽIO NUSTATYMO MAŽOS GALIOS KOGENERACINĖJE JĖGAINĖJE METODIKA

Šilumos akumuliacinės talpos dydžiui nustatyti ir veikimo režimų tyrimui mažos galios kogeneracinėje jėgainėje taikomas atvejo studijos metodas, leidžiantis nagrinėti realias situacijas ir problemas, kartu pasinaudojant ankstesniųjų ty-rėjų patirtimi. Atvejo studija plačiai naudojama nagrinėjant įvairius technologinius sprendimus ir modelius konkrečiomis sąlygomis, pvz., tam tikrame regione [4, 5]. Šio metodo įgyvendinimas nustatant talpos tūrį susideda iš kelių pagrindinių etapų, pateiktų 1 lentelėje [6, 7].

Nustačius vartotoją, jo energijos poreikius, jų kitimą ir kogeneracinės jėgainės veikimo strategiją, t. y. kuriuo laiku veiks atitinkami energijos gamybos įrenginiai, galima apskaičiuoti šilumos, kurią galės sukaupti šilumos akumulatorius, kiekį. Didžiausio akumuliuojamos šilumos kiekio Q_{\max} (kWh) išraiška šitokia [9]:

$$Q_{\max} = \left(\sum_{i=1}^{\tau} Q_{i,p} - \sum_{i=1}^{\tau} Q_{i,d} \right) \rightarrow \max. \quad (1)$$

Atitinkamai momentinis šilumos, kurią galima akumuluoti, perteklius išreiškiamas [10]:

$$\dot{Q}^+ = \begin{cases} \dot{Q}_p - \dot{Q}_d, & \text{kai } \dot{Q}_p > \dot{Q}_d \\ 0, & \text{kitu atveju} \end{cases} \quad (2)$$

Dydžiai su viršuje esančiu tašku žymi šilumos srautą arba galią (W).

Momentinis šilumos trūkumas:

$$\dot{Q}^- = \begin{cases} \dot{Q}_d - \dot{Q}_p, & \text{kai } \dot{Q}_p < \dot{Q}_d \\ 0, & \text{kitu atveju} \end{cases} \quad (3)$$

Šilumos akumuliacinės talpos įkrovimo laikotarpiu ($\dot{Q}^+ > 0$) ateinantis pastovios temperatūros vanduo tiekiamas į viršutinę talpos dalį, tiek pat vėsesnio vandens paimama iš talpos apatinės dalies. Atsižvelgus į tai, kiek akumuliuojama šilumos, aukštesnės temperatūros vanduo užpildo visą talpą arba jos dalį. Didžiausia talpos šilumos galia ribojama jos tūrio. Priešingas procesas vyksta, esant iškrovimui, kai vartotojui trūksta šilumos ($\dot{Q}^- > 0$).

Ieškant optimalaus akumuliacinės talpos tūrio, reikia nustatyti pagrindinius vertinimo kriterijus, pvz., optimalų ekonominį talpos tūrį, kuriam esant tam tikras ekonominis kriterijus (grynoji dabartinė vertė – GDV, gamintojo pajamos, paprastas atsipirkimo laikas – PAL ir pan.) didžiausias ar mažiausias. Jei ekonominis kriterijus – GDV, talpos tūrį galima išreikšti:

$$V = V_{opt,e} \Leftrightarrow \Delta GDV \rightarrow \max; \quad (4)$$

čia $\Delta GDV \rightarrow$ nusako GDV padidėjimą dėl talpos įrengimo jėgainėje.

Galima pasirinkti režiminį optimizacijos kriterijų, pvz., mažiausias įrenginių įsijungimo skaičius, trumpiausias katilo veikimo laikas, minimalus šilumos, pagamintos katile, kiekis ir kt. Šiuo atveju talpos tūris išreiškiamas:

$$V = V_{opt,t} \Leftrightarrow N_i \rightarrow \min; \quad (5)$$

čia $N_i - i$ įrenginių įsijungimų skaičius per pasirinktą laikotarpį.

Atitinkamu būdu išreiškiami ir kiti optimumo kriterijai. Keletas kriterijų gali būti vertinami daugiakriteriškai [11].

Temperatūros pasiskirstymo susiformavimo talpoje optimizacijos kriterijumi gali būti pasirinktas vidutinis įkrovimo ar iškrovimo procesų stratifikacijos skaičius (Str) arba MIX skaičius [12, 13]. Abu šie kriterijai padeda įvertinti

1 lentelė. Atvejo studijos metodo pagrindiniai etapai

Nr.	Atliekami veiksmai	
	Metodikos etapas	Talpos tūrio paieška kogeneracinėje jėgainėje
1.	Nustatyti ir apibrėžti tyrimo klausimus	Atlikus šios srities apžvalgą suformuluojami aktualūs klausimai: 1. Kokie susiformuoja būdingi talpos veikimo režimai? Koks jų pobūdis ir kaita? 2. Kokią įtaką turi talpos dydis šio įrenginio ir visos kogeneracinės jėgainės veikimui? 3. Kokie pagrindiniai rodikliai lemia talpos dydį?
2.	Išsirinkti atvejus, nustatyti pageidaujamas duomenis ir analizės būdus	Išrenkami atvejai, apibūdinantys vartotojo tipą, kogeneracinės jėgainės struktūrą ir veikimo sąlygas Parenkami vertinimo kriterijai
3.	Pasiruošti surinkti duomenis	Sudaromas skaičiavimo algoritmas ir aprašomos prielaidos
4.	Surinkti duomenis toje srityje	Rezultatų generavimas imitaciniu modeliu energyPRO [8]
5.	Įvertinti ir analizuoti rezultatus	Rezultatų analizė ir įvertinimas
6.	Parengti ataskaitą	Formuluojamos priklausomybės ir išvados

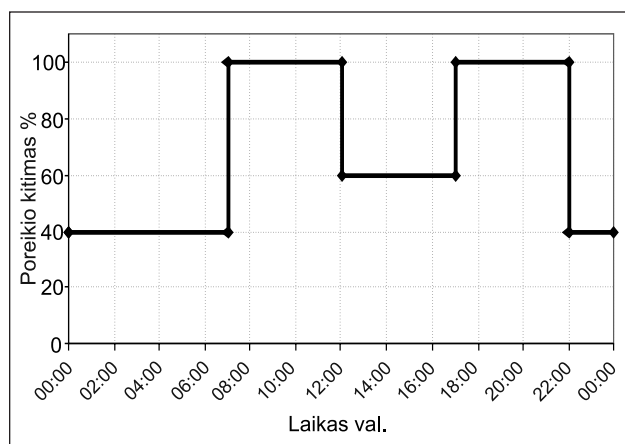
šiluminę talpos stratifikaciją, kuri kiekvienu atveju pagedaujama, nes leidžia išlaikyti aukštesnę temperatūrą talpoje, o tai padidina akumuliacinio proceso šilumos atgavimo efektyvumą.

Atvejo studijos duomenys

Analizei pasirinktas gyvenamojo sektoriaus vartotojų poreikių kitimo pobūdis, nes būtent šis sektorius suvartoja daug galutinės energijos šalyje. 2009 m. Lietuvos namų ūkiui teko apie 32,6 % visos galutinai suvartotos šalies elektros ir net 58,4 % visos galutinai sunaudotos šilumos [14]. Tolesniam nagrinėjimui pasirenkamas vartotojas, kuris atspindėtų daugiabučio namo ar kelių tokių namų energijos poreikius. Tokio vartotojo tipinis elektros ir šilumos galios poreikių grafikas, sudarytas remiantis namų ūkio elektros ir šilumos galios poreikio kreivėmis, pateiktomis kitų tyrėjų darbuose, pavaizduotas 1 pav. [15, 16]. Šiame grafike parodyti elektros ir karšto vandens poreikių pikai laike sutampa, tačiau kiekvienu nagrinėjamu atveju skiriasi elektros ir karšto vandens galios poreikiai. Analizei pasirinkti sustambinti metiniai hipotetinio vartotojo poreikiai:

- elektra: 500–5 000 MWh;
- šiluma patalpų šildymui ir vėdinimui: 1 200–11 000 MWh;
- šiluma buitinio karšto vandens ruošimui: 300–3 500 MWh.

Darbe naudojamas imitacinis modelis energyPRO, kuris pagal nurodytas priklausomybes išskaido vartotojo elektros ir šilumos poreikius kiekvienai parai visiems metams. Tyrimė priimama, kad baziniu (pirminiu) atveju vartotojas jau turi įsirengęs vietinę katilinę, kuri užtikrina visus jo šilumos poreikius. Siekdamas pažangesnės ir efektyvesnės technologijos panaudojimo, jis sprendžia nedidelės kogeneracinės jėgainės, kuri papildomai užtikrintų dalį vartotojo elektros poreikių, įrengimo galimybę. Šioje mažos galios kogeneracijoje jėgainėje būtų įrengti du pagrindiniai įrenginiai: kogeneratorius ir šilumos akumuliacinė talpa bei visa reikalinga papildoma įranga. Visi tolesni skaičiavimo atvejai lyginami su baziniu atveju.

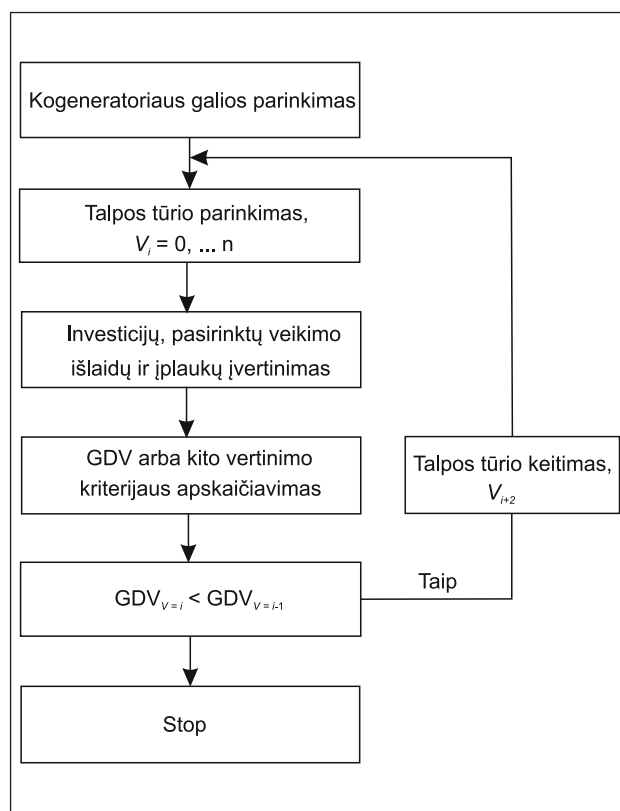


1 pav. Vartotojo poreikių kitimo apibūdinimas

Skaičiavimo algoritmas ir pagrindinės prielaidos

Svarbiausi kogeneracinę jėgainę sudarantys įrenginiai: kogeneratorius, šilumos akumulatorius ir papildomi katilai. Vidaus degimo varikliai – viena labiausiai paplitusių technologijų, naudojamų mažos galios, t. y. iki 1 MWe, dujomis kūrenamose kogeneracinėse jėgainėse, todėl tolesnei analizei pasirenkama ši technologija. Skaičiavimuose priimama, kad kogeneratorius veiks tik nominalia galia, t. y. visa apkrova. Dalinė apkrova nėra būtina, nes sistemoje perteklinė šiluma tiekama į šilumos akumuliacinę talpą, be to, tokia apkrova šioje analizėje vengiama dėl kogeneratoriaus mažesnio energinio efektyvumo. Atsižvelgiant į tai, kad šilumos akumulatoriaus patrauklumas pirmiausia vertinamas ekonominiu požiūriu, pateikiamas nesudėtingas akumuliacinės talpos ekonomiškai optimalaus tūrio parinkimo algoritmas, pavaizduotas 2 pav. [17].

Planuojant naują kogeneracinę jėgainę, kartu optimizuojama kogeneratoriaus galia ir akumuliacinės talpos tūris. Ekonominėi optimizacijai atlikti pasirinkti du kriterijai: GDV – pagrindinis ir PAL. Atvejo studijos ir ekonominių skaičiavimų pagrindinės prielaidos pateiktos 2 lentelėje [18–20]. Gamtinių dujų, elektros ir šilumos kainos įvertintos, remiantis 2010 m. vasario–birželio kainodara ir teisine baze, galiojančia Lietuvoje. Vertinant kogeneratoriaus kainą nėra atsižvelgiama į jo galią, t. y. santykinė galios kaina yra vienoda. Skaičiavimuose priimama, kad vartotojas pagaminatą elektrą pirmiausia vartoja savo reikmėms, o jos perteklių gali parduoti.



2 pav. Optimalaus talpos tūrio ekonominis radimas

2 lentelė. Skaičiavimo prielaidos

GDV ir PAL skaičiavimo prielaidos	Sistemos veikimo ekonominės prielaidos	Technologinės prielaidos
Realio diskonto norma: 4,0 %	Eksplotavimo išlaidos Kogeneratoriaus aptarnavimas: 27,62 Lt/MWhe Kogeneratoriaus paleidimas: 27,62 Lt/startas 1 MWe Katilo aptarnavimas – 3,45 Lt/MWhe pagamintos šilumos	Kogeneratorius Šiluminis efektyvumas: 47,0 % Elektrinis efektyvumas: 40,0 % CO ₂ – 242 kg/MWh kuro, NO _x – 0,160 kg/GJ kuro
Investicijos Kogeneratorius: 2,3 mln. Lt/MWe Akumuliacinė talpa: 925 Lt/m ³ Investicijų ilgaamžiškumas: 20 metų	Mokesčiai už aplinkos taršą: CO ₂ – 35 Lt/t SO ₂ – 4324 Lt/t NO _x – 1875 Lt/t	Katilas Efektyvumas: 90,9 % SO ₂ – 0,0003 kg/GJ (kuro), NO _x – 0,160 kg/GJ (kuro), CO ₂ – 242 kg/MWh (kuro)
	Parduodamos elektros kaina – 200 Lt/MWh	Kuras: gamtinės dujos, šiluminė vertė – 9,3 kWh/m ³ Šilumos akumuliacinė talpa Temperatūrų skirtumas: 45 °C Naudojimas: 90,0 %

Šilumos akumuliacinė talpa

Šilumos akumuliacinio technologijos siejamos su trimis galimais kaupimo būdais: savitosios šilumos akumuliacinis, slaptosios šilumos akumuliacinis ir termocheminis energijos akumuliacinis. Praktikoje labiausiai paplitęs ir ekonomiškai pigiausias yra šilumos akumuliacinis dėl temperatūrų skirtumo, t. y. savitosios šilumos akumuliacinis [21, 22]. Stratifikuotos šilumos akumuliacinės talpos – viena plačiausiai naudojamų technologijų, skirtų savitosios šilumos akumuliaciniam tikslams [13]. Šiuo būdu kaupiama energija, šildant m masės medžiagos kiekį nuo temperatūros T_0 iki temperatūros T_1 , esant pastoviam slėgiui, apskaičiuojama pagal formulę [23]:

$$E = m \int_{T_0}^{T_1} c_p dT. \quad (6)$$

Stratifikuotos akumuliacinės talpos paprastai skirtos trumpalaikiam šilumos kaupimui ir leidžia išlyginti šilumos poreikio netolygumą per parą ar kelias paras. Šiose talpose veikiant gravitacijos ir plūdumo jėgoms, skirtingos temperatūros vanduo talpoje pasiskirsto pagal jos aukštį. Karštesnis vanduo, turintis mažesnę tankį, užima viršutinę dalį, o didesnio tankio šaltesnis vanduo – apatinę dalį. Taigi karštas ir šaltas vanduo talpoje išsisklaido tarp du sluoksnius, tarp kurių atsiranda temperatūrų „laiptas“, ir susiformuoja pereinamosios temperatūros sritis, kurioje temperatūros pokyčiai didžiausi. Siekiama, kad ši pereinamoji sritis būtų kuo plonesnė. Praktikoje dėl šiluminės stratifikacijos nuvertėjimo paprastai akumuliaciniam panaudojama apie 90 % apskaičiuoto talpos tūrio [24, 25].

Šilumos akumuliacinių talpų įtaka kogeneratoriaus veikimui labiausiai matyti šiltuoju metų laiku, pasibaigus šildymo sezonui. Šiuo metu kogeneratoriaus veikimą sąlygoja ne tik elektros, bet ir buitinio karšto vandens poreikis, labai kintantis per parą. Tokioje sistemoje esanti akumuliacinė talpa išlygina šilumos poreikio netolygumą, leidžia veikti kogeneratoriui nominalia galia ir prailgina jo veikimą. Nešildymo sezonas analizėje detaliau nagrinėjamas, nes tai aktyviausias šilumos akumuliacinės talpos veikimo laikotarpis.

REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS

Šioje dalyje išnagrinėtos kogeneracinės jėgainės su šilumos akumuliacine talpa veikimo strategijos, kai kogeneratorius turi veikimo prioritetą visą laiką, dalį paros, yra galimybė parduoti elektrą ir nėra šios galimybės. Veikimo prioritetą apibūdina įrenginio veikimo pirmenybė, palyginti kitais gamybos įrenginiais tam tikru laiku. Kiekvienu atveju analizuotas ekonomiškai optimalios kogeneracinės jėgainės konfigūracijos (kogeneratoriaus galios ir talpos tūrio) parinkimas ir skirtingų akumuliacinių talpų veikimo režimai. Darbe nagrinėjami keli šilumos ir elektros poreikių išsidėstymai, kai elektros ir šilumos poreikio pikai sutampa laike ir kai nesutampa. Taip pat pateikiamas mažos galios dujinės kogeneracinės jėgainės įvertinimas realaus laiko rinkos sąlygomis.

Kogeneratorius turi veikimo prioritetą visą laiką

Nagrinėjant kogeneracinės jėgainės veikimo strategiją, kai kogeneratorius turi veikimo prioritetą visą laiką ir yra galimybė parduoti perteklinę elektrą, gauta, kad vartotojui, kurio metiniai poreikiai: elektra – 2 000 MWh, karštas vanduo – 1 800 MWh, šildymas – 5 500 MWh, ekonomiškai patraukliausia įrengti 320 kWe jėgainę, kuri užtikrintų maksimalius jo elektros galios poreikius. Šiai kogeneracinei jėgainei parenkant akumuliacinę talpą, gauta, kad gali būti pasirenkami keli optimalūs sprendiniai su skirtingo tūrio talpomis (3 pav.). Pirmasis optimalus sprendinys gaunamas su 17 m³ talpa, antrasis – 35 m³. Pirmuoju atveju veikiant jėgainei nešildymo sezonu, kogeneratorius per parą įjungiamas ir išjungiamas 2 kartus, t. y. kogeneratorius veikia tik per poreikių pikus, antruoju – kogeneratorius veikia ne tik per poreikių pikus, bet ir tarp jų, todėl per parą jis įjungiamas ir išjungiamas vieną kartą. Atsižvelgiant į tai, kad tolygus sistemos veikimas siektinas, geriau rinktis 35 m³ akumuliacinę talpą, nors GDV būtų nedaug mažesnė (12 tūkst. Lt, arba 0,32 %).

Analizuojant įvairaus dydžio talpų veikimą 320 kWe kogeneracine jėgaine nešildymo sezonu, kuris parodytas 4 pav., gauta, kad talpa, kurios tūris nedidelis, pvz., 5 m³ ir

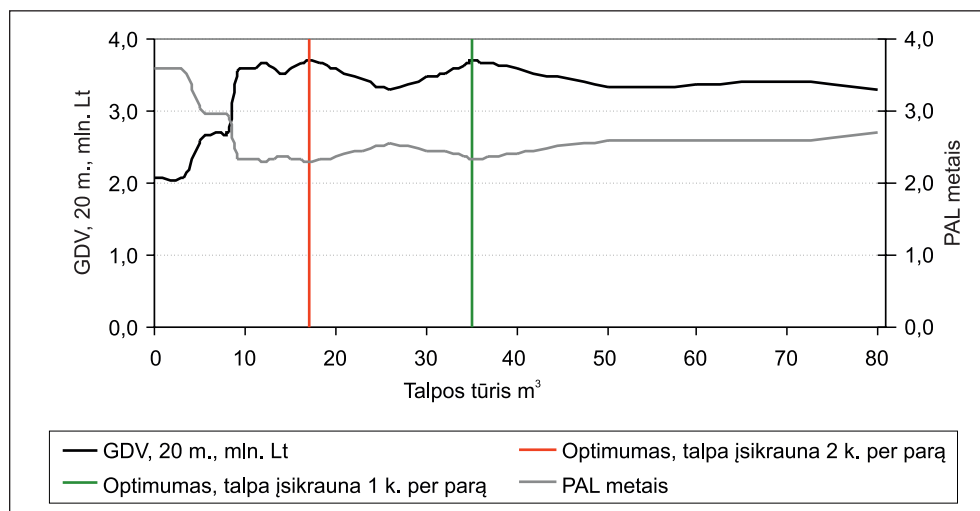
15 m³, dažnai įsikrauna ir išsikrauna per parą, o tai trikdo kogeneratoriaus, kuris turi būti papildomai sustabdomas ir vėl paleidžiamas, veikimą. Tuo tarpu per didelio tūrio talpa gali perkelti kogeneratoriaus gamybą laike, jei kogeneracinės jėgainės veikimo strategijoje numatyta, kad kogeneratorius veikia iki to laiko, kol talpa įsikrauna, ir neveikia tais laikotarpiais, kai akumuliacinė talpa užtikrina vartotojo visus karšto vandens poreikius. Šitaip ne visada pasiekiamas didžiausias ekonominis efektas, didinant akumuliacinės talpos tūrį. Nagrinėjant kiekvienos akumuliacinės talpos veikimą atskirai bei lyginant įkrovimo ir iškrovimo kreives su maksimalia šilumine talpos galia, gauta, kad įkrovimo ir iškrovimo procesų kreivės staigiai kyla ir leidžiasi, kai talpos tūris per mažas. Didinant talpos tūrį, procesų kreivės plokštėja. Iš to seka, kad akumuliacinė talpa tolygiau įkraunama, nes patiriami mažesni šiluminės stratifikacijos nuostoliai. Visos talpos įkraunamos ir iškraunamos vienodu masės srautu, tačiau mažesnio tūrio talpose, norint gauti tą patį pratekančios masės srautą,

vandens greitis didinamas, o tai sukelia didesnius šilumos nuostolius.

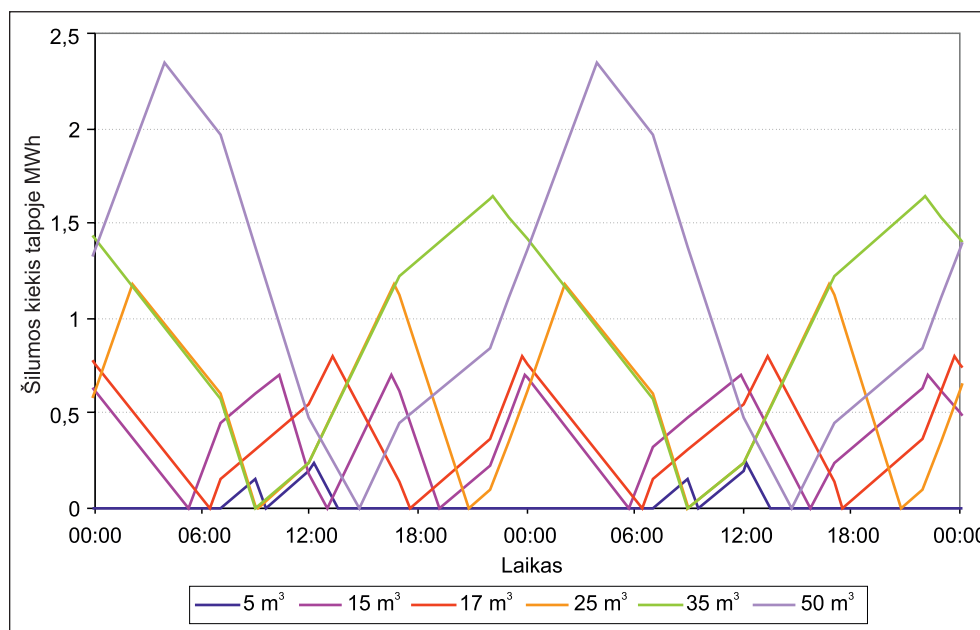
Nagrinėto vartotojo pavyzdžiu gauta, kad optimalus talpos tūris turi antrojo laipsnio polinominį priklausomumą nuo kogeneratoriaus galios, kuri pavaizduota 5 pav. Šis priklausomumas išreiškia talpos dydį, kai kogeneratorius paleidžiamas ir sustabdomas per parą vieną kartą.

Kai kogeneratoriaus galia toliau didinama (>320 kW), sistemos GDV mažėja (3 lentelė). Lentelėje pateikti skirtingų kogeneratoriaus galių su optimaliais talpų tūriais technologiniai ir ekonominiai rodikliai, esant skirtingiems elektros tarifams.

Analizės metu papildomai buvo atlikti skaičiavimai įvairiems vartotojo elektros, karšto vandens ir šilumos poreikiams. Visais atvejais buvo gauta, kad ekonomiškai naudingiausia įrengti kogeneratorių, kurio galia padeda užtikrinti maksimalius vartotojo elektros galios poreikius, kaip ir pateikto pavyzdžio atveju. Be to, nustatyta, kad vartotojų, ku-

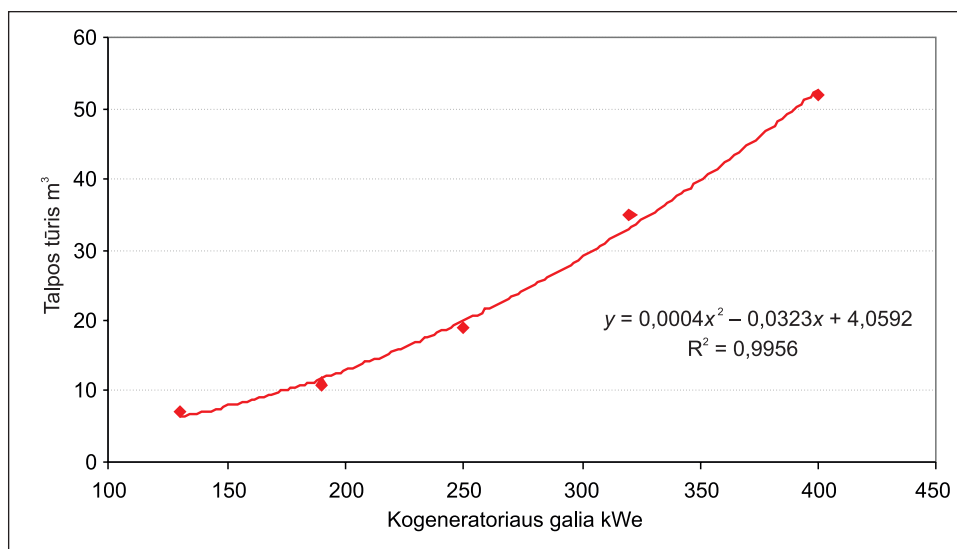


3 pav. 320 kW kogeneracinės jėgainės GDV ir PAL priklausomumas nuo talpos tūrio



4 pav. Kelių vasaros parų akumuliacinių talpų veikimas 320 kW kogeneracinėje jėgainėje

5 pav. Talpos tūrio priklausomumas nuo kogeneratoriaus galios, kai kogeneratorius turi veikimo prioritetą visą laiką



3 lentelė. Įvairių kogeneracinės jėgainės konfigūracijų su optimalaus tūrio talpa ekonominiai ir technologiniai rodikliai

Kogen. galia kW	Talpos tūris m³	Investicijos mln. Lt	Elektros gamyba MWh/metus	Elektros pirkimas MWh/metus	Kogen. startai Sk./metus	GDV mln. Lt		
						1LZ	2LZ	DIF
130	7	0,307	1098,3	901,8	2	2,8089	2,3953	2,9015
190	11	0,449	1545,3	620,1	167	3,4508	3,0695	3,6677
250	19	0,596	1814,5	512,5	169	3,6033	3,3406	3,9720
320	17	0,756	2124,9	401,1	337	3,7302	3,4558	4,2147
320*	35	0,773	2126,3	406,6	169	3,7182	3,4737	4,2125
400	21	0,945	2479	437,6	340	3,4209	3,1739	3,9301
400*	52	0,973	2481,5	523,4	171	3,1722	2,9281	3,5173

Čia 1LZ – vienos laiko zonos tarifas, 2LZ – dviejų laiko zonų tarifas, DIF – diferencijuotas pagal laiko intervalus tarifas. Deriniai su žvaigždutėmis rodo ekonominius rodiklius, jei optimaliu sprendimu būtų pasirinkta tokia technologinė situacija, kai talpos tūris per parą vieną kartą įsikrauna ir vieną kartą išsikrauna.

rių karšto vandens ir elektros poreikių santykiai didžiausi, įrengtos kogeneracinės jėgainės atsipirktų greičiausiai, nes šiuose variantuose santykinai pagaminama daugiausia elektros, palyginti su visu vartotojo elektros poreikiu.

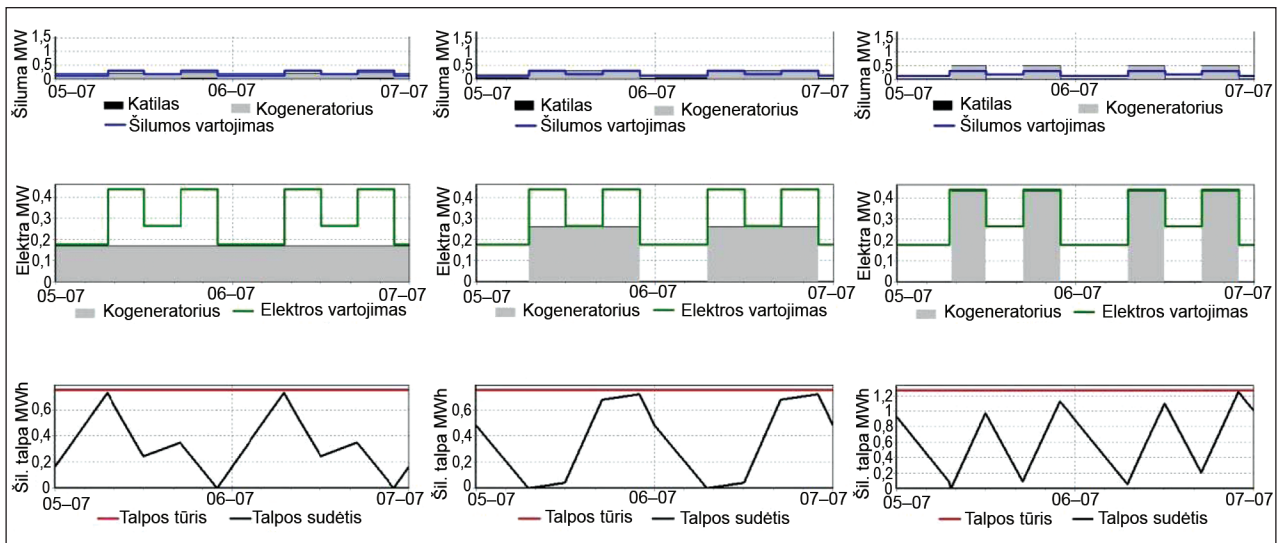
Atskirai nagrinėjant elektros ir karšto vandens poreikių pikų nesutapimą laike, gauta, kad reikiamas akumuliacinės talpos tūris padidėjo, kai elektros poreikio pikas įvyko vėliau negu karšto vandens poreikio pikas. Tuo tarpu elektros poreikio pikui įvykus anksčiau, sumažėja sistemos GDV ir pailgėja PAL, nes pagaminama mažiau elektros. Nesutampant poreikiams, talpos įsikrovimo ir išsikrovimo kreivės papildomai išsiskaido į dalis, t. y. prasidėjus elektros poreikio pikui, įkrovimo ir iškrovimo kreivės tampa gerokai statesnės.

Kai kogeneracinės jėgainės veikimo strategijoje nenumatoma galimybės parduoti elektrą, tai kogeneratorius veikia tik esant jo galiai, mažesnei už vartotojo galios poreikį ar lygiai vartotojo galios poreikiui. Šiuo atveju gauta, kad elektros tarifo struktūra turi didelę įtaką kogeneracinės jėgainės konfigūracijai. Pavyzdžiu pateikiamas vartotojas, kurio metiniai poreikiai yra: elektra – 2 660 MWh, karštas vanduo – 1 800 MWh ir patalpų šildymas – 7 300 MWh. Šiam vartotojui ekonomiškai optimalaus kogeneratoriaus galios ir talpos tūrio veikimas nešildymo sezonu, esant skirtingiems elektros tarifams, pavaizduotas 6 pav. Aukštutinėje šio paveikslėlio grafiku dalyje

pateikta, kurie gamybos įrenginiai veikia ir aprūpina vartotoją šiluma, vidurinėje – elektros gamybą, o apatinėje – akumuliacinės talpos veikimą. 6 pav. pavyzdžiu gauta, kad vienos laiko zonos tarifo atveju vartotojui naudingiausia įrengti kogeneracinę jėgainę, kuri užtikrintų tik mažiausius elektros galios poreikius. Pastaruoju atveju kogeneratorius veikia visą laiką ir yra sustabdomas tik metinių apžiūrų laikotarpiais. Dviejų laiko zonų tarifo atveju gauta, kad ekonomiškai naudingiausia įrengti kogeneracinę jėgainę, kuri tiektų elektrą per poreikių pikus ir tarp jų. Jei vartotojui atsirastų galimybė naudotis diferencijuotais pagal laiko intervalus tarifais, tai naudingiausia įrengti maksimalaus elektros galios poreikio kogeneratorių, kuris veiktų tik per poreikių pikus. Pateiktas pavyzdys rodo, kad pasirinkus skirtingus elektros tarifus, gaunami skirtingi optimalūs sprendiniai. Palyginus atvejus, kai yra galimybė parduoti elektrą ir jos nėra, nustatyta didesnė GDV ir trumpesni PAL, kai galima parduoti elektrą.

Kogeneratorius turi veikimo prioritetą tik dalį paros

Šiame scenarijuje jėgainės veikimo strategijoje numatoma: kai vartotojas moka už elektrą pagal dviejų laiko zonų tarifą, kogeneratorius turi veikimo prioritetą tik dieninio tarifo metu, o kai yra galimybė naudotis diferencijuotu pagal laiko intervalus tarifu – maksimalių ir vidutinių apkrovų laikotarpiais.



6 pav. Kogeneracinės jėgainės veikimas vasarą, esant skirtingai jos konfiguracijai, kai elektra naudojama tik savo poreikiams.

1 grafikas: 170 kW su 16 m³, 2 grafikas: 260 kW su 16 m³, 3 grafikas: 430 kW su 27 m³

Vartotojui, kurio metiniai poreikiai: elektra – 2 000 MWh, karštas vanduo – 1 800 MWh, šildymas – 5 500 MWh, gauta, kad didžiausia sistemos GDV pasiekama, kai įrengiamas 320 kW kogeneratorius su 65 m³ akumuliacine talpa. Parenkant įvairios konfiguracijos optimalias sistemas, kai yra galimybė parduoti elektrą, gauta, kad talpos tūrio didėjimas nuo kogeneratoriaus galios labiausiai atitiko tiesinę priklausomybę, kurią atspindi lygtis:

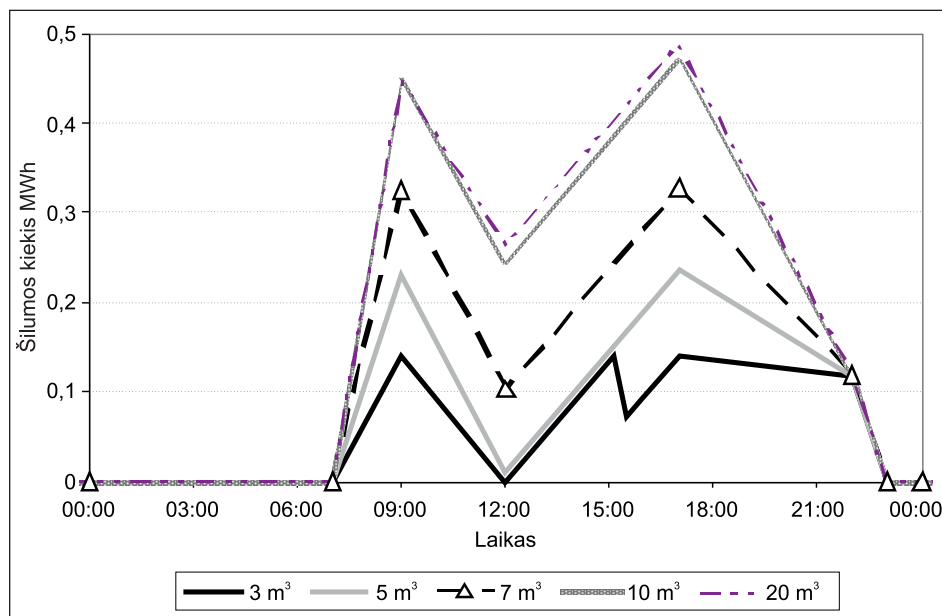
$$y = 0,197 \cdot x + 2,1783. \quad (7)$$

Pateiktos lygties determinacijos koeficientas (R²) lygus 0,9984.

Nagrinėjamosiomis sąlygomis visais vartotojų atvejais gauta, kad ekonomiškai naudingiausia įrengti kogeneratorių, ku-

ris padeda užtikrinti maksimalius elektros galios poreikius. Optimalios akumuliacinės talpos dydis šiomis sąlygomis skirtinguose variantuose kito 41–48 m³/1 000 MWh metinės šilumos gamybos kogeneratoriuje.

Tuo atveju, kai jėgainės veikimo strategijoje nenumatyta parduoti elektros ir kogeneratoriaus galia ribojama vartotojo elektros galios poreikio, gauta, kad optimalus talpos tūris kogeneracinėse jėgainėse kito 6–21 m³/1 000 MWh metinės šilumos gamybos kogeneratoriuje. Nagrinėto vartotojo pavyzdžiu gauta, kad ekonomiškai naudingiausia įrengti 190 kW kogeneratorių su 5 m³ talpa, šiuo atveju gauta 1,859 mln. Lt sistemos GDV, esant dviejų laiko zonų tarifui. Įvairaus dydžio akumuliacinių talpų veikimas 190 kW kogeneracinėje jėgainėje vieną vasaros parą parodytas 7 pav., kuriame matyti, kad 10 m³ ir 20 m³ talpų veikimas nešildy-



7 pav. Įvairaus tūrio akumuliacinių talpų veikimas 190 kW jėgainėje, kai kogeneratorius veikia tik dalį dienos ir nėra galimybės parduoti elektrą

mo sezonu yra artimas, todėl didinti talpos tūrį per 10 m^3 netikslinga. Tuo tarpu per mažo tūrio talpa (pvz., 3 m^3) įkraunama dažniau per parą, o kogeneratorius turi būti papildomai sustabdomas ir įjungiamas. Talpa, kurios tūris per didelį sistemoje, nėra visiškai panaudojama nešildymo sezonu, nes neįkraunama iki jos maksimalios šiluminės galios. Atsižvelgiant į tai, kad 190 kWe kogeneracinėje jėgainėje efektyviai panaudojamas ir 10 m^3 akumuliacinės talpos tūris, siūloma įrengti šią didesnę talpą. Sistemos su 10 m^3 akumuliacine talpa GDV yra nežymiai mažesnė negu sistemos su 5 m^3 akumuliacine talpa ir sudaro $1,854 \text{ mln. Lt}$, esant dviejų laiko zonų tarifui.

Įvairaus tūrio akumuliacinių talpų veikimas parodo, kad iš pradžių prasidėjus karšto vandens poreikio pikui, talpa staigiai įkraunama iki didžiausios šiluminės galios, o besitęsiant šiam pikui iškraunama, vėliau šilumos poreikiui sumažėjus, talpa vėl įkraunama, tik mažesniu greičiu. Šiuo atveju akumuliacinės talpos įkrovimas ir iškrovimas padeda prailginti kogeneratoriaus veikimo laikotarpį, be to, visas reikalingas karštas vanduo dieną tiekiamas tik iš kogeneratoriaus ir talpos.

Palyginus tarpusavyje variantus, kurie turi vienodus metinius bendrus šilumos poreikius, bet skirtingus pobūdžius, t. y. šilumos šildymui ir karštam vandeniui kiekius, nustatyta, kad didesnę GDV ir trumpesnę PAL leidžia gauti tie atvejai, kurių karšto vandens poreikiai didesni.

Realaus laiko rinka

Šiuo atveju nagrinėjama kogeneracinės jėgainės įrengimo alternatyva, kai pagaminta šiluma suvartojama savo poreikiams, o visa elektra parduodama Lietuvos elektros biržoje, kurioje 2010 m. sausį–rugsėjį elektros kaina buvo $0,00\text{--}350,01 \text{ Lt/MWh}$, vidurkis – $157,92 \text{ Lt/MWh}$. Analizėje naudoti prekybos Lietuvos elektros biržoje BaltPool duomenys [26]. Šios biržos elektros kainų kitimo pobūdis vieną savaitę skirtingais mėnesiais parodytas 8 pav. Jame matyti, kad didžiausi kainų

pikai įvyksta dieną, kai turimas didžiausias elektros poreikis, o anksti rytą ir naktį kainos ženkliai mažėja.

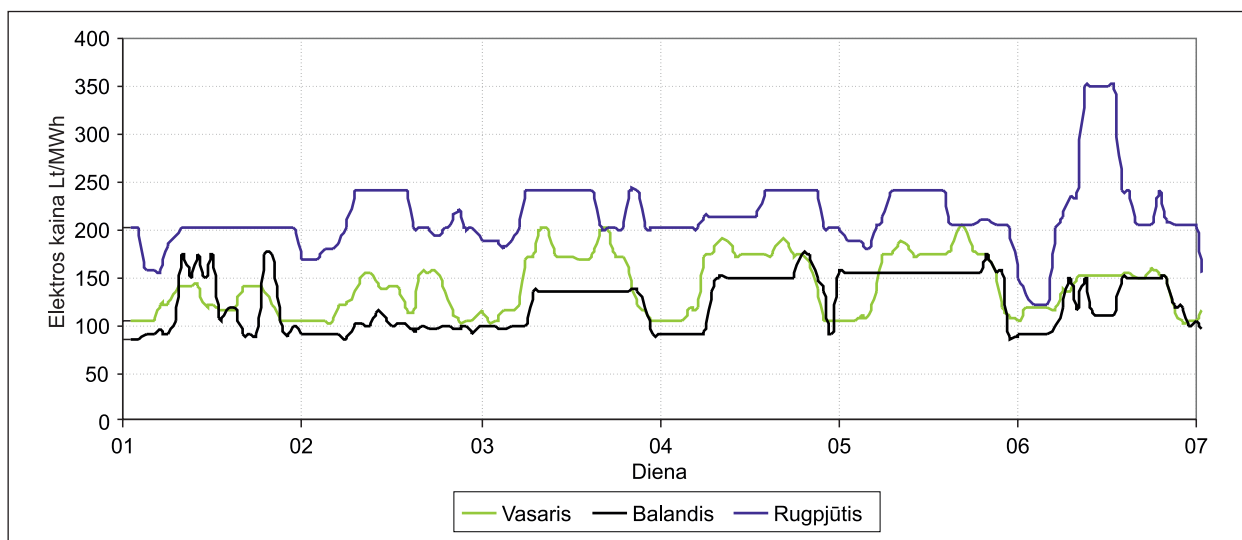
Tyrimo metu nustatyta, kad vartotojui, norinčiam įrengti mažos galios dujinę kogeneracinę jėgainę ir nesant papildomo rėmimo, tokios sistemos įrengimas nėra ekonomiškai patrauklus, nes GDV gaunama neigiama, pvz., 320 kWe kogeneratoriaus su 20 m^3 akumuliacine talpa GDV sudaro $0,712 \text{ mln. Lt}$. Praktikoje realaus laiko rinkos sąlygomis veikiančių kogeneracinių jėgainių šilumos akumuliacinių talpų tūriai paprastai būna apie $50 \text{ m}^3/1\,000 \text{ MWh}$ patiektos metinės šilumos [27].

Naujų mažos galios kogeneracinių jėgainių plėtrą ir ekonominį patrauklumą laisvosios rinkos sąlygomis gali paskatinti premijos, taikomos elektrai, pagamintai kogeneracinėse jėgainėse, mokesčių lengvatos, lengvatinės paskolos ir kt. Pavyzdžiui, Vokietijoje iš dalies subsidijuojamos šilumos tinklų investicijos, elektros tinklų operatoriai įpareigoti prijungti kogeneracinę jėgainę prie tinklų, taikoma premijų sistema (premijos priklauso nuo jėgainės galingumo), taip pat visai į tinklą tiekiamai elektrai tinklo operatorius turi gamintojui gražinti išvengto tinklo naudojimo mokestį (praktikoje jis yra $0,1\text{--}2,5 \text{ Euro centų / kWh}$), nes mažiau elektros naudojama iš aukštos įtampos tinklų [28].

Jautrumo analizė

Jautrumo analizės metu tikrinama diskonto normos, investicijų kainos, gamtinių dujų, perkamos ir parduodamos elektros įtaka optimalių sprendimų ekonominiam priimtinumui. Reali diskonto norma buvo keičiama $4\text{--}7 \%$. Šių skaičiavimų metu gauta, kad diskonto normai padidėjus nuo 4 iki 7% , visų skaičiuotų atvejų GDV sumažėjo vidutiniškai 27% .

Nagrinėjant kitus ekonominius veiksnius, gauta, kad esant galimybei parduoti elektrą optimaliam sprendiniui didžiausią įtaką turi perkamos elektros kaina. Palyginus su pirmine kaina, perkamos elektros kainai pakilus 10% , sistemos GDV padidėja $24,9 \%$. Toliau pagal svarbą sek-



8 pav. Skirtingų mėnesių vienos savaitės elektros kainos kitimas BaltPool biržoje

tų – perkamų gamtinių dujų kaina, jai pakilus 10 %, GDV sumažėja 13,8 %. Gamtinių dujų ir perkamos elektros kainai kintant kartu 10 %, GDV padidėtų apie 11,0 %, nes perkamos elektros kainos pokytis turi didesnę įtaką nei gamtinių dujų kainos. Parduodamos elektros pokyčiai turi nedidelę įtaką, nes daugiausia pagamintos elektros suvartojama savo reikmėms. Taip pat santykinai nedidelę įtaką turi reikiamų investicijų į kogeneratorių ir akumuliacinę talpą kainos pokytis, šių investicijų kainai pakilus 10 %, GDV sumažėja tik apie 2,2 %.

Kai elektrą parduoti nėra galimybės, gauta, kad sistemos GDV taip pat labiausiai veikiama perkamos elektros kainos, jai pakilus 10 %, GDV padidėjo 23,0 %. Toliau pagal svarbą sektų perkamų gamtinių dujų ir perkamos elektros kainos kitimas tuo pačiu metu. Šiuo atveju perkamos elektros kainos įtaka didelė, nes kai nėra galimybės parduoti elektrą, vartotojas turi daugiau jos pirkti. Nedidelę įtaką taip pat turi investicijų kainos pokytis, šiai kainai pakilus 10 %, sistemos GDV sumažėja 2,4 %.

IŠVADOS

1. Analizuojant šilumos akumuliacinės talpos veikimą mažos galios kogeneracinėje jėgainėje (iki 1 MWe) gauta, kad talpos dydis itin priklauso nuo vartotojo elektros ir buitinio karšto vandens poreikių reikšmių ir išsidėstymo laike bei jėgainės veikimo strategijos, kuriai įtaką turi esama elektros tarifų sistema bei teisinės ir ekonominės sąlygos.

2. Tiek per didelis, tiek per mažas parinktas akumuliacinės talpos dydis gali turėti neigiamą įtaką ekonominiam ar režiminių visos jėgainės veikimui. Tuo atveju, kai sistemoje parinktas talpos tūris per didelis, jis gali būti ne visada panaudojamas arba kogeneratoriaus gamyba perkeliama laike, jei jėgainės veikimo strategijoje numatyta, kad talpa būtų įkraunama iki didžiausios šiluminės galios.

3. Kai vartotojas pagamintą elektrą vartoja ir savo reikmėms, ir dalį parduoda, gaunama didesnė ekonominė nauda, negu nesant galimybės parduoti elektrą, nes kogeneratorius gali ilgiau veikti bei pagaminti daugiau elektros ir šilumos.

4. Kai kogeneratorius turi veikimo prioritetą dieninio tarifo metu ir yra galimybė parduoti elektrą, apskaičiuotas optimalus akumuliacinės talpos tūris kinta 41–48 m³/1 000 MWh metinės šilumos gamybos kogeneratoriuje. Kai nėra galimybės parduoti elektrą, talpos tūris gerokai sumažėja iki 6–21 m³/1 000 MWh metinės šilumos gamybos kogeneratoriuje.

5. Nesant papildomos rėmimo tvarkos mažos galios dujinės kogeneracinės jėgainės įrengimas, kai visa pagaminta elektra parduodama realaus laiko rinkoje, elektros gamintojui ekonomiškai nenaudingas. Norint padidinti tokių jėgainių ekonominį patrauklumą, reikėtų skatinimo mechanizmo, pvz., mokesstinės lengvatos, premijos ir kt.

6. Jautrumo analizė parodė, kad optimalių sprendimų priimtinumui didelę įtaką turi reali diskonto norma, kuriai

padidėjus 3,0 % sistemų GDV sumažėja vidutiniškai 27,0 %. Tuo atveju, jei daugiausia pagamintos elektros suvartojama savo reikmėms, kitas pagal svarbą ekonominiam patrauklumui rodiklis yra perkamos elektros kaina, jai didėjant sistemos GDV taip pat auga. Toliau sektų gamtinių dujų kaina.

Žymėjimai

c_p – savitoji izobarinė šiluma J/(kg · K);

GDV – grynoji dabartinė vertė mln. Lt;

N_i – i įrenginių įsijungimų skaičius per pasirinktą laikotarpį;

m – masė kg;

Q_d – atskirų laikotarpių (i) sunaudotos šilumos kiekis kWh;

Q_{\max} – didžiausias akumuliuojamos šilumos kiekis kWh;

Q_p – atskirų laikotarpių (i) pagamintos šilumos kiekis kWh;

\dot{Q}^+ – momentinis šilumos perteklius W;

\dot{Q}^- – momentinis šilumos trūkumas W;

T – temperatūra K;

V – talpos tūris m³.

Gauta 2011 01 10

Priimta 2011 02 28

Literatūra

- Lund H., Andersen A. N. Optimal design of small CHP plants in a market with fluctuating electricity prices. *Energy Conversion and Management*. 2005. Vol. 46. No. 6. P. 893–904.
- Žukauskas G., Zinevičius F. Mažos galios kogeneracinės jėgainės Lietuvoje. *Energetika*. 2007. T. 3. Nr. 2. P. 43–47.
- Blarke M. B., Lund H. The effectiveness of storage and relocation options in renewable energy systems. *Renewable Energy*. 2008. Vol. 33. No. 7. P. 1499–1507.
- Fragaki A., Andersen A. N., Toke D. Exploration of economical sizing of gas engine and thermal store for combined heat and power plants in the UK. *Energy*. 2008. Vol. 33. No. 11. P. 1659–1670.
- Fabrizio E., Corrado V., Filippi M. A model to design and optimize multi-energy systems in buildings at the design concept stage. *Renewable Energy*. 2010. Vol. 35. No. 3. P. 644–655.
- Susan K. S. *The Case Study as a Research Method*. Unpublished paper. University of Texas at Austin, 1997. <http://www.ischool.utexas.edu/~ssoy/usesusers/1391d1b.htm>
- Noor K. B. M. Case study: a strategic research methodology. *American Journal of Applied Sciences*. 2008. Vol. 5. No. 11. P. 1602–1604.
- energyPRO*. <http://emd.dk/energyPRO/>
- Martinaitis V., Šiupšinskas G., Narbutis B. Nedidelės galios kogeneracinių jėgainių šilumos akumuliatorių dydžių paieška. *Energetika*. 2004. Nr. 2. P. 47–53.
- Kostowski W., Skorek J. Thermodynamic and economic analysis of heat storage application in co-generation systems. *International Journal of Energy Research*. 2005. Vol. 29. No. 2. P. 177–188.

11. Tupenaite L., Zavadskas E. K., Kaklauskas A., Turskis Z., Seniut M. Multiple criteria assessment of alternatives for built and human environment renovation. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2010. Vol. 16. No. 2. P. 257–266.
12. Castell A., Medrano M., Solé C., Cabeza L. F. Dimensionless numbers used to characterize stratification in water tanks for discharging at low flow rates. *Renewable Energy*. 2010. Vol. 35. No. 10. P. 2192–2199.
13. Han Y., Wang R., Dai Y. Thermal stratification within the water tank. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009. Vol. 13. No. 5. P. 1014–1026.
14. VĮ Energetikos agentūra. http://www.ena.lt/next_informacija.htm
15. Peacock A. S., Newborough M. Controlling micro-CHP systems to modulate electrical load profiles. *Energy*. 2007. Vol. 32. No. 7. P. 1093–1103.
16. Wiedén J., Lundh M., Vassileva I., Dahlquist E., Ellegård K., Wäckelgård E. Constructing load profiles for household electricity and hot water from time-use data – Modelling approach and validation. *Energy and Buildings*. 2009. Vol. 41. No. 7. P. 753–768.
17. Streckienė G., Martinaitis V., Andersen A. N., Katz J. Feasibility of CHP-plants with thermal stores in the German spot market. *Applied Energy*. 2009. Vol. 86. No. 11. P. 2308–2316.
18. Andersen A. N. *Description of Markets, Optimising Tools and Cost-effective IT Solutions for the Balancing System*. DESIRE project. Deliverable 4.1–4.4. 2007. 78 p.
19. *National Greenhouse Gas Emission Inventory Report 2008 of the Republic of Lithuania*. Annual Report Under the UN Framework Convention on Climate Change.
20. LR ūkio ministro įsakymas Nr. 4–301. Šilumos vartotojų įrenginių atjungimo nuo šilumos tiekimo sistemų ekonominio įvertinimo metodika. *Valstybės žinios*. 2003. Nr. 81(1)-3716.
21. Rosen M. A., Dincer I. Exergy methods for assessing and comparing thermal storage systems. *International Journal of Energy Research*. 2003. Vol. 27. No. 4. P. 415–430.
22. *ASHRAE Handbook-HVAC Applications*. 2007. 1039 p.
23. Sørensen B. *Renewable Energy: Its Physics, Engineering, Use, Environmental Impacts, Economy and Planning Aspects*. Third edn. Elsevier Science, 2004. 952 p.
24. Šateikis I. Šilumos akumuliacijos šildymo sistemų vandens rezervuaruose. 4-osios tarptautinės konferencijos „Energija pastatams“ moksliniai pranešimai, Vilnius, 2000 m. rugsėjo 21–22 d. Vilnius, 2000. P. 343–350.
25. Dincer I., Rosen M. A. *Thermal Energy Storage: Systems and Applications*. London: John Wiley & Sons, 2002. 596 p.
26. *BaltPool elektros rinkos operatorius*. www.baltpool.lt
27. IEA *District Heating and Cooling 2005, Annex VII: Two-step Decision and Optimisation Model for Centralised or Decentralised Thermal Storage in DH & C Systems*. Report 8DHC-05.02. P. 57.
28. Golbach A. The new German CHP law – criteria and expectations. *Annual Conference of COGEN Spain. 15th Apr 2010*. 31 p.

Giedrė Streckienė, Vytautas Martinaitis, Giedrius Šiupšinskas

ECONOMIC ASSESSMENT OF HEAT STORAGE SELECTION UNDER DIFFERENT OPERATION STRATEGIES OF A SMALL-SCALE CHP PLANT

Summary

The operation of heat storage and the selection of its size according to the economic indicators of a small-scale CHP plant at various electricity tariffs are analysed. Using the energyPRO simulation tool, analysed are also the operation modes of different heat storages. The analysis shows that the storage size and operation mainly depend on a consumer's electricity and domestic hot water demand and on the CHP plant operation strategy which is influenced by economic conditions.

Key words: cogeneration, heat storage, operation mode, electricity tariffs, net present value

Гедре Стрецкене, Витаутас Мартинайтис,
Гедриус Шюпшинскас

ПОДБОР РАЗМЕРОВ АККУМУЛЯЦИОННОЙ ТЕПЛОЁМКОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ СТРАТЕГИИ РАБОТЫ МАЛОЙ ТЕПЛОФИКАЦИОННОЙ ЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛИ (ТЭЦ)

Резюме

Анализируется аккумуляционная теплоемкость и оценивается выбор её размеров по экономическим критериям для ТЭЦ малой мощности при различных вариантах тарифов на электроэнергию. С применением имитационной программы energyPRO анализируются режимы различных аккумуляционных теплоемкостей. Результаты показали, что размер аккумуляционной теплоемкости в большей мере зависит от потребностей в электричестве и в горячей воде, а также от стратегии работы ТЭЦ, которую определяют экономические условия.

Ключевые слова: когенерация (ТЭЦ), аккумуляционная теплоемкость, режим работы, электрический тариф, чистая приведённая стоимость