



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**

**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

**Tadas Spundzevičius**

**ELEKTROS ENERGIJOS ŠALTINIŲ VALDYMO  
VIRTUALIOJOJE ELEKTRINĖJE TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Prof. dr. Saulius Gudžius

**KAUNAS, 2018**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**

**ELEKTROS IR ELEKTRONIOS FAKULTETAS  
ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA**

**ELEKTROS ENERGIJOS ŠALTINIŲ VALDYMO  
VIRTUALIOJOJE ELEKTRINĖJE TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas  
Energinės technologijos ir ekonomika (kodas 621E30004)

**Vadovas**

(parašas) Prof. dr. Saulius Gudžius

(data)

**Recenzentas**

(parašas) Prof. dr. Alfonsas Morkvėnas

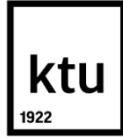
(data)

**Projektą atliko**

(parašas) Tadas Spundzevičius

(data)

**KAUNAS, 2018**



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Tadas Spundzevičius

(Studento vardas, pavardė)

Energijos technologijos ir ekonomika, 621E3000

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Elektros energijos šaltinių valdymo virtualiojoje elektrinėje tyrimas“

### AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 18 m.            gegužės 22 d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Tado Spundzevičiaus** baigiamasis projektas tema „Elektros energijos šaltinių valdymo virtualiojoje elektrinėje tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

\_\_\_\_\_  
(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

\_\_\_\_\_  
(parašas)

## **Turinys**

<i>Lentelių sąrašas</i> .....	7
<i>Paveikslų sąrašas</i> .....	8
<i>ĮVADAS</i> .....	10
<b>1. TEORINĖ DALIS</b> .....	12
<b>1.1. Virtualios elektrinės</b> .....	12
1.1.1. <i>Virtualios elektrinės samprata</i> .....	12
1.1.2. <i>Virtualios elektrinės komponentai ir veikimo modelis</i> .....	13
1.1.3. <i>Paskirstytos energijos generavimo šaltiniai</i> .....	13
1.1.4. <i>Energijos kaupikliai</i> .....	14
1.1.5. <i>Informacijos perdavimo ir valdymo sistema</i> .....	14
1.1.6. <i>Virtualios elektrinės principinis modelis</i> .....	15
1.1.7. <i>Virtualios elektrinės modelis su tarpusio komponentų ryšiais</i> .....	15
1.1.8. <i>Virtualios elektrinės vienlinijinės schemos modelis</i> .....	16
<b>1.2. Išmani elektros energijos apskaita</b> .....	17
<b>1.3. Aktyvūs vartotojai</b> .....	20
<b>1.4. Energijos kaupikliai</b> .....	26
<b>1.5. Elektros energijos kaupikliai – baterijos</b> .....	27
1.5.1. <i>Baterijų tipai</i> .....	27
1.5.2. <i>Baterijų integracija</i> .....	28
<b>2. TYRIMO DALIS</b> .....	30
<b>2.1. Tyrimo objektas</b> .....	30
2.1.1. <i>GAMS aplinkos modelis</i> .....	33
2.1.2. <i>Dujų turbinos matematinis modelis GAMS programoje</i> .....	33
2.1.3. <i>Aktyvios apkrovos matematinis modelis GAMS programoje</i> .....	35
2.1.4. <i>Elektros energijos kaupiklio matematinis modelis GAMS programoje</i> .....	37

2.1.5. Saulės elektrinės generuojamos galios prognozavimas ir apibrėžimas GAMS programoje	38
2.1.6. Pelno maksimizavimo sprendimas.....	40
2.2. Tyrimo rezultatai .....	41
2.2.1. Elektros rinkos kainos kitimo įtaka pelnui.....	42
2.2.2. Funkcijos $U_{EL}$ parametrų kitimo įtaka pelnui.....	47
2.2.3. Aktyvios apkrovos diapazono kitimo įtaka pelnui ir vartojamai energijai.....	51
2.2.4. Saulės jėgainės gailios kitimo įtaka pelnui ir perkamai/parduodamai elektros energijai .....	53
IŠVADOS.....	55
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	57
PRIEDAS Nr. 1 Virtualios elektrinės elementų darbo režimai prie rinkos kainų P0-P5.....	60
PRIEDAS Nr.2 Virtualios elektrinės elementų darbo režimai prie rinkos kainų D0-D5.....	62
PRIEDAS Nr. 3 Elektros rinkos kainos D0-D5.....	64
PRIEDAS Nr. 4 Virtualios elektrinės darbo režimų kitimas, kintant $U_{EL}$ funkcijai.....	65
PRIEDAS NR. 5 Aktyvios apkrovos diapazono kitimo įtaka pelnui ir vartojamai energija.....	70
PRIEDAS Nr. 6 Saulės jėgainės generuojamos galios kitimo įtaka pelnui.....	73
PRIEDAS NR.7 Saulės jėgainių įrengimo vietos ir užimamas plotas .....	75
PRIEDAS NR. 8 GAMS programinės aplinkso algoritmas .....	77

Spundzevičius, Tadas. RESEARCH OF CONTROL OF ELECTRIC POWER SOURCES IN VIRTUAL POWER PLANT: Master's thesis in Energy Technologies and Economics supervisor assoc. prof. Saulius Gudžius . Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electrical Power Systems

Research area and field: Electrical and Electronics Engineering, Technological Sciences

Key words: Virtual power plant, economic model, GAMS algorithm

Kaunas, 2018. 82 p.

## SUMMARY

The formation of virtual power plants is one of the directions of energy future, which gives the consumer the opportunity not only to supply electricity, but also to generate revenue (profits) for electricity sales and active load management in his micro-network. They provide an opportunity for the energy supply operator to reduce their investment in generation over the network, as it is done by the owners of virtual power plants

In order to properly enable the operation of such power plants and to promote their development, it is necessary to renovate the electricity grid and adapt it to bidirectional electricity trade, as well as to properly define virtual power service packages and the benefits of a virtual power plant.

Electricity supply operators are not facing this problem right now, because virtual power plants are only taking their first steps and understanding about their benefits to plaster is still actively explored. However, it is now necessary to properly define the appropriate economic conditions for the development of such power plants and to identify which variables affect the efficient operation of such power plants from the perspective of the user and the energy service provider.

If the power supply operator misidentifies the user's benefit by the function  $U_{(EL)}$ , the virtual power plant's active load becomes non-dynamic, it is also important to maintain a connection between the parameters of this function and the active load control range (the difference between  $E_L^{max}$  and  $E_L^{min}$ ). A wider range of active load management should give the owner of the virtual power plant more favorable conditions. A wider range of controls also ensures that at a high electricity market price, a virtual powerhouse will enjoy more power to the network

When formulating a virtual power plant and defining its service package, it is important to determine the relationship between the active load and the generated energy in a virtual power plant (gas turbine and solar power plant). Increasing the power of a solar power plant at a virtual power plant ensures greater sales of electricity to the grid and provides an opportunity to increase its share of profits by increasing the sales of electricity on the market.

## Lentelių sąrašas

lentelė 1 Energijos kaupiklio technologijos ir pagrindinės jų charakteristikos .....	27
lentelė 2 Dujų turbinos AE-T100NG parametrai .....	30
lentelė 3 Saulės modulių charakteristikos.....	31
lentelė 4 Dyzelinio generatoriaus parametrai .....	31
lentelė 5 Energijos kaupiklio parametrai .....	32
lentelė 6 Dujų turbinos parametrai naudojami GAMS modelyje .....	34
lentelė 7 Skaičiavimai ir apribojimai naudojami apibrėžti dujų turbiną GAMS modelyje .....	35
lentelė 8 Aktyvios apkrovos parametrai naudojami GAMS modelyje.....	36
lentelė 9 Skaičiavimai ir apribojimai naudojami apibrėžti aktyvią apkrovą GAMS modelyje ....	37
lentelė 10 Elektros energijos kaupiklio parametrai .....	38
lentelė 11 Elektros ? .....	38
lentelė 12 Paros elektros kainų didėjimo duomenys, 10 % žingsniu .....	42
lentelė 13 Pelno kitimas didėjant elektros kainoms .....	45
lentelė 14 Pelno kitimas mažėjant elektros kainoms.....	45
lentelė 15 Funkcijos $U_{EL}$ reikšmės, trumpiniai ir pelno pokytis .....	48
lentelė 16 Aktyvios apkrovos diapazono kitimo įtaka pelnui ir vartojamai energijai .....	51
lentelė 17 Saulės elektrinės galios kitimo įtaka pelnui.....	53

## Paveikslų sąrašas

pav. 1 Virtualios elektrinės komponentai ir jų tarpusavio ryšys.....	16
pav. 2 Virtualios elektrinės struktūrinė vienlinijinė schema.....	17
pav. 3 Išmaniosios apskaitos struktūros elementai.....	18
pav. 4 Tradicinės ir išmanios apskaitos modeliai.....	19
pav. 5 Išmanios apskaitos diegimo tendencija Europos sąjungos šalyse .....	20
pav. 6 Tradicinės energetikos sistemos, energijos perdavimo kryptis .....	22
pav. 7 Išmaniojo elektros tinko energijos perdavimo kryptis .....	22
pav. 8 Tradicinės elektros energijos sistemos dalyviai .....	23
pav. 9 Virtualios elektrinės ir aktyvių vartotojų sąryšis .....	24
pav. 10 Duomenų surinkimas ir valdymas virtualioje elektrinėje su aktyviais vartotojais .....	25
pav. 11 Energijos kaupiklio prijungimo schema prie elektros energijos tinklo.....	29
pav. 12 Dujų turbina AE-T100NG.....	30
pav. 13 150 kW dyzelinis generatorius .....	32
pav. 14 160 kW Li-ion baterija .....	32
pav. 16 Virtualios elektrinės modelis ir jos elementai .....	33
pav. 16 Virtualios elektrinės vizualinė schema ir jos elementai.....	33
pav. 17 Dujų turbinos lygties funkcijos a) kvadratinė lygties funkcija $C_i(EG_i)$ b) tiesinė lygties funkcija $C_i(EG_i)$ .....	34
pav. 18 Aktyvios apkrovos kvadratinės lygtis funkcija $U_j(EL_j)$ .....	36
pav. 19 PVWatts skaičiuoklės duomenų įvedimas ir vietovės pasirinkimas.....	39
pav. 20 Saulės elektrinės vietos parinkimas PVWatts skaičiuoklėje .....	39
pav. 21 Saulės elektrinės generuojama galia skirtingais metų laikais.....	41
pav. 22 Elektros kainos žiemos ir vasaros laikotarpiu .....	42
pav. 23 Virtualios elektrinės energijos šaltinių darbas, esant elektros kainoms $P_0$ .....	44
pav. 24 Elektros energijos suvartojimo kitimas, esant skirtingoms kainoms (kainoms didėjant) .....	45
pav. 25 Elektros energijos suvartojimo kitimas, esant skirtingoms kainoms (kainoms mažėjant) .....	46
.....	46
pav. 26 Pelno kitimas didėjant ir mažėjant elektros kainoms .....	47
pav. 27 Funkcijos $U_{EL}$ tiesinio koeficiento kitimo įtaka pelnui .....	48
pav. 28 Elektros energijos suvartojimo kitimas, kintant $U_{EL}$ funkcijos parametrams.....	48
pav. 29 Parduodamos/nuperkamos elektros energijos kitimas, kintant $U_{EL}$ funkcijai .....	50



pav. 30 Aktyvios apkrovos diapazono kitimo įtaka pelnui, elektros pardavimo pirkimo pelno daliai ir vartojamai energijai.....	52
pav. 31 Parduotos/nupirkta energijos kitimas, kintant aktyvios apkrovos diapazonui.....	53
pav. 32 Saulės elektrinių generuojama galia .....	54

## IVADAS

Technologijų vystymais įtakoja visus mūsų gyvenimo aspektus bei apima visas pramonės sritis. Ne išimtis tapo ir elektros energetikos sektorius. Atsirandantys nedidelės galios efektyvūs ir sąlyginai pigūs elektros energijos generavimo šaltiniai, energijos kaupikliai suteikia galimybę vartotojams pradėti gaminti elektros energiją, ją kaupti o jos perteklių parduoti į elektros tinklą. Kartu su naujomis vartotojų funkcijomis atsiranda ir naujas vartotojų apibrėžimas – aktyvus vartotojas, bei galimybė formuoti naujo tipo elektrinėms – virtualioms elektrinėms.

Virtualių elektrinių formavimas yra viena iš energetikos ateities krypčių, jos suteikia vartotojui galimybę ne tik apsirūpinti elektros energija bet ir gauti pajams (pelną) už elektros pardavimą, aktyvios apkrovos valdymą savo mikro tinkle. Energijos tiekimo operatoriui, jos suteikia galimybę mažinti investicijas į generacijos plėtra tinkle, nes tai atlieka virtualių elektrinių savininkai

Norint tinkamai įgalinti tokių elektrinių veikimą bei skatinti jų vystymąsi reikia renovuoti elektros tinklą ir pritaikyti jį dvikrypčiai elektros prekybai, taip pat tinkamai apibrėžti virtualios elektrinės paslaugos paketus, bei virtualios elektrinės gaunamą naudą.

Elektros energijos tiekimo operatoriai su šia problema kol kas tiesiogiai nesusiduria, nes virtualios elektrinės dar žengia tik pirmuosius savo žingsnius ir suvokimas apie jų naudą tinkui vis dar aktyviai tyrinėjamas. Tačiau jau dabar reikia tinkamai apibrėžti tinkamas ekonomines sąlygas tokių elektrinių vystymuisi bei identifikuoti kokie kintamieji įtakoja tokių elektrinių efektyvų veikimą iš vartotojo ir energijos paslaugos teikėjo perspektyvų

Atliekant tyrimą analizuosime įvairių virtualios elektrinės elementų parametrų kitimą ir jų įtaką pelnui, vartojamai, perkamai/parduodamai energijai. Analizuosime kaip virtualios elektrinės darbas ir jos efektyvumas keičiasi kintant gaunamai naudai (pajamoms) iš energijos teikimo operatoriaus.

Gauti tyrimo rezultatai, padės tiksliau identifikuoti virtualios elektrinės teikiamus privalumus tinklui, apibrėžti kokioms sąlygoms esant virtuali elektrinė tampa efektyvia elektros tinklo dalimi, identifikuos, kokie veiksniai įtakoja ekonomiškai naudingą jos veikimą.

**Darbo tikslas:** sukurti matematinį modelį virtualiai elektrinei ir pritaikyti pelno optimizavimo galimybes

**Darbo uždaviniai:**

- Pristatyti virtualios elektrinės sampratą bei ją sudarančius komponentus
- Išanalizuoti virtualios elektrinės elementų technologijas ir jų veikimo principus
- Sumodeliuoti virtualios elektrinės modelį pasitelkus GAMS (angl. *General Algebraic Modeling System*) programinę įrangą

- Pasitelkiant sukurta modelį ištirti palankiausias veikimo sąlygas virtualiai elektrinei
- Ištirti įvairių veiksnių įtaką virtualios elektrinės pelnui

**Darbo rezultatai:**

- Sumodeliuotas pelno optimizavimo algoritmas virtualiai elektrinei
- Nustatytos ir apibrėžtos palankios ir ekonomiškai naudingos darbo sąlygos virtualiai elektrinei

# 1. TEORINĖ DALIS

## 1.1. Virtualios elektrinės

### 1.1.1. Virtualios elektrinės samprata

Šiuo metu pasaulyje vis dažniau aptarinėjama ir tyrinėjama ganėtinai nauja koncepcija - virtualios elektrinės (VE) (angl. *Virtual Power Plant*). Virtualių elektrinių idėja pasirodė maždaug prieš 7-8 metus ir jau dabar aišku, kad ši koncepcija turi savo privalumų ir tai yra viena iš ateities sričių, kurią energetikos sektorius plėtos ir vystys. Ši koncepcija pagrįde paremta centralizuota valdymo sistema, kuri apjungia valdymą ir vizualinį atvaizdavimą paskirstytos generacijos (PG) šaltinių. Virtualios elektrinės energijos generavimo šaltiniai gali būti įvairūs: kombinuoto ciklo jėgainės, kuro elementai, saulės jėgainės, šilumos siurbliai, vėjo jėgainės ir visi kiti elektros ir šilumos energijos generavimo šaltiniai, svarbiausia sąlyga yra tai, kad jų lokacija turi būti artima ir jie negali būti nutolę geografiškai vienas nuo kito. [26]

Skirtingų energijos generavimo šaltinių apjungimas yra geras sprendimas, norint užtikrinti pastovią energijos gamybą iš atsinaujinančių energijos išteklių (AEI). Kadangi šiuo metu viena iš esminių problemų yra šių šaltinių generuojamos energijos nepastovumas ir priklausomumas nuo aplinkos sąlygų, pavyzdžiui vėjo turbinos priklauso nuo vėjo greičio, saulės jėgainės nuo saulės intensyvumo. Šiuos veiksnius prognozuoti yra sunku, nors šiuo metu, kuriami vis naujesni algoritmai ir matematiniai modeliai, kurie galėtų tiksliai prognozuoti šiuos veiksnius, bet jų tikslumas nesiekia daugiau nei 40 % [25]. Toks tikslumas yra sąlyginai mažas, lyginant su kitais parametrais ir paklaidų dydžiais naudojamais energetikos sektoriuje. Nesugebėjimas tiksliai prognozuoti energijos gamybos iš atsinaujinančių energijos išteklių sukuria rimtų problemų perdavimo ir skirstymo sistemos operatoriams, planuojant ir vertinant tinklo galios srautus, gamybos apimtis kituose energijos generavimo šaltiniuose (hidroelektrinėse, kietojo kuro deginimo elektrinėse, atominėse elektrinėse ir t.t). [20]

Virtualios elektrinės suteikia galimybę sumažinti perdavimo tinklo apkrovimus. Jų generuojama energija yra vartojama vietinėje teritorijoje, taip išvengiant poreikio perduoti energiją ilgomis distancijomis su dideliais (7-8%) perdavimo tinklo nuostoliais. [21]

Norint tinkamai suprasti virtualių elektrinių konceptą, svarbi sąlyga yra tai, kad visi dalyviai priklausantys šiai elektrinei turi tiesioginę įtaką šios elektrinės efektyvumui. Šioje elektrinėje aktyviai dalyvauja tiek energijos generavimo šaltiniai, tiek ir apkrovą kuriantys vartotojai, kurie turi galimybę valdydami savo apkrovų grafiką (sumažindami energijos vartojimą pikiniu metu) tiesiogiai sąlygoti šios elektrinės efektyvų veikimą [24].

### 1.1.2. Virtualios elektrinės komponentai ir veikimo modelis

Analizuojant virtualias elektrines galime identifikuoti tris pagrindinius elementus (komponentus), kurie apibrėžia būtinas savybes tokio tipo elektrinės bei identifikuoja jų koncepcinius privalumus. Trys pagrindiniai virtualios elektrinės komponentai[24]:

- paskirstytos energijos generavimo šaltiniai;
- energijos kaupikliai;
- informacijos perdavimo ir valdymo sistema.

#### 1.1.3. Paskirstytos energijos generavimo šaltiniai

Paskirstyti energijos generavimo šaltiniai gali būti tiek įvairių rūšių jėgainės, tiek valdomi apkrovos įrenginiai prijungti prie tinklo. Paskirstytos energijos generavimo šaltiniai gali būti klasifikuojami pagal 4 tipus [26]:

- 1) Pagal pirminės energijos tipą. Pagal šį tipą paskirstytos energijos šaltiniai gali būti dviejų kategorijų:
  - a. Jėgainės, naudojančios atsinaujinančius energijos išteklius (saulės jėgainės, vėjo jėgainės, nedidelės galios hidroelektrinės);
  - b. Jėgainės, naudojančios neatsinaujinančius išteklius (kombinuoto ciklo jėgainės, biomasės jėgainės, dyzeliniai generatoriai, dujų turbinos, kuro elementai).
- 2) Pagal galingumą. Pagal šį klasifikavimo kriterijų išskiriamos dvi kategorijos:
  - a. Mažo galingumo šaltiniai. Tai tokie energijos šaltiniai, kurie pavieniui negali dalyvauti energijos prekybos rinkoje ir šią galimybę įgyja tik prisijungdami prie virtualios elektrinės. Tokių šaltinių pavyzdžiai: saulės elektrinės įrengtos namų ūkiuose, mažos pavienės vėjo jėgainės, pavieniai dyzeliniai generatoriai;
  - b. Vidutinio galingumo šaltiniai. Tai tokie energijos šaltiniai, kurie energijos prekybos rinkoje galėtų dalyvauti, kaip atskiri daliniai, bet dėl balansavimo galimybės bei galimybės prekiauti didesniu energijos kiekiu, jie prisijungia prie virtualios elektrinės. Tokių šaltinių pavyzdžiai: kombinuoto ciklo jėgainės, saulės parkai (sudaryti iš keliasdešimties saulės panelių), vėjo parkai (sudaryti iš keliolikos vėjo jėgainių sukonzentruotų vienoje vietovėje).
- 3) Pagal nuosavybės teises. Pagal šį klasifikavimo kriterijų išskiriamos trys kategorijos:
  - a. Priklausantys gyventojams, pramonės įmonės ar komercinės paskirties paskirstytos energijos generavimo šaltiniai, kad dalis pagaminamos energijos suvartojama savo reikmėms ir tik likusi energija tiekama į bendrą tinklą;
  - b. Priklausantys energijos tinklo operatoriui ir skirti palaikyti reikiamą energijos kiekį bendrame energijos tinkle. Šie energijos šaltiniai dar vadinami visuomenės (angl. *Public*) paskirstytos energijos generavimo šaltiniai;

- c. Priklausantys komercinės bendrovėms (angl. *Commercial Company*), kurių tikslas yra generuoti pajamas ir pelną už parduodamą energiją.
- 4) Pagal veikimo pobūdį. Pagal šį klasifikavimo kriterijų išskiriamos dvi kategorijos:
- a. Nepastovaus (angl. *Stochastic*) pobūdžio. Tai energijos generavimo šaltiniai priklausantys nuo saulės intensyvumo ir vėjo greičio. Šių šaltinių atiduodama gali tinklui nėra tiesiogiai valdoma, ji priklauso nuo pirminės energijos intensyvumo kitimo.
  - b. Kiti paskirstytos energijos generavimo šaltiniai. Šiai grupei priskiriami tokie šaltiniai kaip kuro elementai ir mikroturbinos, tai tokie šaltiniai, kurie iš karto gali keisti savo generuojamą galią. Taip pat šiai grupei priskiriami tokie energijos generavimo šaltiniai: valdomi, apkrovą veikiantys prietaisai, energijos kaupikliai ir t.t.

#### 1.1.4. **Energijos kaupikliai**

Energijos kaupikliai atlieka svarbų vaidmenį virtualiose elektrinėse. Jie užtikrina sklandų galios paskirstymą tinkle tais atvejais, kai atsiranda skirtumas tarp vartojamos ir generuojamos galios. Energijos kaupikliai esantys virtualiose elektrinėse užtikrina, kad esami energijos generavimo šaltiniai, veikiantys dėl atsinaujinančių išteklių, veiks sklandžiai ir nebus atjunginėjami nuo bendro tinklo[8]. Taip pat jie sumažina galios poreikį, kurį virtuali elektrinė turi pirkti (suvartoti) iš bendro tinklo. Energijos kaupikliai skirti suvaldyti pikinius (angl. *Peak*) apkrovos momentus, šie kaupikliai įkraunami ne pikiniais momentais, o energiją į tinklą pateikia pikiniais momentais. Energijos kaupikliai klasifikuojami pagal jų pritaikymą, kaupiantys energiją arba galią [23]:

- Energiją kaupiantys:
  - Hidrauliniai siurbliai (angl. *Hydraulic Pumped*);
  - Suspausto oro kaupikliai (angl. *Compressed Air*).
- Galią kaupiantys:
  - Smagračiai (angl. *Flywheel*);
  - Magnetiniai super konduktoriai (angl. *Super Conductor Magnetic*);
  - Superkondensatoriai.

#### 1.1.5. **Informacijos perdavimo ir valdymo sistema**

Valdymo sistema yra atsakinga už visų virtualios elektrinės elementų valdymą ir duomenų surinkimą. Informacijos perdavimas virtualiose elektrinėse tarp valdymo sistemos ir jos komponentų yra dvikryptis. Valdymo sistema yra atsakinga už šiuos veiksmus [26]:

- Surinkti informaciją apie kiekvieno virtualios elektrinės elemento būseną;
- Prognozuoti atsinaujinančių energijos išteklių pirminės energijos intensyvumą bei jų generuojamą galią;
- Prognozuoti ir valdyti tinklo apkrovas;

- Koordinuoti galios srautus tarp skirtingų virtualios elektrinės elementų;
- Valdyti paskirstytos energijos generavimo šaltinius, kaupiklius bei apkrovai įtaką darančius prietaisus.

#### 1.1.6. Virtualios elektrinės principinis modelis

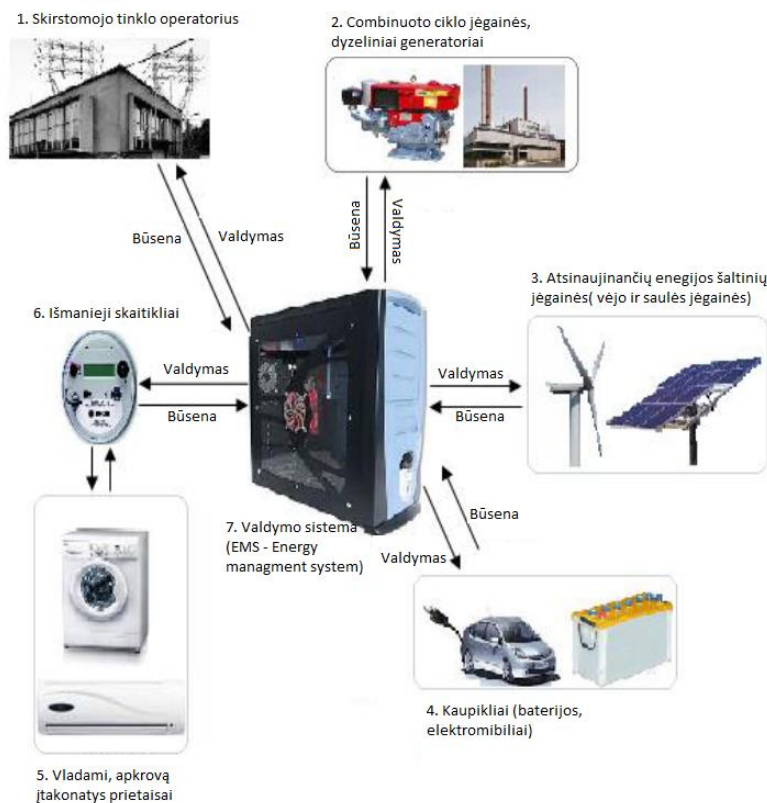
Principinis virtualios elektrinės modelis gali būti vaizduojamas keliais būdais. Įvairūs šaltinių autoriai pateikia savo interpretacijas ir vizualinius atvaizdavimus, tačiau dėl bendrinių dalykų (virtualios elektrinės komponentų aptartų ankstesniame skyriuje) visi autoriai mąsto ir pateikia vienodai. Tolimesniuose paragrafuose pateikti du virtualios elektrinės principiniai modeliai, viename parodyti tarpusavio ryšiai bei įeinantys elementai, kitame modelyje atvaizduota virtualios elektrinės vienlinijinė schema [22].

#### 1.1.7. Virtualios elektrinės modelis su tarpusio komponentų ryšiais

Principinis virtualios elektrinės modelis, jį sudarantys elementai ir jų tarpusavio ryšys pavaizduotas 1-ame paveikslėlyje. Šioje schemoje (scheminiame atvaizdavime), virtualią elektrinę sudaro septyni pagrindiniai elementai [26]:

- 1 - skirstomojo tinklo operatorius, jis atsakingas už informacijos teikimą valdymo sistemai. Pateikia informaciją apie reikiamą galią, apie bendro tinklo būseną, apie esamą sistemos dažnį. Valdymo sistema:
- 2 - kombinuoto ciklo jėgainės ir dyzeliniai generatoriai, tai paskirstytos generacijos energijos generavimo įrenginiai, naudojantys tradicines kuro rūšis (iškastini kurą, akmenis anglis, gamtines dujas ir t.t). Šių jėgainių klasifikacija priklauso nedidelio galingumo jėgainėms nuo 1 kW iki 1 MW;
- 3 - atsinaujinančios energijos šaltinių jėgainės (vėjo ir saulės jėgainės), tai paskirstytos generacijos energijos generavimo šaltiniai, kurių pirminė energija yra atsinaujinantys energijos ištekliai (saulė, vėjas). Šių jėgainių klasifikacija priklauso nedidelio galingumo jėgainėms nuo 1 kW iki 1 MW;
- 4 - kaupikliai (baterijos, elektromobiliai), tai įrenginiai skirti kaupti elektros ir šilumos energiją, pagrinde naudojamos įvairaus tipo baterijos, kaip alternatyva gali būti naudojamos ir baterijos įmontuotos elektromobiliuose.
- 5 - valdomi, apkrovą įtakojantys prietaisai, tai įrenginiai, kurie yra kiekviename namų ūkyje: elektrinis grindinis šildymas, elektriniai karšto vandens pakaitinimo įrenginiai, skalbimo mašinos, elektrinės viryklės ir t.t. Šiai kategorijai priklauso įrenginiai, kurių apkrovimo valdymas (tam tikrose ribose) galėtų būti perduotas valdymo sistemai ir žmogaus neišstumtų iš jo komforto zonos. Vietoje valdomos apkrovos prietaisų, virtuali elektrinė gali turėti aktyvius vartotojus (angl. *Prosumers*) jie plačiau bus nagrinėjami trečiajame skyriuje.

- 6 - išmanieji skaitikliai, šie skaitikliai stebi momentinę apkrovą ir ją perduoda valdymo sistemai, taip pat šių skaitiklių pagalba perduodamos valdymo programos namų ūkio prietaisams, kurių apkrovą gali valdyti valdymo sistema.
- 7 - valdymo sistema (angl. *EMS-energy management system*), tai centralizuotas įrenginys apjungiantis anksčiau minėtus įrenginius ir įtaisus, turintis matematinis algoritmus, kuriass paskirsto galios srautus, stebi visą sistemos būseną. Šis įrenginys turi tiesioginį ryšį su skirstomojo tinklo operatoriaus valdymo sistema, šis veiksny s suteikia galimybę tinklo operatoriui stebėti visus paskirstytos generacijos šaltinius. Taip pat ši valdymo sistema atsakinga už rinkoje parduotos elektros patiekimą galutiniams vartotojams. Valdymo sistema ne tik seka momentines apkrovas ir generavimo šaltinius, bet ir siunčia reikiamas valdymo komandas, tinkamam energijos balansavimui.



pav. 1 Virtualios elektrinės komponentai ir jų tarpusavio ryšys [9]

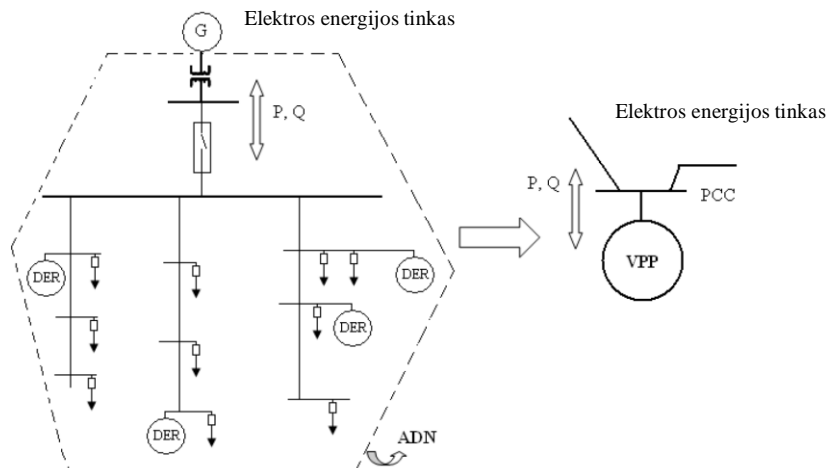
### 1.1.8. Virtualios elektrinės vienlinijinės schemos modelis

Virtualią elektrinę daugelyje šaltinių galima rasti ne kaip modelio atvaizdavimą bet kaip vienlinijinę schemą. Šis atvaizdavimas leidžia aiškiai išaiškinti ir pateikti, kaip virtualios elektrinės veikia ir funkcionuoja elektros perdavimo ir skirstymo tinkle. Pavaizduotame brėžinyje yra matomos vartotojų apkrovos ir energijos generacijos šaltiniai (angl. *DER - Distributed Energy Resource*). Šio brėžiniu galima atlikti tokios virtualios elektrinės detalesnius skaičiavimus, taip pat šis brėžinys nurodo,



jog paskirstytos generacijos šaltiniai, kurie paprastai nėra matomi tinklo operatoriui, tampa matomi, kaip virtualios elektrinės sudedamosios dalys [25].

Šiame brėžinyje nėra pavaizduota valdymo sistemos ir jos valdymo principų bei tarpusavio elementų ryšio. Tačiau, kaip minėta anksčiau, jis atspindi, kaip šios elektrinės išdėstytos bendrame tinkle.



pav. 2 Virtualios elektrinės struktūrinė vienlinijinė schema [26]

## 1.2. Išmani elektros energijos apskaita

Išmani elektros energijos apskaita (angl. *Smart meter*) yra pažangių technologijų sistema, kuri matuoja vartotojo sunaudotą elektros energiją ir duomenis pateikia energijos skirstymo operatoriui, tai yra pagrindiniai bruožai kuo ši sistema primena standartinius elektros energijos skaitiklius. Tačiau išmanioji apskaita turi aibę papildomų funkcijų [13]:

- Mათuoja elektros energijos suvartojimą realu laiku;
- Turi galimybę vykdyti dvikryptę apskaitą;
- Perduoda duomenis energijos skirstymo operatoriui (vykdo nuotolinį automatinį parametrų nuskaitymą);
- Mათuoja įtampą, fazės kampus, dažnį;
- Automatiškai formuoja sąskaitas už elektros energiją vartotojui.

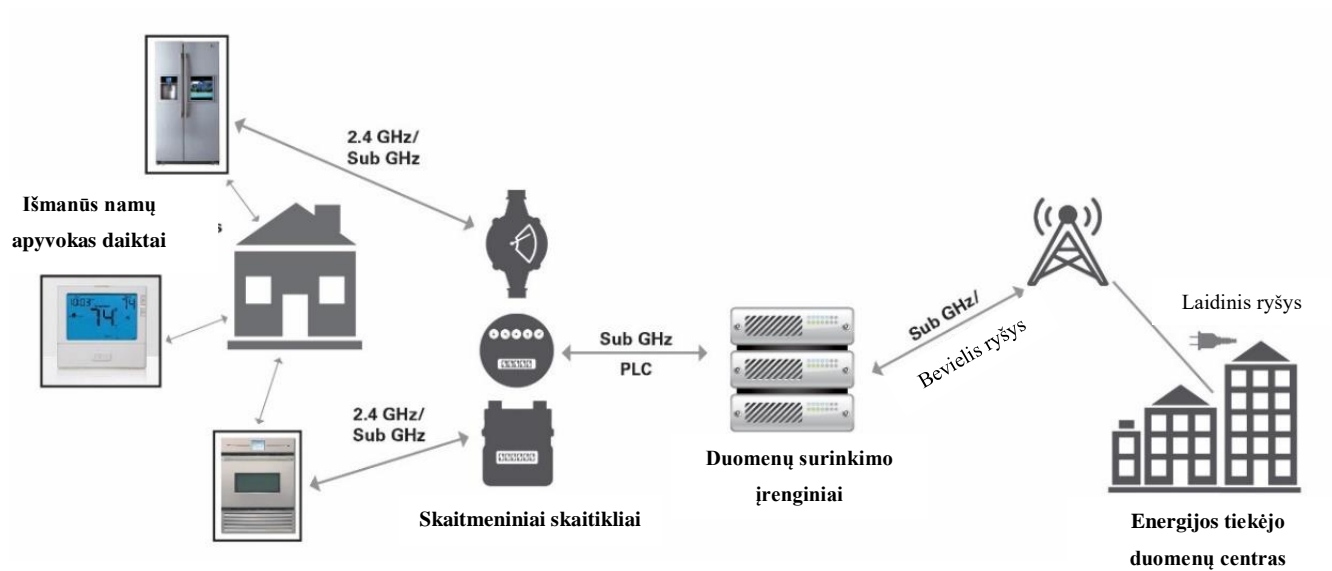
Norint užtikrinti visas išmanios energijos apskaitos funkcijas ši sistema turi būti sudaryta:

- Skaitmeninio skaitiklio;
- Tarpinės duomenų surinkimo stoties;
- Duomenų perdavimo protokolo;
- Duomenų surinkimo centro.

Tai minimalūs komponentai įgalinantys veikti išmaniają apskaitą. Norint užtikrinti papildomas šios sistemos funkcijas, galimybę valdyti namų ūkio prietaisus ir juos programuoti, stebėti jų energijos suvartojimą, būtini keli papildomi įrenginiai:

- a) išmanieji valdikliai (apšvietimo, šildymo valdymui);
- b) išmanieji įrenginiai prijungti prie skaitiklio (šaldytuvai, dujinės viryklės, skalbimo mašinos ir t.t.);
- c) sensoriai (temperatūros ir t.t.).

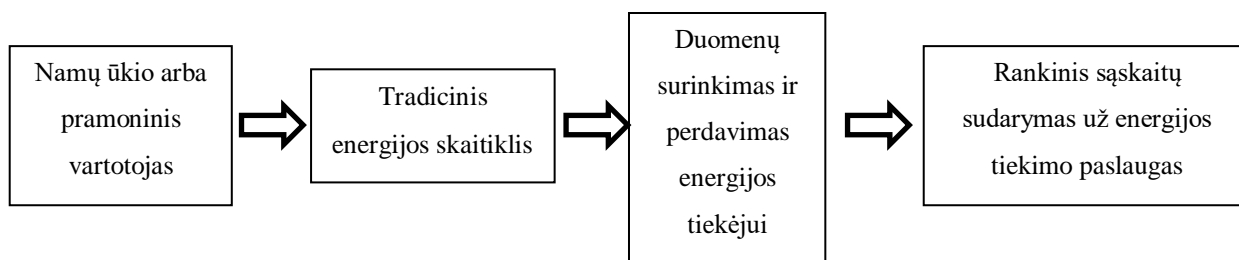
Pagrindinių ir papildomų įrenginių struktūra skirta išmaniajai apskaitai nurodyta 3-ajame paveikslėlyje.



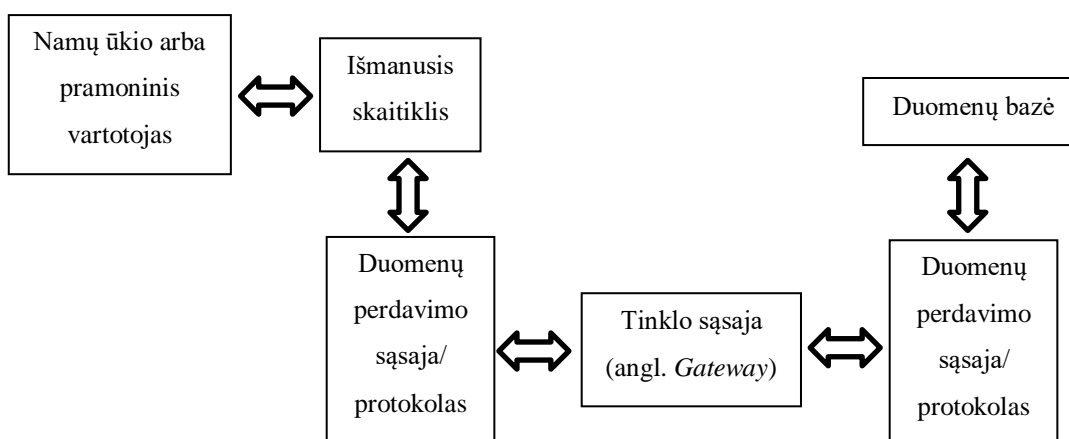
pav. 3 Išmaniosios apskaitos struktūros elementai [22]

Apačioje (4-ajame paveiksle) pateiktas sisteminis palyginimas tarp tradicinės ir išmanios apskaitos:

Tradicinė elektros energijos apskaitos sistema:



Išmani elektros energijos apskaita:



pav. 4 Tradicinės ir išmanios apskaitos modeliai [13]

Pateiktame grafiniame sistemų palyginime aiškiai matomas skirtumas tarp tradicinės ir išmanios apskaitos, tai yra atsiradęs nuotolinis automatinis duomenų perdavimas.

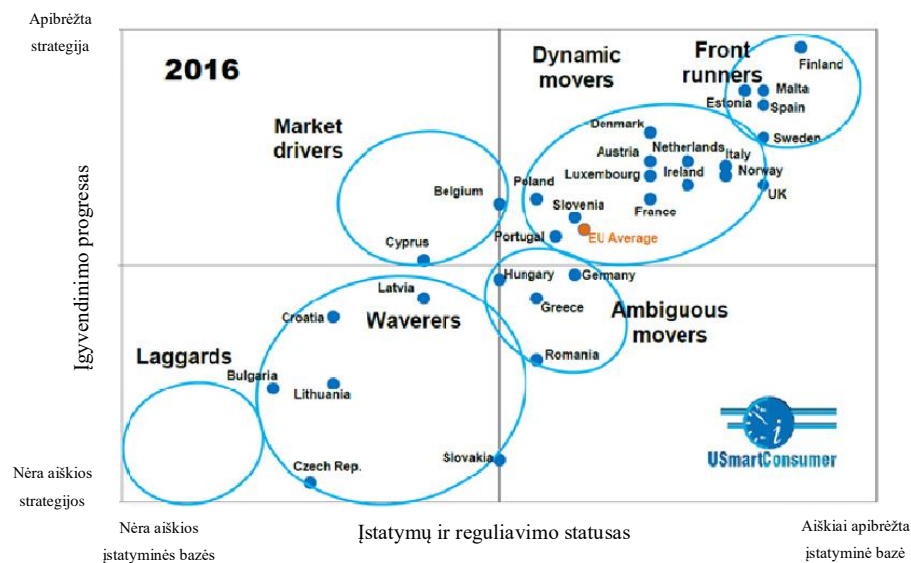
Tokia apskaita įgalina vartotojus sekti savo momentinį elektros energijos sunaudojimą, gauti pranešimus apie padidėjusį elektros energijos vartojimą jų namų ūkiuose. Taip pat ši sistema suteikia galimybę sekti elektros rinkos valandinę kainą ir pagal tai vartoti elektros energiją savo reikmėms. Toks elektros energijos skaitiklių įdiegimas įgalina vartotoją elektros energiją vartoti priklausomai nuo jos rinkos kainos (angl. *Demand responded*).

Išmanią apskaitą be elektros energijos skaitiklio ir duomenų perdavimo tinklo taip pat gali sudaryti valdikliai bei įvairūs sensoriai, kurie surenka įvairius signalus apie namų ūkio elektros energijos vartojimą, šildymo sistemos darbą, apšvietimą ir perduoda šiuos signalus energijos tiekėjui. Tokie elementai diegiami vartotojų namų ūkiuose tam, kad tobulėjant tinklui ateityje elektros energijos tiekėjas turėtų galimybę minimaliose leistinose ribose kontroliuoti vartotojo elektros energijos suvartojimą. Tokių duomenų surinkimas bei apdorojimas suteikia galimybę energijos tiekėjui efektyviau planuoti energijos poreikį. Taip pat siūlyti naujas paslaugas tiekėjams priklausomai nuo jų įpročių bei patarti vartotojams, kaip efektyviai naudoti elektros energiją jų namų ūkiuose [13].

Išmanioji energijos apskaita taip pat yra naudinga ir vartotojui, nes suteikia galimybę programuoti ir valdyti namų ūkio prietaisus, tai padeda taupyti elektros energiją bei ją vartoti, tada kada ji yra

pigiausia. Ši valdymo galimybė yra įmanoma tik tokiu atveju, jei kartu su skaitmeniniu skaitikliu yra montuojami sensoriai ir valdikliai kaip buvo minėta anksčiau. Šiuo metu ne vienoje pasaulio šalyje (tarp jų ir Lietuvoje) įgyvendinami išmanios apskaitos diegimo projektai, tačiau šie projektai apsiriboja skaitmeninių skaitiklių įrengimu ir komunikacijos tinklo diegimu. Tačiau jie nediegia ir nevysto programuojamų valdiklių plėtros ir panaudojimo namų ūkiuose. Pagal planą tai turėtų būti kitas etapas [14].

Apačioje pateiktame 5-ajame paveikslėlyje matome progresą, kaip įvairios Europos šalys diegia ir vysto išmanios apskaitos projektus. Didžiausią pažangą yra padariusios: Suomija, Malta, Švedija, Ispanija ir Estija. Pagal 2016 metų duomenis išmaniosios apskaitos projektai tik išibėgėja: Lietuvoje, Čekijoje, Slovakijoje. Lyginant su 2014 metų duomenimis pateiktas Europos Komisijos didžiausią pažangą per metus atliko Vengrija ir Estija. Tuo tarpu Lietuvos pozicija šioje vietoje beveik nepakito, nors ir esame įdiegę tokią apskaitą pramonės įmonėms, tai bendrame Lietuvos kontekste yra nedidelė dalis, todėl Europoje išmanios apskaitos diegimo srityje esame vieni iš paskutiniųjų. Tačiau šiuo metu jau esame pasiruošę diegti šiuos skaitiklius visiems vartotojams ir 2019 metais tai pradėsime įgyvendinti šį projektą [4].



pav. 5 Išmanios apskaitos diegimo tendencija Europos Sąjungos šalyse [14]

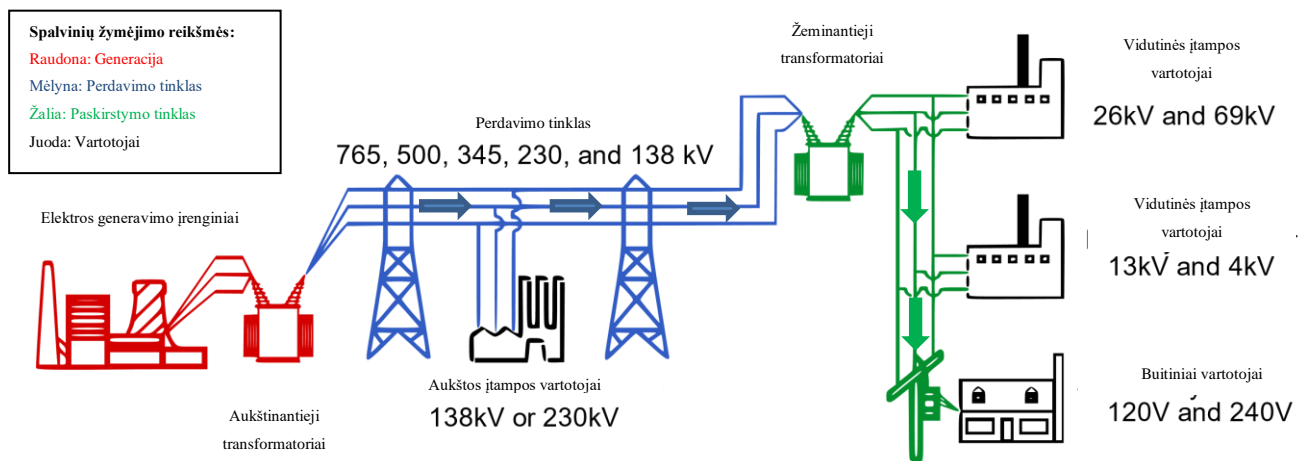
### 1.3. Aktyvūs vartotojai

Šiuo metu pasaulyje vyksta intensyvūs tyrimai ir bandymai [1,2] plėtojant ir vystant išmanųjį tinklą ir technologijas. Visų šių tyrimų tikslas yra sukurti naują elektros infrastruktūros modelį, kuris būtų lankstesnis ir užtikrintų energetinį saugumą, būtų pritaikytas tvariai ir efektyviai visuomenei, įgalintų vartotoją tapti aktyvia tinklo dalimi, o ne tik pasyviu vartotoju [3].

Šiuolaikinio elektros energijos tinklo technologijos sparčiai tobulėja, per pastaruosius kelerius metus buvo pristatyta ir įdiegta daug naujų technologijų: išmanieji skaitikliai, anksčiau minėtos virtualios elektrinės ir pan. Tačiau technologinių priemonių diegimas nedaro įtakos tinklo struktūros pokyčių, taip pat nediegiamos ir nevystomos politinės priemonės, kurios įgalintų aktyvius vartotojus [3].

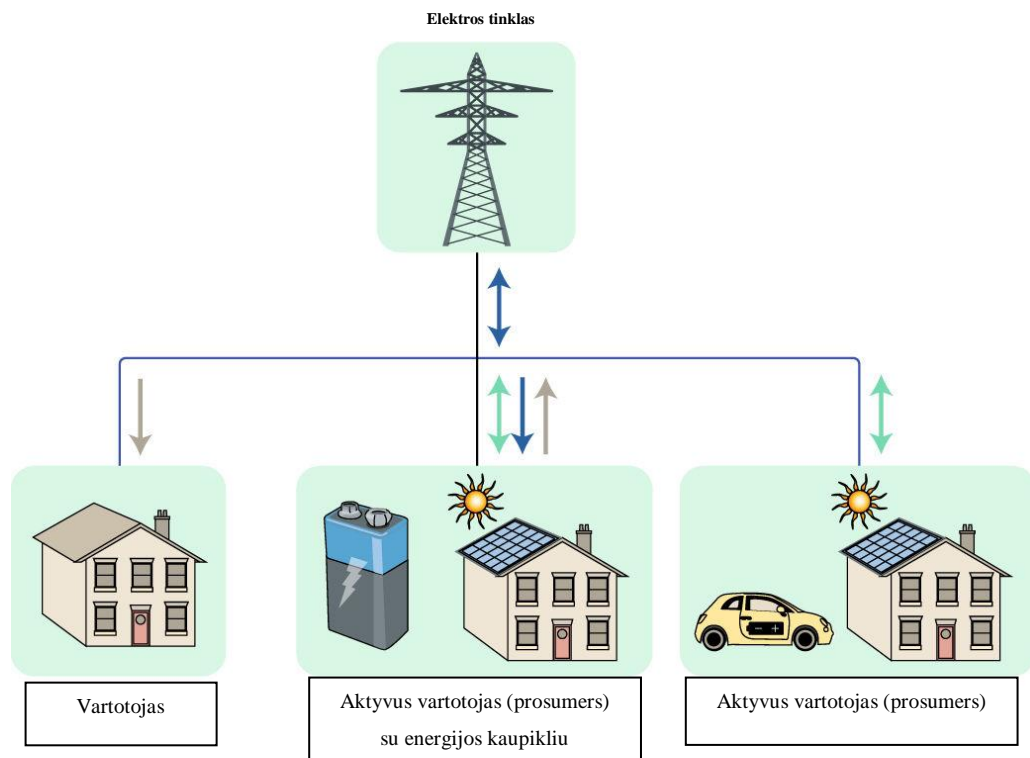
Lietuvoje deklaruojama, jog iki 2019 metų pabaigos bus įdiegti išmanieji skaitikliai, į šį projektą bus investuojama 219 mln. € [5], tokia apskaita, bus skirta tik duomenų surinkimui ir apdorojimui bei galės užtikrinti dvipusę apskaitą (vartotojui vartojant ir parduodant elektros energiją) [4]. Nors šiuo metu Lietuvos energijos skirstymo operatorius deklaruoja, kad pagrindinė šių skaitiklių funkcija bus duomenų surinkimas ir visas dėmesys skiriamas šiai paslaugai. Elektros energijos tinklas taps technologiškai tobulesnis ir turės pažangią apskaitos duomenų surinkimo sistemą (duomenis apie elektros suvartojimą surinks valandos bėgyje) [4]. Tačiau norint sukurti išmanųjį elektros energijos skirstymo tinklą, kuris galėtų suteikti vartotojui didesnes galimybes, svarbu plėtoti technologijas, kurios lygiagrečiai atsirastų su naujomis tinklo teikiamomis paslaugomis, keisti galiojančią energetikos politiką [3]. Kuriant išmanųjį elektros energetikos tinklą svarbu užtikrinti, kad diegiamos naujos technologijos būtų pritaikomos tinklo vystymuisi ir būtų diegiamas kartu su plačiu paslaugų spektru, kurios iš esmės keistų tinklo struktūrą bei vartotojų įpročius.[30]

Vienas pagrindinių principų elektros energetikos skirstymo tinkle yra galios srautų kryptis (angl. *Direction of flows*) ji veikia laidininkų skerspjūvį skirstymo linijose, apsaugos schemas ir principus. Tradiciniame elektros energetikos sektoriuje elektros energija perduodama iš generatoriaus, per perdavimo ir skirstymo tinklus (su aukštinančiais ir žeminančiais transformatoriais) vartotojui, viena kryptimi, taip kaip pavaizduota 6-ajame paveiksle [6]. Tokia perdavimo ir skirstymo sistema turi galimybę prijungti prie skirstomojo tinklo atsinaujinančius energijos šaltinius (angl. *Distributed generation*), tačiau tokie šaltiniai tampa naujais generacijos vienetais sistemoje. Tokios struktūros elektros tinklas nėra pajėgus vartotojui suteikti galimybės parduoti perteklinę elektros energiją, kurią vartotojas pats gamina. Kitaip tariant, tinklas nėra pajėgus per tą pačią elektros energijos tiekimo liniją tiekti energiją vartotojui ir ją priimti į tinklą (kaip generuojamą) [3]. Šioje vietoje tinklą riboja vienpusė apskaita (apskaitoma tik vartojama energija, bet negaminama), tinklo apsaugos bei komutaciniai elementai.



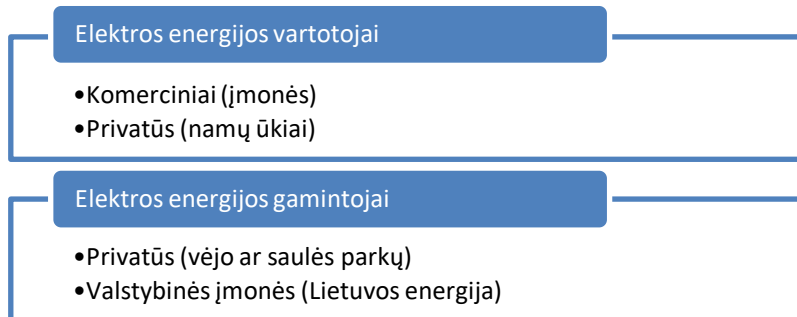
pav. 6 Tradicinės energetikos sistemos elektros energijos perdavimo kryptis [6]

Siekiant sukurti elektros tinklo struktūrą, kur vartotojas taptų aktyvia šio tinko dalimi, svarbu įgyvendinti pokyčius taip, kad vartotojas pagaminatą savo perteklinę energiją galėtų parduoti paslaugos teikėjui (Lietuvos atveju – ESO) [3]. Norint įgyvendinti šį pokytį reikia, kad elektros energija būtų perduodama dviem kryptimis: iš vartotojo į tinklą ir iš tinklo – vartotojui, kaip parodyta 7-ajame paveiksle, taip pat reikalinga įdiegti abipusę apskaitą, modernizuoti tinklo apsaugas, užtikrinti patikimą duomenų surinkimą, perdavimą ir saugojimą. Įgyvendinus tokius pokyčius bei sukūrus tinkamus paslaugų paketus, vartotojams taptų ekonomiškai naudinga gaminti elektros energiją ir jos perteklių parduoti į elektros skirstymo tinklą. Tokie vartotojai taptų aktyviais vartotojais (angl. Prosumers)



pav. 7 Išmaniojo elektros tinklo energijos perdavimo kryptis [12]

Norėdami apibrėžti aktyvių vartotojų reikšmę bei vaidmenį elektros energetikos sistemoje, pirmiausia, reikėtų išsiaiškinti ir išskirti tradicinius elektros energijos dalyvius. Tradicinėje elektros energetikos sistemoje gali būti dviejų rūšių dalyviai (neįskaitant perdavimo ir skirstymo tinklų), kaip pavaizduota paveiksle 8-ajame paveiksle [7].



pav. 8 Tradicinės elektros energetikos sistemos dalyviai

Aukščiau pateiktame paveiksle matomas aiškus vaizdas, kuris parodo, kad tradicinėje elektros energetikos sistemoje vartotojai ir gamintojai yra atskirti (dalyviai gali būti priskiriami tik vienai iš kategorijų). Tačiau tobulėjančios ir ekonomiškai naudingos nedidelio galingumo atsinaujinančios energetikos sistemos, pigūs, efektyvūs ir ekonomiškai apsimokantys energijos kaupikliai bei vartotojo galimybė greitai reaguoti į elektros kainos pokyčius (angl. *Demand response*) suteikia vartotojui galimybę gaminti ir kaupti elektros energiją. Šis naujos kartos vartotojo apibrėžimas, kaip aktyvus vartotojas (angl. *Prosumer*), yra ekonomiškai motyvuotas, kuris gali atlikti šias funkcijas [3]:

1. Vartoti, gaminti ir kaupti elektros energiją;
2. Valdyti savo mažą arba vidutinio dydžio elektros sistemą ir perduoti elektros energiją (parduoti perteklinę elektros energiją energijos tiekimo operatoriui);
3. Vartodamas elektros energiją taiko ekonominio optimizavimo principus:
  - a. seka rinkos kainą;
  - b. priima sprendimus, kada kaupti elektros energiją;
  - c. kada parduoti energijos tiekimo operatoriui;
  - d. kada vartoti iš savo paskirstytos generacijos šaltinių;
  - e. kada iš tinklo.
4. Padeda optimizuoti elektros energijos tinklo maksimalius apkrovimus.

Tam, kad aktyvus vartotojas galėtų įgyvendinti visas anksčiau minėtas funkcijas, jis turi turėti fizinių elementų kombinaciją, kuri gali susidėti iš žemiau išvardintų komponentų (kiekvienam aktyviam vartotojui ši kombinacija gali būti skirtinga, ji priklauso nuo aktyvaus vartotojo) [3]:

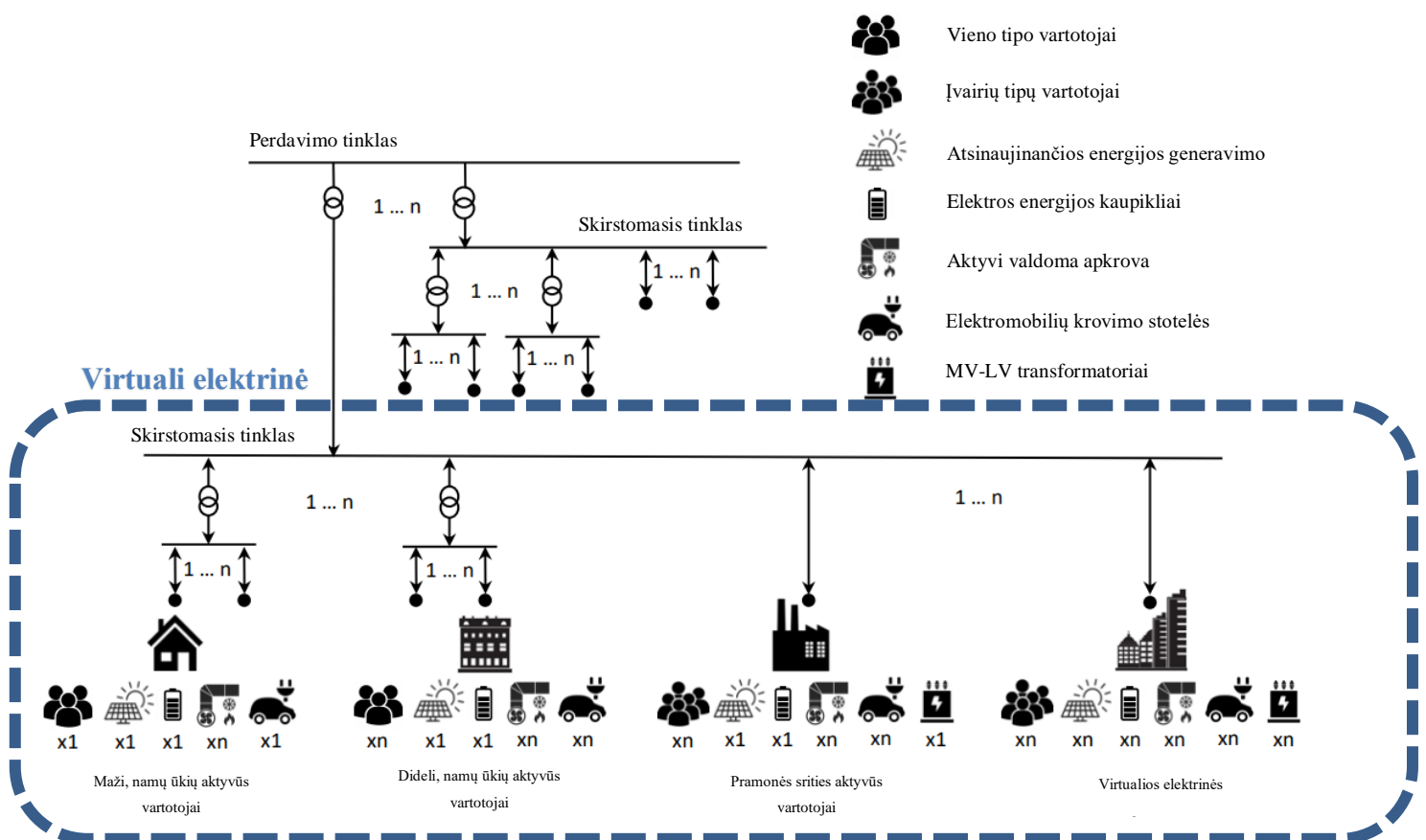
- Energijos generavimo šaltiniai (vėjo, saulės elektrinės ir kiti paskirstytos generacijos šaltiniai);

- Elektros energijos apkrovos;
- Energijos kaupiklio;
- Valdymo sistema (skirta energijos šaltiniams valdyti ir ekonominiams sprendimams priimti).

Šie aktyvaus vartotojo komponentai teoriniu požiūriu yra artimi virtualios elektrinės koncepcijai, aptartai pirmajame skyriuje. Kaip ir virtuali elektrinė, aktyvūs vartotojai gali turėti elektros energijos generavimo šaltinius, valdymo sistemą, energijos kaupiklius ir valdomą apkrovą. Esminis skirtumas yra tarp šių komponentų dydžio ir įtakos elektros energijos skirstomajam tinklui.

Aktyvių vartotojų apibrėžiamai ir jų teorija taikoma mažo arba vidutinio galingumo subjektui (namų ūkis, gamykla), tuo tarpu, virtuali elektrinė yra didelio galingumo subjektas, sugebantis į elektros rinką pateikti nuolatinį (pastovų) energijos kiekį, kai aktyvūs vartotojai gali dalyvauti tik valandinėje elektros energijos prekybos rinkoje ir jie naudingi tinklui, kaip papildomos generacijos šaltiniai elektros rinkos balansavimui.[15]

Atliekant detalesnę virtualios elektrinės ir aktyvių vartotojų sąryšį bei priklausomumą vienas nuo kito į virtualią elektrinę galime žiūrėti, kaip į atskirų aktyvių vartotojų sujungimą į vieną bendrą sistemą [3]. Ši sistema pavaizduota 9-ajame paveiksle.

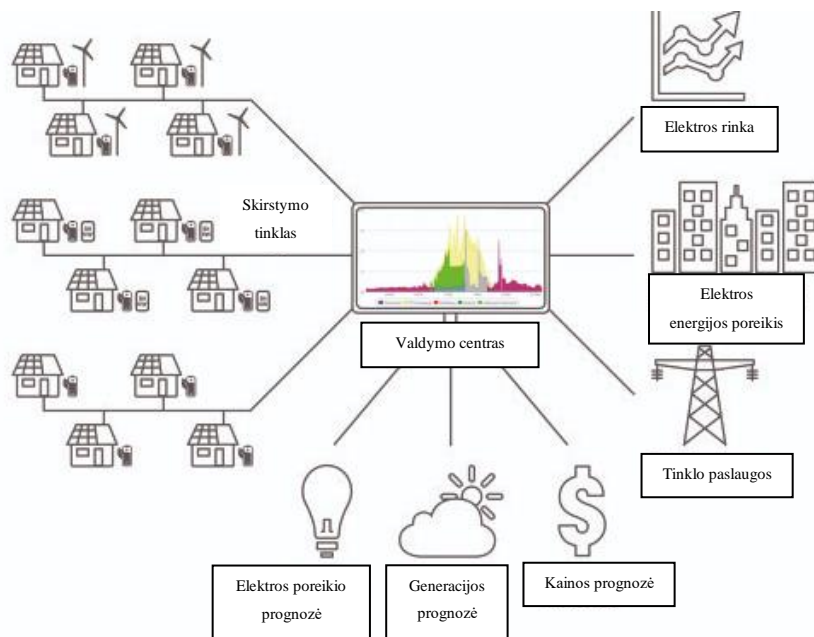


pav. 9 Virtualios elektrinės ir aktyvių vartotojų sąryšis [26]



Aukščiau pateiktame (9-ajame) paveiksle pavaizduotas vienas iš galimų virtualios elektrinės ir aktyvių vartotojų skirstymo metodų. Tačiau įvairūs šaltiniai šį skirstymą žymi ir traktuoja skirtingai, čia matomoje iliustracijoje yra aiškiai parodyta, kad virtuali elektrinė susideda iš daug skirtingų aktyvių vartotojų. Yra modelių, kuriuose aktyvus vartotojas nėra atskirai išskiriamas, o tik išskiriami valdomi, apkrovą įtakojantys prietaisai [10] (1.3.1 skyriuje pateiktas virtualios elektrinės detalizavimas). Aiškūs skirstymo kriterijai bei aiškus modelis šioje vietoje vis dar diskutuojamas ir ieškoma bendro, visiems priimtino, koncepcinio modelio.

Aukščiau pateiktoje virtualios elektrinės su aktyviais vartotojais koncepcijoje yra nurodyta tik fizinis elektros energijos tinklas (elektros energijos linijos), skirtas elektrinei galiai perduoti (tokiame tinkle energijos srautai yra dvikrypčiai), tačiau nepateikta duomenų surinkimo ir valdymo principo, tad šis principas pavaizduotas 10-ajame paveikslėlyje, kur kiekvienas elementas prijungtas prie virtualios elektrinės, (nors yra aktyvaus vartotojo nuosavybė) siunčia duomenis valdymo centrui, kuris bendru mastu priima sprendimus, kaip tinkamai valdyti sistemą, priima ekonomiškai efektyvius ir naudingus sprendimus [9]. Energijos valdymo sistema taip pat sudarinėja energijos vartojimo ir prognozavimo sistemas, bei dalyvauja elektros rinkoje prognozuodama elektros kainą.



pav. 10 Duomenų surinkimas ir valdymas virtualioje elektrinėje su aktyviais vartotojais [9]

Analizuojant virtualią elektrinę iš duomenų valdymo perspektyvos nesunku suprasti, kad ribą tarp aktyvaus vartotojo ir virtualios elektrinės yra labai sunku apibrėžti. Yra atvejų, kada aktyvus vartotojas gali turėti savo struktūroje visą virtualią elektrinę. Toks atvejis įmanomas, kada didelės galios vartotojas (tarkime pramoninė gamykla) nusprendžia įsidiegti didelės galios elektros kaupiklius, valdymo sistemą bei paskirstytas generacijos šaltinių. Tokiu atveju, šis aktyvus vartotojas tampa visa atskira virtualia

elektrine su savo valdymo sistema (priimančia sprendimus kaip valdyti energijos šaltinius), galimybę valdyti savo apkrovą bei dalyvauti elektros prekybos rinkoje.

Aktyvių vartotojų kūrimas, tinklo ir paslaugų pritaikymas šių vartotojų atsiradimui yra vienas pagrindinių uždavinių, keičiant elektros energetikos struktūrą. Kartu įgalinant naujus vartotojus plėtoti virtualias elektrines, padėsiančias perskirstyti elektros energijos gamybą bei užtikrinti tinklo stabilumą nelaimių atveju. Norint įgyvendinti šiuos uždavinius reikia atnaujinti ne tik fizinį tinklą, apskaitos sistemas, tinklo apsaugas, bet taip pat sukurti duomenų valdymo sistemą, kuri saugiai ir patikimai valdytų vartotojų duomenis užtikrintų efektyvų tarpusisteminių komunikavimą.

#### **1.4. Energijos kaupikliai**

Elektros energijos kaupiklių poreikis energetikos sistemoje pradėjo ryškėti XX amžiuje (ypatingai jo pabaigoje). XXI amžiaus pradžioje elektros energijos kaupikliai tapo neatsiejama elektros tinklo dalimi ir jų poreikis vis labiau augo. Pradžioje šie kaupikliai naudoti kritiniuose taškuose ir vietovėse kartu su dyzeliniais generatoriais užtikrinant nenutrūkstamą energijos tiekimą. Vėliau tobulėjant sistemoms ir technologijoms pasaulyje pradėti kurti didelės galios įvairūs energijos kaupikliai: hidroakumuliacinės elektrinės, smagratiniai kaupuliai, suspausto oro kaupikliai, rūgštinės ir Ličio jonų baterijos ir t.t.[27]

Šiuo metu dėl besivystančios elektromobilių pramonės, namų ūkio vartotojų noro ir lūkesčių turėti nedidelės galios kaupiklius galingą proveržį patiria įvairių tipų elektros baterijos. Tačiau šie kaupikliai negarantuoja didelės galios galimybių. Tad lygiagrečiai su šiomis technologijomis yra sparčiai vystomi ir didelės galios kaupikliai, hidroakumuliacinės elektrinės ir pan. [28]

Didelis poreikis įkraunamų akumuliatorių srityje priverstė labai greitai gerėti šios technologijos ekonominius rodiklius. Baterijos tampa pigesnės ir efektyvesnės. Šios technologijos kainos mažėjimą taip pat įtakoja ir didelis gamybos mastas (masto ekonomika).

Energijos kaupiklių bumą smarkiai įtakojo atsinaujinančios energijos poreikio augimas, taip pat besivystantys mikrotinklai, virtualios elektrinės, o ypač prie to prisideda transporto priemonių elektrifikavimas ir jo mastai (Teslos elektromobiliai ir pan.).

Energijos kaupiklių priemonių, kaip minėta anksčiau, galima aptikti įvairių, pagrindinės priemonės ir jų svarbiausi rodikliai pateikiami apibendrintoje lentelėje Nr.1.

Šioje lentelėje pateikti įvairūs kaupikliai ir jų palyginimas bei detalizavimas, kokiam tikslui jie naudojami. Pagrindinį dėmesį reikėtų atkreipti į vidutinės trukmės išsikrovimo energijos kaupiklius. Šie energijos kaupikliai plačiai naudojami virtualiose elektrinėse ir mikrotinkluose. Atidžiau panagrinėję čia pateiktus 3 baterijų tipus matome, kad patraukliausiai atrodo baterijos (rūgštinio švino, NiCd, NiMH, GST ir t.t.). [29]

Šios baterijos patrauklios energetikos sistemai tuo, jog yra santykinai pigios, turi didelį ciklų skaičių, gali pasiekti aukštą efektyvumo lygį bei sistemą galima išplėsti iki didelio galingumo.

Norint detaliau identifikuoti baterijų tinkamumą virtualioms elektrinėms, jų rodiklius panagrinėsime atskirai.

lentelė 1. Energijos kaupiklio technologijos ir pagrindinės jų charakteristikos

Tipas	Galia	Energijos talpa	Iškrovimo trukmė	Ciklo efektyvumas	Gyvavimo trukmė	Kaina pagal galią	Kaina pagal energijos talpą	Energijos kaupiklio taikymo sritis
	MW	MWh	h, s	%	metai, ciklai	€/W	€/kWh	
<b>Ilgos iškvos trukmės energijos kaupyklos</b>								
Hidroakumuliacinės elektrinės	100–4000	500 – 15000	4–12 h	70–80	40 m.	0,4–1,2	35–70	Elektros energijos tiekimo valdymas, perdavimo tinklo rezervavimas, AEI parkų rezervavimas ir stabilizavimas
Suspausto oro energijos kaupikliai	25– 3000	200 – 10000	1–20 h	75	30 m	0,4–0,7	10–70	
Gravitacinės energijos kaupikliai	100–3000	200 – 10000	1–30 h	86	50 m	0,2–0,7	20–40	
<b>Vidutinės iškvos trukmės energijos kaupyklos</b>								
Rūgštinės švino, NiCd, NiMH, GST Zn-oro, Li-jonų baterijos	0,01–5	1–100	1–8 h	50–90	10 <sup>4</sup> –10 <sup>5</sup> ciklų	~ 1	70–400	Elektros energijos rezervavimas, balansavimas skirstomajame tinkle, apkrovų išlyginimas, AEI rezervavimas
Srautinės energijos baterijos	0,05–10	1–100	10 h	70–80	10 000 ciklų	1,2–1,5	250	
Vandeniliniai kaupikliai	1–10	-	5 h	30–40	10 000 h	1–1,5	15–50	
<b>Trumpos iškvos trukmės kaupikliai</b>								
Smagratiniai energijos kaupikliai	0,5–1	0,1–1	300 s	90	10 <sup>6</sup> ciklų	1–1,5	240	Elektros energijos stabilumui užtikrinti
Superlaidininkų magnetinės energijos kaupikliai	0,01–400	0,01–20	60–1800 s	95	10 <sup>6</sup> ciklų	0,5–1,6	800–8000	
NaS baterijos	1	1	1h	-	-	~ 3	400	
Superkondensatoriai	0,25	0,01	60 s	90–98	10 <sup>6</sup> ciklų	0,07–4	2000–4800	

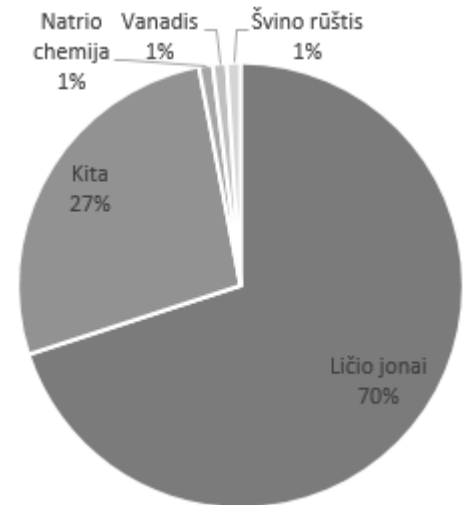
## 1.5. Elektros energijos kaupikliai – baterijos

### 1.5.1. Baterijų tipai

Šiuo metu technologijos sparčiai tobulėja ir atrandama naujesnių, efektyvesnių medžiagų, kurios nulemia sparčių energijos kaupiklių vystymosi eigą. Tačiau pagrindiniai baterijų tipai pramonėje lieka tie patys. Dėl efektyvesnių technologijų laikui bėgant lyderio vaidmenis perima naujesnės ir efektyvesnės baterijos. Trumpai apžvelgsime ir palyginsime skirtingus baterijų tipus.

**Ličio jonų akumulatorius.** Šių akumuliatorių rūšį naudoja dauguma naujausių, privačiai naudojamų energijos kaupimo technologijų. Ličio jonų akumulatoriai, lyginant juos su švino-rūgšties, yra kompaktiškesni, jų didesnis įkrovimo ir iškrovimo efektyvumas, jie ilgaamžiškesni, dėl sudėtingesnės valdymo sistemos yra brangesni. Šie akumulatoriai yra lengvesni nei švino-rūgšties, tad juos galima lengviau įdiegti ar pakeisti, jie gali būti montuojami ant sienos, įrengiami patalpose ar lauke. Šio tipo akumulatoriai gali naudoti organines arba neorganines medžiagas, esminis skirtumas – organiniai tipo akumulatoriai neturi toksiškų medžiagų, o neorganiniai turi, tad jais daug sunkiau naudotis ir reikia tinkamai organizuoti jų perdirbimą.

4.2 pav. galima matyti ličio jonų akumulatoriaus cheminę sandarą, iš kokių medžiagų jis yra sudarytas. [19]



4.2 pav. Ličio jonų akumulatoriaus sandara

**Švino – rūgštinis akumulatorius.** Šie akumulatoriai, lyginant su kitomis rūšimis, turi trumpenę gyvavimo trukmę, dėl konstrukcijos ypatybių jie reikalauja nuolatinės techninės priežiūros, jų mažesnis išsikrovimo lygis, o kaina namų energijos saugojimo sektoriuje šiuo metu yra viena prieinamiausių rinkoje. Individualių namų savininkams, norintiems tapti energetiškai nepriklausomiems reikia įdiegti didelę energijos saugojimo sistemą, kurią sudarytų daug akumuliatorių, šiuo atveju šios rūšies akumulatoriai būtų geras pasirinkimas ir nereikalautų didelių investicijų. Švino-rūgšties akumulatoriai yra toksiški, tad labai svarbu juos tinkamai perdirbti. [19]

**Srovės akumulatoriai.** Įprastiniuose šio tipo akumulatoriuose naudojami du elektrolito skysčiai: vienas neigiamai įkrautas katodas, kitas – teigiamai įkrautas anodas. Srovės akumulatoriai nereikalauja intensyvios priežiūros, o norint prailginti saugojimo laiką reikia prie sistemos pridėti daugiau baterijų arba jas papildyti didesniu kiekiu elektrolito. Šie akumulatoriai yra lengvai perdirbami ir klientui neprireikia investuoti didelių pajamų. [17]

**Nikelio-kadmio akumulatoriai.** Šių akumuliatorių valdymo sistema yra paprasta ir užtikrinanti ilgą tarnavimo laiką. Lyginant su kitomis technologijomis šie akumulatoriai nėra brangūs. Kadangi kadmio yra pavojinga medžiaga, akumulatoriai turi būti perdirbami ir prieš juos išmetant reikia pašalinti juose esančias toksiškas medžiagas. [17]

### 1.5.2. Baterijų integracija

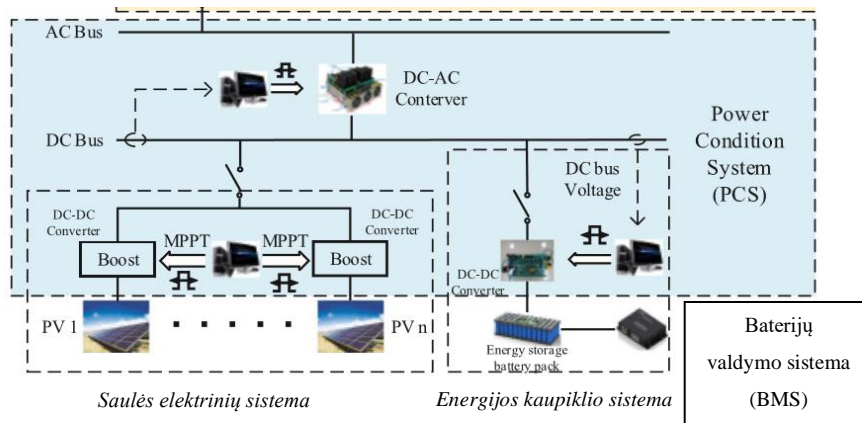
Norint tinkamai eksploatuoti baterijas ir jas pajungti į tinklą, galima naudoti vieną iš dviejų topologijų. Pirmoji topologija remiasi vieno etapo AC-DC konverteriu. Antroji topologija pagrįsta dviejų etapų AC-DC ir DC-DC elektros energijos keitikliais, ši topologija pranašesnė, nes turi didesnes lankstumo galimybes, taip pat jos įkrovimo ir iškrovimo valdymas yra patikimesnis ir tikslesnis.

Baterijų energijos kaupiklius sudaro:

- a) Baterijų blokas - modulinio dizaino (kurį lengva instaliuoti ir išplėsti);
- b) Baterijų valdymo sistemos – stebi baterijų parametrus, apskaičiuoja tikslią baterijų talpą ir valdo baterijų blokus;
- c) Galios keitiklių sistema – atsakinga už energijos keitimą iš nuolatinės srovės į kintamą srovę;
- d) Energijos valdymo sistemos – atsakingos už efektyvų energijos kaupiklių panaudojimą.

Norint užtikrinti sklandų energijos kaupiklio darbą, baterijų valdymo sistema nuolatos turi tikrinti kiekvienos atskiros baterijos celės įtampą ir srovę įkrovimo ir iškrovimo metu. Tokie veiksmai atliekami, norint užtikrinti baterijų ilgaamžiškumą ir efektyvų veikimą.

Baterijų valdymo sistema ne tik atlieka baterijų celių matavimą ir darbo režimo parinkimą, bet taip pat ir saugo baterijas nuo perkrovimo, nuo įtampos svyravimų, nuo per didelės srovės, trumpųjų jungimų ir aukštos temperatūros.



pav. 11 Energijos kaupiklio prijungimo schema prie elektros energijos tinklo [8]

## 2. TYRIMO DALIS

Šioje darbo dalyje tiriama virtuali elektrinė ir jos pelno optimizavimo uždavinys, bei kiekvieno elektros energijos šaltinio darbo režimas maksimalaus pelno atveju. Pirmoji tyrimo dalis nustatys elektros energijos kainos įtaką pelnui, tyrimas atliekamas vasaros ir žiemos periodui (dėl skirtingų saulės elektrinės generavimo parametrų). Antroje tyrimo dalyje bus analizuojama elektros energijos generavimo šaltinių techninės charakteristikos ir jų įtaka pelnui. Trečioje tyrimo dalyje atliekamas elektros energijos šaltinių darbų režimų nustatymas maksimalaus pelno scenarijui.

Tyrimo rezultatams pasiekti, pasitelkiant GAMS programinę įrangą, bus sukuriama logaritmas, skirtas išspręsti optimizavimo uždavinį (pelno maksimizavimo). Taip pat pasitelkiama PVWatts internetinė skaičiuoklė, skirta įvertinti saulės elektrinės generuojamą galią skirtingais metų laikotarpiais Lietuvos teritorijoje.

Tyrimo metu elektros energijos kainas įvertinsime remdamiesi elektros rinkos praeities duomenimis (NordPool elektros rinkos kainos).

### 2.1. Tyrimo objektas

Tiriamasis objektas, kuriam taikysime pelno optimizavimo funkciją, yra virtuali elektrinė, kurios elementai ir jų charakteristikos išvardintos žemiau. Tai yra teorinis virtualios elektrinės modelis, todėl tyrimo metu, norint tinkamai ištirti pelno optimizavimą, bus testuojami visų elementų parametrai ir ieškomas optimaliausias variantas.

Virtualios elektrinės elementai:

a) Dujų turbinos:



pav. 12 Dujų turbina AE-T100NG [17]

lentelė 2. Dujų turbinos AE-T100NG parametrai


Parametras	Parametro reikšmė
Modelis	AE-T100NG
Galingumas	100 kW (generuojamas elektros energijos kiekis)

Parametras	Parametro reikšmė
Efektyvumas	30%
Įdiegimo sąlygos	Montuojama viduje/lauke – temperatūra (-10 ÷ +40) °C
Dydis (WxHxL)	900 x 1900 / 3300* x 2770 mm (P)
Svoris	2250 / 2750* kg (P) - 2770 / 3100* kg (CHP)
Kuro tipas	Gamtinės dujos (metanas)

b) Saulės elektrinės

Prenkamos elektrinės galia 350 kW. Elektrinė sudaryta iš Amorfinių modulių.

lentelė 3. Saulės modulių charakteristikos

Modulių charakteristikos	
Tipas	Amorfiniai
Maksimali galia (Wp)	200
Maksimalios galios įtampa (V)	75,00
Maksimalios galios srovė (A)	2,66
Atviros grandinės įtampa (V)	101,00
Trumpojo jungimo srovė (A)	3,30
Efektyvumas (%)	8-11
Maksimali sistemos įtampa (V)	1000
Standartinės testavimo sąlygos	1000 W/m <sup>2</sup> , AM1.5, 25 °C
Saulės modulio vizualus pateikimas	

c) Dizelinio generatoriaus (charakteristika)

lentelė 4. Dizelinio generatoriaus parametrai

Galia, kW	150
Efektyvumas, %	80
Variklio greitis, RPM	1800
Fazių skaičius	3



pav. 13 150 kW dyzelinis generatorius

d) Energijos kaupiklio

lentelė 5. Energijos kaupiklio parametrai

Parametras	Parametro reikšmė
Baterijų tipas	Li-ion
Galia, kW	160
AC įtampa	3 fazės, 3 linijos 202 V
DC įtampa	0~600 V
Efektyvumas	90 %
Minimalus iškrovimo lygis, kW	20

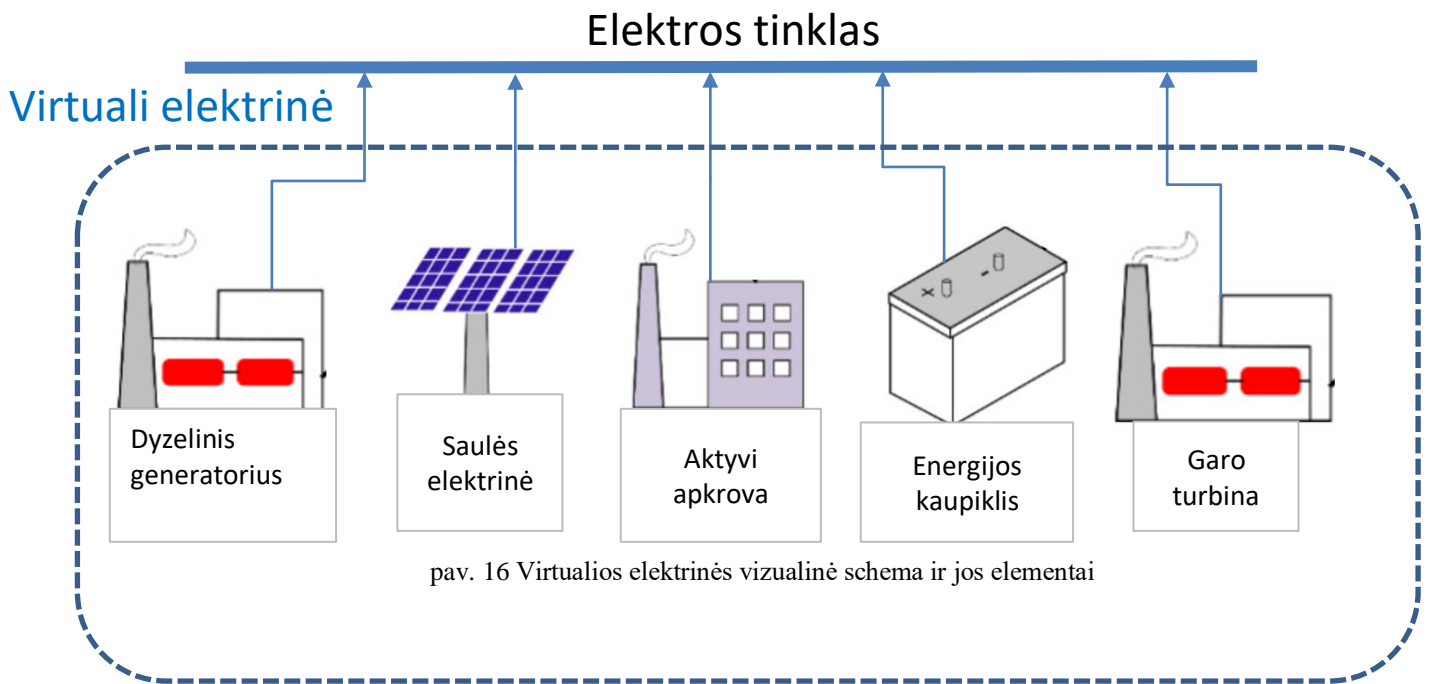


pav. 14 160 kW Li-ion baterija

e) Aktyvi apkrova (*angl. active load*)

Tyrimo objektui pasirenkame, kad aktyvi apkrova atitinka Kauno technologijos universiteto, vieno iš pastatų (skaičiavimo centro) vartojamai galiai. Kadangi kiti aktyvios apkrovos parametrai nėra apibrėžti praktikoje, juos pasirenkame pagal literatūroje rastus aprašymus ir tyrimo rezultatus. Minimali apkrova 150 kW, maksimali 380 kW.





pav. 16 Virtualios elektrinės vizualinė schema ir jos elementai

pav. 16 Virtualios elektrinės modelis ir jos elementai

Tyrimo objektui su jo generavimo ir apkrovos šaltiniais bus taikomas GAMS optimizavimo algoritmas, tiriantis metodinėje dalyje aprašytas priklausomybes ir įtakas.

### 2.1.1. GAMS aplinkos modelis

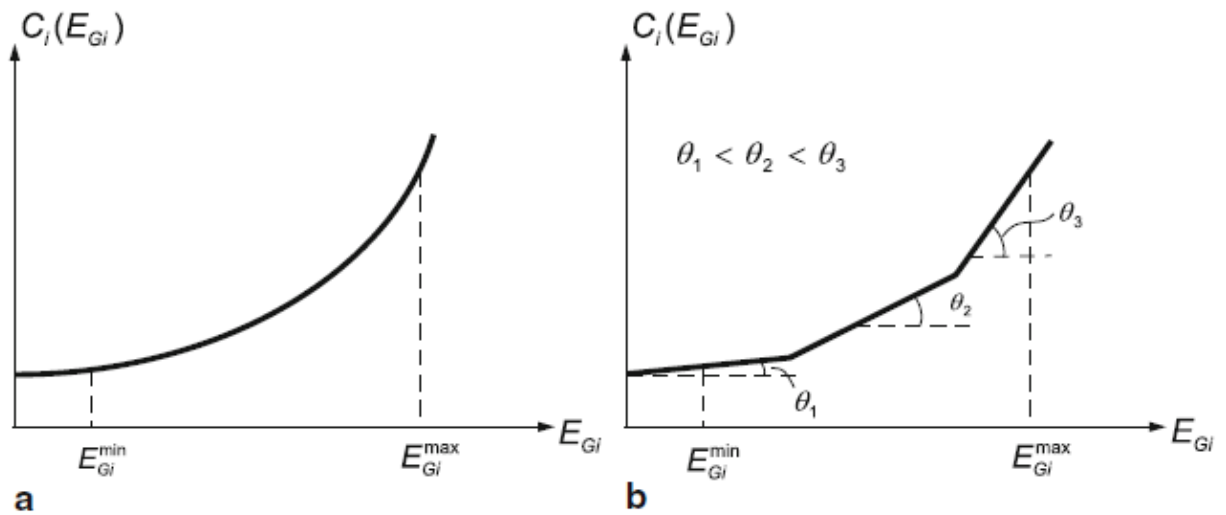
GAMS programinės įrangos pagalba sprendžiamas optimizavimo uždavinys, taikant tiesinį lygčių sprendimą.

Kiekvienas kintamasis aprašomas ir apibrėžiamas skirtingais parametrais, norint teisingai išspręsti optimizavimo uždavinį. Panagrinėsime kiekvieno elemento apibrėžimą ir matematinę dalį taikomame algoritme.

### 2.1.2. Dujų turbinos matematinis modelis GAMS programoje

Kiekviena dujų turbina naudojama virtualioje elektrinėje, kuriai taikomas matematinis modelis, apibrėžiama kainos funkcijos  $C_i(E_{Gi})$  (gaminamos elektros energijos kainos (savikainos)), kuri pateikia kainą  $C_i$  (eurais) už tam tikrą generuojamą elektros energijos kiekį  $E_{Gi}$  (MWh). Ši funkcija gaunama padauginus šilumos koeficiento kreivę ( *angl. Heat rate curve* ), kuri nurodo reikiamą kuro kiekį, norint pagaminti  $E_{Gi}$ , iš sunaudoto kuro kainos.

Dujų turbinos kainos funkcija dažniausiai būna dviejų tipų: a) kvadratinės lygties funkcija; b) tiesinės lygties funkcija, taip kaip pavaizduota 17-ame paveiksle.



pav. 17 Dujų turbinos lygties funkcijos: a) kvadratinė lygties funkcija  $C_i(E_{Gi})$ ; b) tiesinė lygties funkcija  $C_i(E_{Gi})$  [31]

Kitas svarbus parametras, aprašantis dujų turbinas, yra jos būsenos – naudojamas dvejetainis parametras  $v$ , kuris turi dvi opcijas: išjungta turbina ( $v = 0$ ), įjungta turbina ( $v = 1$ ).

Be kainos funkcijos ir dujų turbinos būsenos svarbus parametras, aprašant dujų turbiną GAMS programoje, yra elektros energijos generacijos kitimo greitis (*angl. Ramp rate*). Šis dydis apibrėžia dujų turbinos gebėjimą padidinti generuojamą elektros energiją tarp dviejų laiko intervalų  $t_1$  ir  $t_2$  (pvz. 2 MW/h).

Likę parametrai naudojami apibrėžti dujų turbiną pateikti 6-oje lentelėje:

lentelė 6. Dujų turbinos parametrai naudojami GAMS modelyje

Scalar - parametų tipas		
Parametras	Parametro reikšmė	Parametro dydis
PGmax	Dujų turbinos galingumas	0,100 MW
PGmin	'Minimali dujų turbinos generuojama galia'	0,03 MW
PGramp	Elektros energijos generacijos kitimo greitis	0.02 MW
PG0	'Dujų turbinos generacija laiko momentu $t_0$ '	0.05 MW
V0	'Dujų turbinos būsenos laiko momentu $t=0$ '	1
aG	'Kvadratinės kainos funkcijos lygties koeficientas'	6
bG	'Tiesinės kainos funkcijos lygties koeficientas'	7
cG	'No-load kaštai'	5
SU	'Start-up kaštai'	7

Šie skaliariniai kintamieji naudojami tolimesniuose optimizavimo skaičiavimuose. Norint tiksliai suskaičiuoti optimizavimo lygtį reikalingi išvestiniai skaičiavimai ir dydžiai. Šių parametų skaičiavimas atliekamas kodo dalyje „skaičiavimai“ (*angl. Equations*) bei yra aprašomi visi reikiami

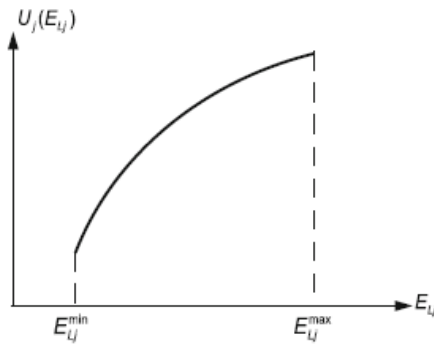
papildomi dydžiai ir apribojimai, dauguma jų skaičiuojama, vertinant du parametrus:  $t$  – laiko intervalai ( $t1-t24$ ) ir  $w$ - tikimybės galimybė (mūsų atveju naudojama tik viena tikimybė  $w1$ ), o išvestiniai dydžiai ir apribojimai gaunami kiekvienam laiko intervalui, esant skirtingoms tikimybėms.

lentelė 7. Skaičiavimai ir apribojimai naudojami apibrėžti dujų turbiną GAMS modelyje

Equations - išvestinių dydžių ir apribojimų skaičiavimas	
Skaičiavimo formulė	Skaičiavimo reikšmė
$GLup(t,w)..PG(t,w)=l=PGmax * v(t,w)$	'Dujų turbinos galingumas'
$GLlo(t,w)..PG(t,w)=g=PGmin * v(t,w)$	'Minimali dujų turbinos generuojama galia'
$SUC0(w)..CSU('t1',w)=g=SU*(v('t1',w)-V0);$	Start-up kaštai apribojimas laiko momentu ( $t = 1$ )'
$SUC(t,w)\$(ord(t) GT 1).. CSU(t,w)=g=SU*(v(t,w)-v(t-1,w));$	Start-up cost apribojimas'
$GRL0up(w)..PG('t1',w)-PG0=l=PGramp;$	Elektros energijos generacijos kitimo greitis laiko momentu $t = 1$ , didėjimas'
$GRLup(t,w)\$(ord(t) GT 1)..PG(t,w)-PG(t-1,w)=l=PGramp;$	Elektros energijos generacijos kitimo greitis, didėjimas'
$GRL0dn(w)..PG0-PG('t1',w)=l=PGramp;$	Elektros energijos generacijos kitimo greitis laiko momentu $t = 1$ , mažėjimas'
$GRLdn(t,w)\$(ord(t)GT 1)..PG(t-1,w)-PG(t,w)=l=PGramp;$	Elektros energijos generacijos kitimo greitis, mažėjimas'
$GPE0(w).. (PG0 + PG('t1',w))/2=e=EG('t1',w);$	Dujų turbinos generuojamas elektros energijos ekvivalentas laiko momentu ( $t=1$ )'
$GPE(t,w)\$(ord(t)GT 1)..(PG(t-1,w) + PG(t,w))/2=e=EG(t,w);$	Dujų turbinos generuojamas elektros energijos ekvivalentas

### 2.1.3. Aktyvios apkrovos matematinis modelis GAMS programoje

Aktyvi elektros energijos apkrova, kaip jau buvo minėta anksčiau, turi galimybę reaguoti į rinkos kainą. Tai reiškia, kad vartotojas esant aukštai rinkos kainai gali minimizuoti savo elektros suvartojimą, arba jį padidinti, kada rinkos kaina žema. Kiekviena aktyvi apkrova virtualioje elektrinėje apibūdinama funkcija  $U_j(E_{Lj})$ , kuri nurodo vartotojo uždirbamą pelną (Eur) priklausomai nuo vartojamos elektros energijos kiekio ( $U_j$  – gaunamas pelnas,  $E_{Lj}$ - suvartota elektros vartotojo energija). Šios funkcijos tipinė kreivė pavaizduota 18-ajame paveikslėlyje,  $E_{Lj}^{min}$  – minimali vartotojo sutaupoma energija,  $E_{Lj}^{max}$  – maksimali vartotojo sutaupoma energija.



pav. 18 Aktyvios apkrovos kvadratinės lygties funkcija  $U_j(E_{Lj})$  [31]

Modeliuojant aktyvią apkrovą taip pat svarbu įvertinti jos kitimo spartą (*angl. Ramp rate*), taip pat kaip pirmos dujų turbinos modelyje šis dydis nusako, kaip sparčiai vartotojas gali keisti savo elektros energijos poreikį tarp dviejų laiko intervalų.

Visi dydžiai, kurie naudojami modeliuojant aktyvią apkrovą, pateikti 8-oje lentelėje, nurodant naudojamą sutrumpinimą, parametro reikšmę, bei parametro dydį.

lentelė 8. Aktyvios apkrovos parametrai naudojami GAMS modelyje

Scalar - parametų tipas		
Parametras	Parametro reikšmė	Parametro dydis
PLmax	Vartotojo maksimali suvartojama galia	0.38 MW
PLmin	Vartotojo minimali suvartojama galia	0.150 MW
PLramp	Suvartojamos galios kitimo greitis	0.040 MW
PL0	Vartotojo galios poreikis $t=0$ momentu	0.25 MW
MinCon	Bendras minimalus energijos suvartojimas	0.250 MWh
aL	Kvadratinės lygties koeficientas	-10
bL	Tiesinės lygties koeficientas	42
cL	Funkcijos konstanta	5

Šie skaliariniai dydžiai, kaip ir dujų turbinos atveju, naudojami apibrėžti tarpinius parametrus, apribojimus bei nustatyti kodo tikrinimo sąlygas (kurių neįvykdžius kodas nustoja skaičiuoti). Šie parametrai skaičiuojami taip pat vertinant du parametrus:  $t$  – laiko intervalai ( $t1-t24$ ) ir  $w$ - tikimybės galimybę. Visų išvestinių dydžių, apribojimų ir tikrinimo sąlygų formuluotės ir jų paaiškinimai pateikiami 9-oje lentelėje. Pagrindinis šių skaičiavimų tikslas ir paskirtis užtikrinti, kad funkcija  $U_j(E_{Lj})$  galiotų, keičiant įvairias sąlygas ir visada atitiktai jai keliamus reikalavimus.

lentelė 9. Skaičiavimai ir apribojimai naudojami apibrėžti aktyvią apkrovą GAMS modelyje

Equations - išvestinių dydžių, apribojimų ir tikrinimo sąlygų skaičiavimas	
Skaičiavimo formulė	Skaičiavimo reikšmė
$LRLup0(w)..PL('t1',w)-PL0=l=PLramp;$	Suvartojamas galios kitimo greičio apribojimas, laiko momentu t1, galiai didėjant
$LRLup(t,w)\$(ord(t)GT1)..PL(t,w)-PL(t-1,w)=l=PLramp;$	Suvartojamas galios kitimo greičio apribojimas, galiai didėjant
$LRLdn0(w)..PL0-PL('t1',w)=l=PLramp;$	Suvartojamas galios kitimo greičio apribojimas, laiko momentu t1, galiai mažėjant
$LRLdn(t,w)\$(ord(t)GT1)..PL(t-1,w)-PL(t,w)=l=PLramp;$	Suvartojamas galios kitimo greičio apribojimas, galiai mažėjant
$LPE0(w)..(PL0+PL('t1',w))/2=e=EL('t1',w);$	Suvartojamos galios ekvivalentas, laiko momentu t1
$LPE(t,w)\$(ord(t)GT1)..(PL(t-1,w)+PL(t,w))/2=e=EL(t,w);$	Suvartojamos galios ekvivalentas
$MEC(w)..sum(t,EL(t,w))=g=MinCon;$	Minimalus energijos suvartojimo kiekis

#### 2.1.4. Elektros energijos kaupiklio matematinis modelis GAMS programoje

Elektros energijos kaupiklio matematinis modelis yra pagrįstas būsenos keitimo lygtimi  $E_{sk}(t)$ , kuri apibūdina elektros energijos kiekį kaupiklyje kiekvienu laiko momentu t ir matematiškai išreiškiama, kaip įkraunamos arba iškraunamos energijos kiekio funkcija. Matematiškai funkciją  $E_{sk}(t)$  galime aprašyti taip:

$$E_{sk}(t) = E_{sk}(t - 1) + \frac{1}{\eta_k^c} P_{sk}^c(t)\tau - \frac{1}{\eta_k^d} P_{sk}^d(t)\tau$$

Šioje lygtyje  $P_{sk}^c(t)$  ir  $P_{sk}^d(t)$  kaupiklio įkrovimo ir iškrovimo galia, šie kintamieji abu yra teigiami ir atitinkamai apriboti  $P_{sk}^{cmax}$  - maksimalios iškrovimo galios ir  $P_{sk}^{dmax}$  - maksimalios įkrovimo galios, šie dydžiai apibrėžia, kaip greitai gali būti įkraunamas ir iškraunamas elektros energijos kaupiklis. Dydžiai  $\eta_k^c$  ir  $\eta_k^d$  atitinka kaupiklio įkrovimo ir iškrovimo efektyvumą, šie dydžiai turi atitikti sąlygą:  $\eta_k^c < 1$  ir  $\eta_k^d < 1$ . Kaupiklio elektros energijos kiekį laiko momentu (t-1) apibrėžia dydis -  $E_{sk}(t - 1)$ .

Elektros energijos talpa kaupiklyje yra apribota dviejų ribinių reikšmių, kurių kaupiklis negali viršyti  $E_{sk}^{min}$  ir viršyti  $E_{sk}^{max}$ , atitinkamai minimalios ir maksimalios kaupiklio talpos. Būsenos lygtis, aprašant elektros energijos kaupiklį, turi atitikti žemiau pateiktą apribojimą:

$$E_{sk}^{min} \leq E_{sk}(t) \leq E_{sk}^{max}$$

Parametrai, kurie naudojami aprašyti elektros energijos kaupiklį, modeliuojant jį programinėje aplinkoje GAMS, pateikti 10-oje lentelėje.

lentelė 10. Elektros energijos kaupiklio parametrai

<b>Scalar - parametų tipas</b>		
<b>Parametras</b>	<b>Parametro reikšmė</b>	<b>Parametro dydis</b>
ESmax	Maksimali kaupiklio talpa	0.16 MW
ESmin	Minimali kaupiklio talpa	0.15 MW
ES0	Energijos kiekis laiko momentu t=0	0.02 MW
PScmax	Maksimali įkrovimo galia	0.085 MW
PSdmax	Maksimali iškrovimo galia	0.14 MW
eff	Keitiklio efektyvumas	0.90

Šie parametrai taip pat, kaip ir ankstesnių elementų (aktyvios apkrovos, dujų turbinų) naudojami tarpiniams skaičiavimams bei apribojimų bei tikrinimo sąlygų identifikavimui, apibrėžimui.

Svarbus tarpinių reikšmių skaičiavimo aspektas yra tai, jog jei keisdami parametrus įvėlsime žmogiškąją klaidą (sukeisime vietomis minimalią ir maksimalią kaupiklio talpą), kodas identifikuos klaidą ir nurodys jos vietą bei identifikuos poreikį ištaisyti esamas reikšmes. Tokia GAMS programinės įrangos funkcija suteikia galimybę neatlikti nelogiškų ir klaidingų skaičiavimų, kurie galėtų iškreipti tyrimo rezultatus, tokia funkcija taikoma visiems skaičiavimams ir parametrams naudojamiems GAMS programinėje aplinkoje.

Elektros energijos kaupiklio pagrindinės ribinės sąlygos apibrėžiamos nustatčius tinkamus parametrus (su klaidinga įvesta seka neleidžiamas kodo vykdymas) 11-oje lentelėje, pateikiami tik 2 papildomi parametrai reikiami pilnam kaupiklio matematinio modelio sukūrimui:

lentelė 11. Elektros

<b>Equations - išvestinių dydžių, apribojimų ir tikrinimo sąlygų skaičiavimas</b>	
<b>Skaičiavimo formulė</b>	<b>Skaičiavimo reikšmė</b>
STE0(w)	Elektros energijos kaupiklio būsenos lygtis t0 momentu
STE(t,w)	Elektros energijos kaupiklio būsenos lygtis

### 2.1.5. Saulės elektrinės generuojamos galios prognozavimas ir apibrėžimas GAMS programoje

Saulės elektrinė programinėje įrangoje aprašoma jos generuojama galia (kW) skirtingais laiko momentais (t1...t24). Atliekant maksimalaus pelno optimizavimo uždavinį lygiagrečiai nesprenžiamo

saulės elektrinės generuojamos galios prognozavimo, o pasinaudojame jau sukurtomis programinėmis įrangomis. Šiuo atveju naudosisime internetinę skaičiuoklę „PVWatts Calculator“. Ši skaičiuoklė leidžia pasirinkti vietovę, kurioje norime prognozuoti saulės elektrinės generuojamą galią, taip pat nustatymuose galima parinkti saulės elektrinės parametrus: galią, montavimo tipą, sistemos efektyvumą ir t.t. Skaičiuoklės parametrų pasirinkimas yra pakankamas, kad užtikrinti tyrimo efektyvumą. Skaičiuoklė pagal užduotus parametrus ir parinktą vietą suprognozuoja elektrinės generavimą metų laikotarpyje ir suteikia galimybę išsirinkti kiekvienos dienos kiekvienos valandos generuojamą galią. Šios programos pagalba skaičiuosime elektrinės generuojamą galią dviem metų laikotarpiais:

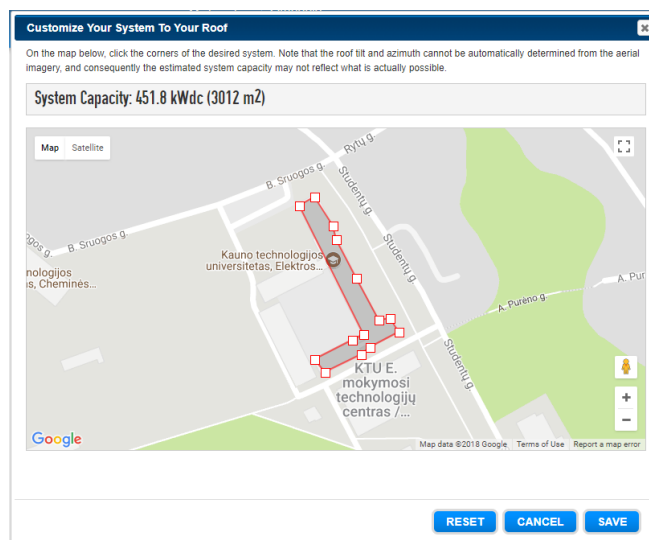
- a) vasaros (birželio 16 d.);
- b) žiemos (vasario 16 d.).

The screenshot displays the 'SYSTEM INFO' section of the PVWatts Calculator. It includes a 'SOLAR RESOURCE DATA' section on the left with a text input field containing '(INTL) KAUNAS, LITHUANIA' and a distance of '31 mi'. The main 'SYSTEM INFO' section contains several adjustable parameters:

- DC System Size (kW):** 450
- Module Type:** Standard
- Array Type:** Fixed (open rack)
- System Losses (%):** 14.08
- Tilt (deg):** 20
- Azimuth (deg):** 180

pav. 19 PVWatts skaičiuoklės duomenų įvedimas ir vietovės pasirinkimas [16]

Skaičiavimo programa taip pat suteikia galimybę norimoje vietoje parinkti saulės elektrinę, nurodant tikslią jos statymo vietą:



pav. 20 Saulės elektrinės vietos parinkimas PVWatts skaičiuoklėje [16]

Skaičiuoklės generuojami duomenys bus perkeltami į Microsoft Excel programinę įrangą, kur bus sukuriamas duomenų lentelė, nurodanti kiekvienu laiko momentu (t1...t24) generuojamą galią. Šios

lentelės pagalba GAMS programinė įranga atlieka automatinį duomenų priskyrimą. Tokiu būdu atliekant duomenų priskyrimą, tampa paprasčiau valdyti kodą ir keisti jo parametrus, taip pat galimas nereikalingo kodo keitimas programoje, kai užtenka pakeisti įvesties duomenis Microsoft Excel programoje.

### 2.1.6. Pelno maksimizavimo sprendimas

Norint optimaliai valdyti virtualią elektrinę ir pasiekti maksimalią naudą svarbu tinkamai valdyti kiekvieną jos šaltinį. Ypatingai didelis dėmesys turi būti skiriamas aktyvios apkrovos valdymui ir operavimui ja. Šioje vietoje vartotojas turi tinkamai įvertinti savo poreikius ir apibrėžti sau palankias aktyvios apkrovos valdymo sąlygas. Taip pat svarbu įvertinti kiekvieno elektros energijos generavimo šaltinio kaštus bei tinkamai įvertinti elektros pirkimo ir pardavimo momentus.

GAMS programinėje aplinkoje šiam tikslui pasitelkiame pelno optimizavimo sąlygą, kuri yra apribota anksčiau minėtų skaičiavimų. Pelno maksimizavimo matematinė išraiška:

$$\rho = \sum_{t=1}^T \left[ \lambda^D(t) P^D(t) \tau - \sum_{i \in I} [C_i(E_{Gi}(t)) + C_i^{SU}(t)] + \sum_{j \in J} U_j(E_{Lj}(t)) \right]$$

Šioje lygtyje:  $\rho$  - maksimalus pelnas;

$P^D$  - elektros energijos kiekis, kuris buvo parduotas arba nupirktas iš elektros rinkos;

$\lambda^D$  - elektros rinkos kaina;

$\tau$  - laiko periodo intervalas;

$\lambda^D(t) P^D(t) \tau$  - gautos pajamos/nuostolis už parduotą ar nupirktą elektros energiją;

$\sum_{i \in I} [C_i(E_{Gi}(t))]$  - dujų turbinos gamybos kaštai laiko periode  $t$ ;

$\sum_{i \in I} [C_i^{SU}(t)]$  - dujų turbinos paleidimo kaštai laiko periode  $t$ ;

$\sum_{j \in J} U_j(E_{Lj}(t))$  - pelnas, gautas iš elektros energijos paslaugos tiekėjo už aktyvios apkrovos valdymą;

$I$  - dujų turbinų skaičius virtualioje elektrinėje;

$J$  - aktyvių apkrovų skaičius virtualioje elektrinėje.

Šis matematinis modelis GAMS programinėje įrangoje aprašomas, kaip pelno funkcija  $\rho$  ir jos išraiška tokia:

$$\text{Obj. } \rho = \sum(t, \text{Price}(t) * PD(t)) + \sum(w, pi(w) * \sum(t, -aG * EG(t, w) * EG(t, w) - bG * EG(t, w) - cG * v(t, w) + aL * EL(t, w) * EL(t, w) + bL * EL(t, w) + cL - CSU(t, w) - Cdiesel * EGdiesel(t, w)));$$

Šios funkcijos pagalba GAMS programos algoritmas leidžia suskaičiuoti maksimalų gaunamą pelną. Šiai funkcijai gauti reikalingos elektros rinkos kainos (kintamasis  $\text{Price}(t,)$ ), kurios įvedamos Microsoft Excel prograuminiame pakete, o GAMS programoje automatiškai priskiriamos parametru  $\text{Price}$  kiekvienu laiko momentu (nuo  $t1$  iki  $t24$ ).



Taip pat algoritmo programoje galime matyti kiekvieno elektros energijos šaltinio būseną skirtingais laiko momentais ir tai mums suteikia galimybę identifikuoti, kaip turi kisti generavimo šaltinių darbo režimai, norint pasiekti maksimalų pelną.

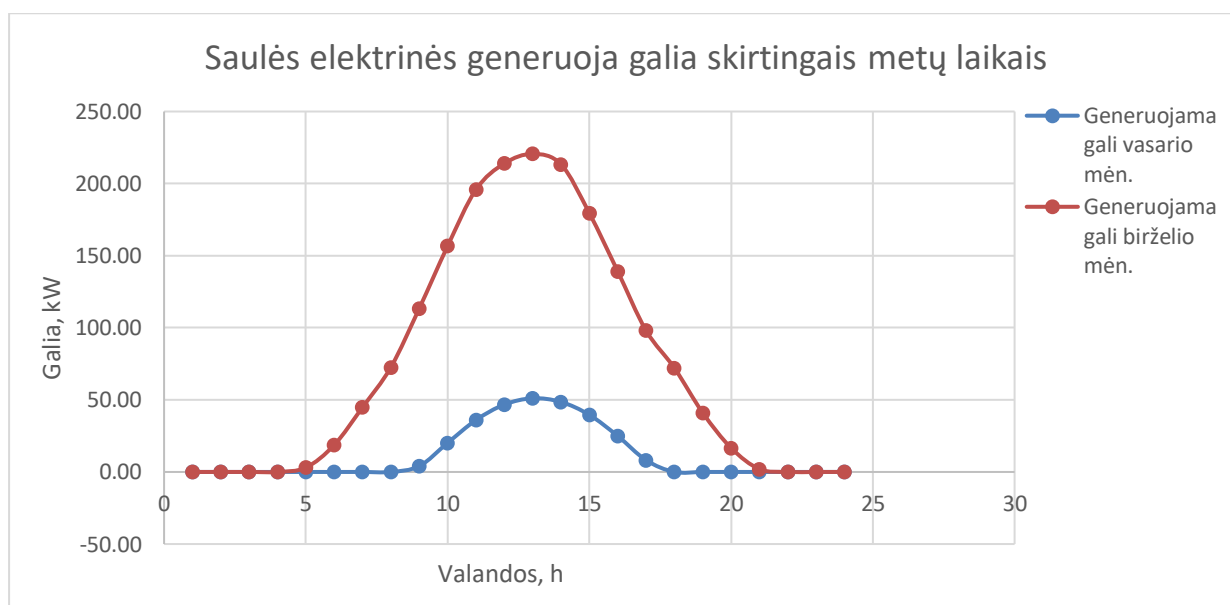
## 2.2. Tyrimo rezultatai

Tyrimo metu atliksime 4-ias analizes:

- elektros kainos kitimo įtaką pelnui;
- funkcijos  $U_j(E_{Lj})$  parametrų kitimo įtaką pelnui;
- aktyvios apkrovos diapazono kitimo įtaką pelnui;
- saulės elektrinės galios kitimo įtaką pelnui.

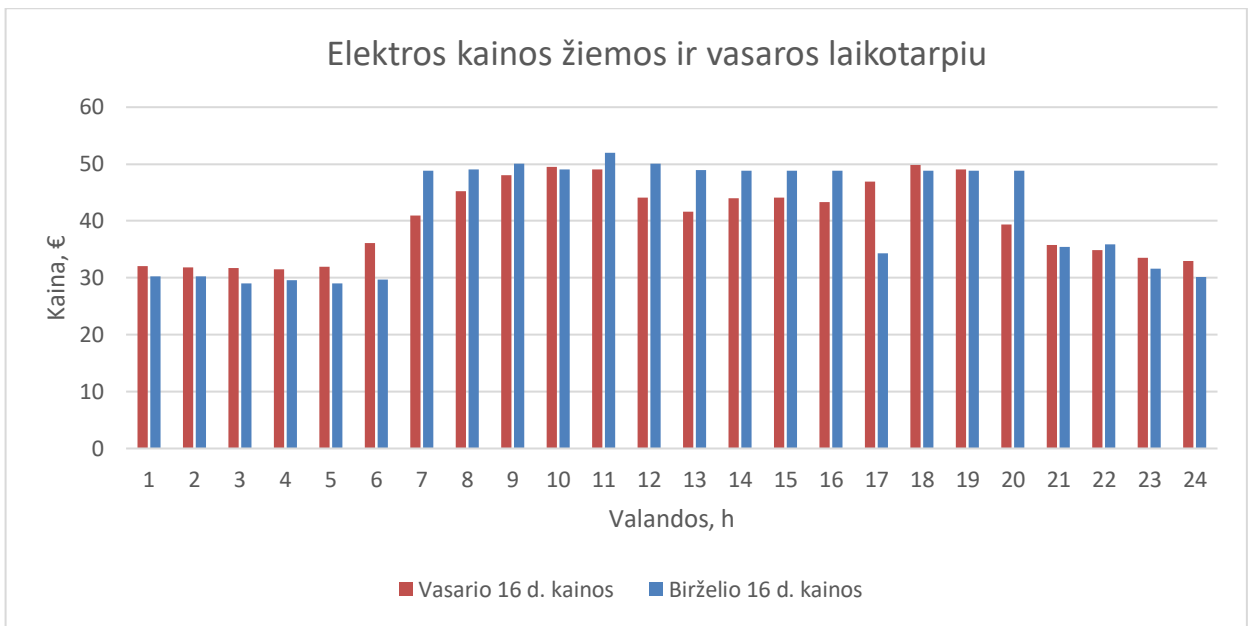
Prieš atlikdami tyrimą ir įvairių veiksnių įtaką pelnui išanalizuojame du metų laikus: vasarą (birželio 16 d.) ir žiemą (vasario 16 d.), nes skirtingais metų laikais skirsis saulės elektrinės generuojama galia ir elektros kaina rinkoje.

Saulės elektrinės, kurios galia 350 kW, elektros energijos generavimo grafikas skirtingais metų laikais pateiktas 21-ajame paveiksle, vienos paros bėgyje kiekvienai valandai .



pav. 21 Saulės elektrinės generuoja galia (kW) skirtingais metų laikais

Elektros energijos kainų palyginimas vasaros (birželio 16 d.) ir žiemos (vasario 16 d.) pateiktas 22-ajame paveiksle; kainos taip pat, kaip ir saulės elektrinės generuojama galia, atvaizduotos valandos intervalu. Šiame grafike matome, kad nors ir nedideliu skirtumu, tačiau pasirinktą vasaros dieną elektros kaina paros bėgyje yra 18,53 € didesnė.



pav. 22 Elektros kainos žiemos ir vasaros laikotarpiu

Atlikę saulės elektrinės generuojamos galios ir elektros kainų skirtumo analizę skirtingais metų laikotarpiais, matome, kad vasaros laikotarpio duomenys suteiks galimybę atlikti didesnę jų variaciją ir gauti aiškesnius analizės rezultatus. Tolimesnę analizę atliksime naudodami vasaros laikotarpio duomenis.

### 2.2.1. Elektros rinkos kainos kitimo įtaka pelnui

Norėdami atlikti elektros rinkos kainos kitimo įtaką pelnui tyrimą ir analizę, parenkame elektros kainos deviaciją  $\pm 50\%$ , o žingsnį  $10\%$ .

Pirmiausia atliekame elektros kainų didėjimo įtaką pelnui. Paros elektros kainų duomenis pradinio tyrimo momentu pažymėsime - P0 (ji atitinka 22-ojo paveikslo duomenis birželio 16 d., taip pat pateikti 10-oje lentelėje). Duomenų masyvai P1-P5, kaip anksčiau minėta, atitinka didėjančias elektros kainas,  $10\%$  žingsniu (10-a lentelė). Šie duomenys leis įvertinti, kaip kinta pelnas, ir kas labiausiai įtakoja pelno pokytį, didėjant arba mažėjant elektros kainai.

lentelė 12. Paros elektros kainų didėjimo duomenys,  $10\%$  žingsniu

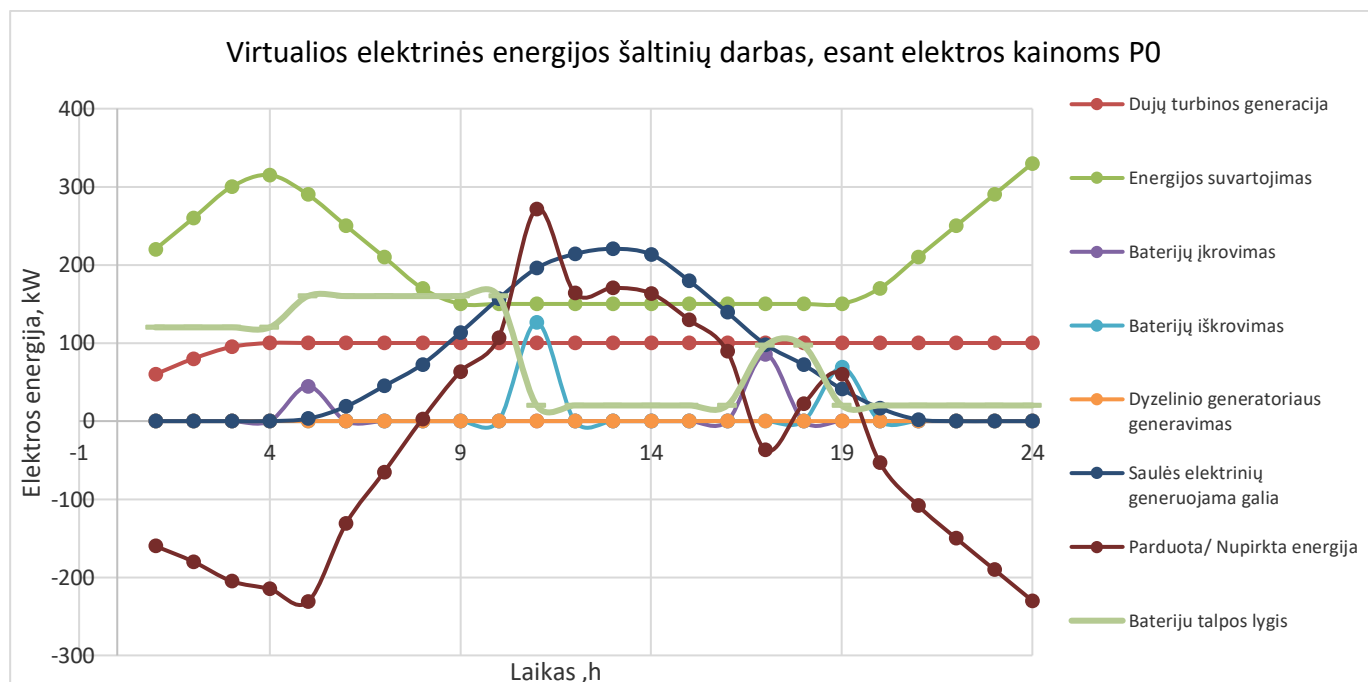
Laiko intervalas	Valandos, h	P0, €/MWh	P1 €/MWh	P2 €/MWh	P3 €/MWh	P4 €/MWh	P5 €/MWh
t1	1	30,24	33,264	36,288	39,312	42,336	45,36
t2	2	30,31	33,341	36,372	39,403	42,434	45,465
t3	3	29,04	31,944	34,848	37,752	40,656	43,56
t4	4	29,62	32,582	35,544	38,506	41,468	44,43
t5	5	29,03	31,933	34,836	37,739	40,642	43,545
t6	6	29,69	32,659	35,628	38,597	41,566	44,535
t7	7	48,84	53,724	58,608	63,492	68,376	73,26
t8	8	49,02	53,922	58,824	63,726	68,628	73,53

Laiko intervalas	Valandos, h	P0, €/MWh	P1 €/MWh	P2 €/MWh	P3 €/MWh	P4 €/MWh	P5 €/MWh
t9	9	50,04	55,044	60,048	65,052	70,056	75,06
t10	10	49,02	53,922	58,824	63,726	68,628	73,53
t11	11	52,01	57,211	62,412	67,613	72,814	78,015
t12	12	50,09	55,099	60,108	65,117	70,126	75,135
t13	13	48,89	53,779	58,668	63,557	68,446	73,335
t14	14	48,83	53,713	58,596	63,479	68,362	73,245
t15	15	48,87	53,757	58,644	63,531	68,418	73,305
t16	16	48,8	53,68	58,56	63,44	68,32	73,2
t17	17	34,35	37,785	41,22	44,655	48,09	51,525
t18	18	48,8	53,68	58,56	63,44	68,32	73,2
t19	19	48,85	53,735	58,62	63,505	68,39	73,275
t20	20	48,84	53,724	58,608	63,492	68,376	73,26
t21	21	35,42	38,962	42,504	46,046	49,588	53,13
t22	22	35,89	39,479	43,068	46,657	50,246	53,835
t23	23	31,66	34,826	37,992	41,158	44,324	47,49
t24	24	30,16	33,176	36,192	39,208	42,224	45,24

Atliekant analizę su standartinėmis rinkos kainomis (P0), gaunamas pelnas yra 177,13 €. Šį pelną sudaro gautos pajamos už aktyvios apkrovos valdymą bei parduotą elektros energiją. Elektros energijos šaltinių darbas, norint pasiekti anksčiau minėta pelną, atvaizduotas 23-ajame paveiksle. Pagal šį grafiką matome, kad dujų turbina visą parą veikia pilnu pajėgumu (išskyrus tris laiko intervalus, kada yra didinamas jos galingumas). Saulės jėgainės generacija ir jos grafikas jau buvo aptartas anksčiau. Dėl žemos elektros energijos kainos, dyzelinis generatorius šiuo atveju nėra naudojamas, jis laikomas, kaip rezervinis elektros šaltinis. Pagal pateiktus darbo režimus matome, kad elektros energijos kaupiklis (baterijos) per parą atlieka du pilnus išsikrovimus (angl. *Discharge*). Tai įtakoja tai, kad nakties metu elektros energija yra pigi ir galima pilnai pakrauti kaupiklį, o rytinio piko metu jį pilnai iškrauti. Antras kaupiklio dalinis ciklas įvyksta prieš vakarinį elektros vartojimo piką, kada elektros energija 17 valandą atpinga, o 18 valandą jos kaina vėl padidėja (~40%), esant tokiems kainos svyravimams elektros energijos kaupiklis yra puiki priemonė generuoti papildomas pajamas iš elektros pardavimo. Kaip matome pagal parduotos elektros energijos kreivę pardavimų staigūs šuoliai yra fiksuojami suveikus elektros kaupikliui. Elektros kaupiklis tampa puikia priemone, kuri leidžia nupirkti pigią energiją ir jai pabrangus pelningai ją parduoti rinkoje.

Aukščiau aprašyti elektros energijos šaltiniai ir jų darbo režimai yra dalinai standartiniai. Įdomiausias kitimas šiame grafike fiksuojamas energijos suvartojime arba kitaip aktyvioje apkrovoje, kuri yra valdoma elektros energijos paslaugos teikėjo. Pagal vykstantį kitimą matome, kad dienos metu, esant aukštai energijos kainai, vartojamas minimalus nustatytas kiekis, elektros kainai esant žemesnei energijos tiekėjas suteikia galimybę naudoti didesnę jos kiekį. Taip valdydamas vartotojo apkrovos

grafiką energijos tiekėjas sumažina pikinius momentus, bei jam reikalinga mažesnė generacija tais laiko periodais.

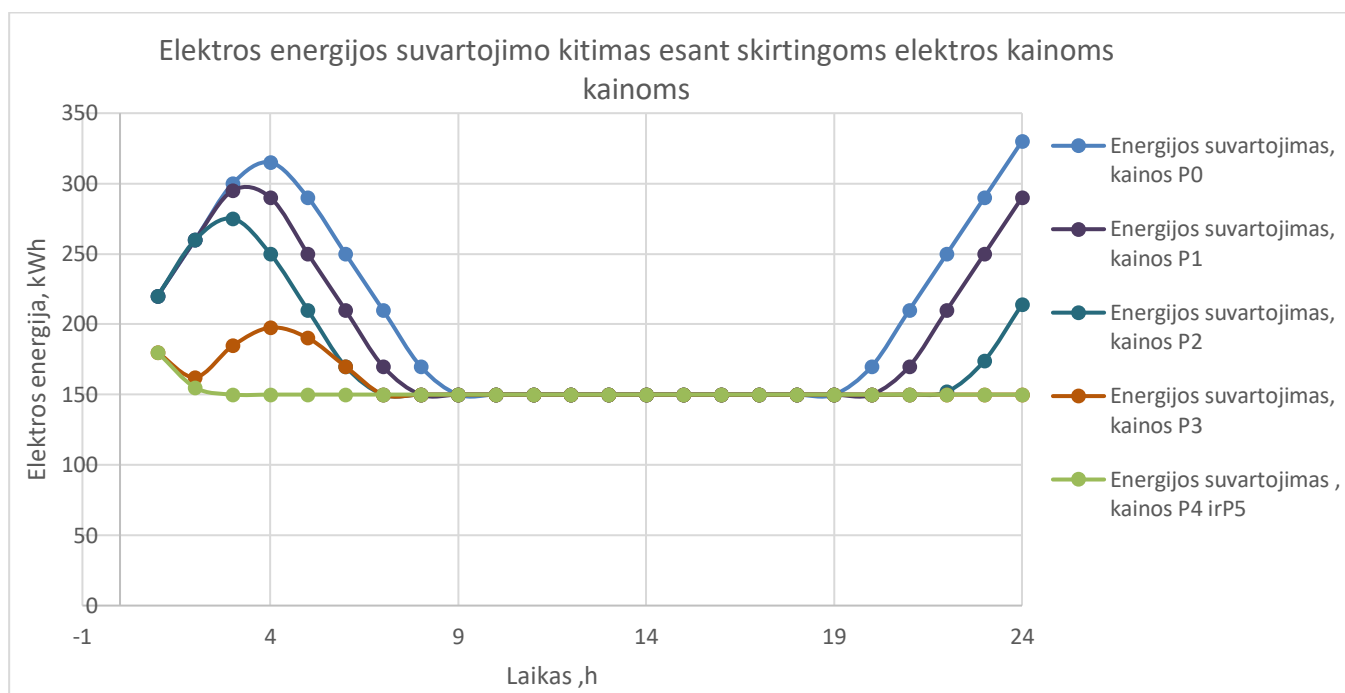


pav. 23 Virtualios elektrinės energijos šaltinių darbas, esant elektros kainoms P0

Atliekant tolimesnę analizę kiekvieno kainų padidėjimo detalai neanalizuosime. Pagal pateiktus grafikus (Priedas Nr.1), galima identifikuoti, kad vienintelis energijos šaltinis, kuris kinta keičiantis elektros kainoms yra suvartota energija – aktyvi apkrova. Jos kitimą analizuojame detaliau, esant skirtingoms elektros kainoms.

Pagal gautus analizės duomenis (Priedas Nr.1) 24-ajame paveiksle pavaizduoti suminiai suvartotos energijos duomenys, esant skirtingiems kainų scenarijams (P0-P5). Pagal šį grafiką matome, kad didėjant elektros energijos kiekiui, mažėja vartojama energija, ją mažina energijos paslaugos teikėjas. Toks elektros energijos mažinimas užtikrina, kad laikotarpiais, kada rinkos kaina žymiai išauga, aktyviems vartotojams yra sumažinamas vartojamas energijos kiekis, tokiu veiksmu išlyginamas bendras apkrovos grafikas. Tačiau tai yra nauda, kurią gauną elektros energijos tiekėjas.

Analizuojant šią situaciją svarbu išsiaiškinti, kaip kinta vartotojo pelnas dėl didėjančios rinkos kainos bei vartojamo mažesnio elektros kiekio. Kiekvienam skirtingų kainų scenarijui (P0-P1), gauname skirtingą pelną, kuris pateiktas 13-oje lentelėje. Ši analizė atskleidžia, kad esant kainų didėjimui, vartotojo gaunamas pelnas kinta tik keliomis procentų dalimis. Net pasiekus kainos padidėjimą 50 %, pelnas pakinta tik 13,63 €. Tokia situacija susidaro dėl to, kad didėjant elektros kainai, jos mažiau perkame iš elektros rinkos (taip pat mažiau vartojame). Bet mažesnis energijos pirkimas yra tik viena iš dedamųjų. Norėdami pilnai suprasti kainų kitimo įtaką pelnui ir tokios situacijos priežastis atliekame analogišką analizę kainų mažėjimo atveju.



pav. 24 Elektros energijos suvartojimo kitimas, esant skirtingoms kainoms (kainoms didėjant)

lentelė 13. Pelno kitimas, didėjant elektros kainoms

Elektros kainų scenarijai	P0	P1	P2	P3	P4	P5
Pelnas	177,13 €	177,76 €	179,37 €	182,24 €	186,23 €	190,76 €

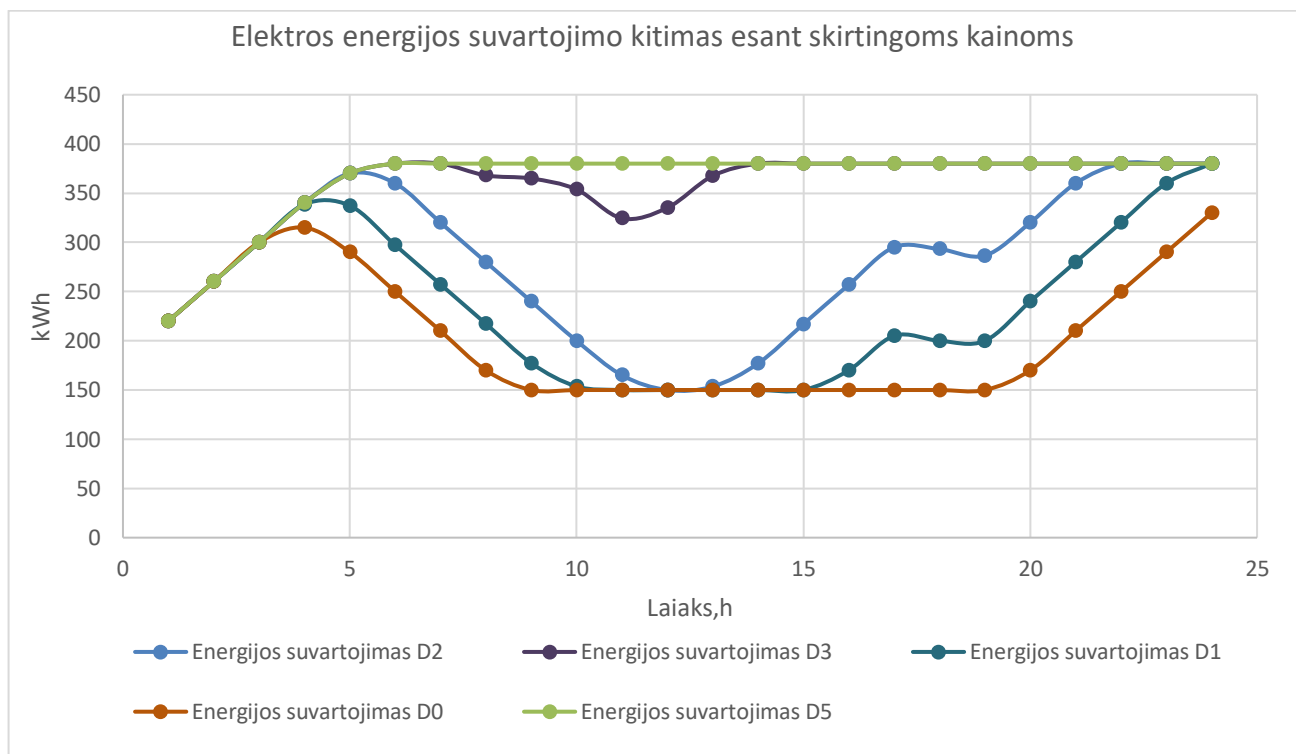
Kainų mažėjimo atveju nagrinėjami penki scenarijai (D1-D5, scenarijus D0=P0, elektros kainų lentelė pateikta Priede Nr. 3), gauti virtualios elektrinės elektros energijos šaltinių darbo režimai, suvartota elektros energija, bei parduota/nupirktą energiją iš tinklo pateikiami Priede Nr.2. Kiekvieno kainų scenarijaus atveju gautas pelnas pateikiamas 14-oje lentelėje.

lentelė 14. Pelno kitimas, mažėjant elektros kainoms

Elektros kainų scenarijus	D0	D1	D2	D3	D4	D5
Pelnas	177,13 €	178,40 €	183,27 €	195,09 €	212,31 €	212,31 €

Remiantis gautais duomenimis galime daryti prielaidą, kad mažėjant elektros kainoms fiksuojame pelno didėjimą, kuris viršija net tą, kuris buvo pasiektas elektros kainoms augant. Paprastai tai prieštarauja standartiniams ekonomikos dėsniams (didėjanti pardavimo kaina, didėjantis pelnas, mažėjanti pardavimo kaina, mažėjanti pelnas). Tačiau šių dėsnių tiesiogiai taikyti negalima, kadangi vartotojas tiek perka, tiek parduoda elektrą, tiek ją gamina pats. Norint rasti tinkamą šios situacijos

išaiškinimą, reikia paanalizuoti elektros suvartojimo kitimą, mažėjant elektros rinkos kainoms. Elektros suvartojimo kitimas kiekvienam kainų scenarijui (D0-D5) pateiktas 23-iajame paveiksle.



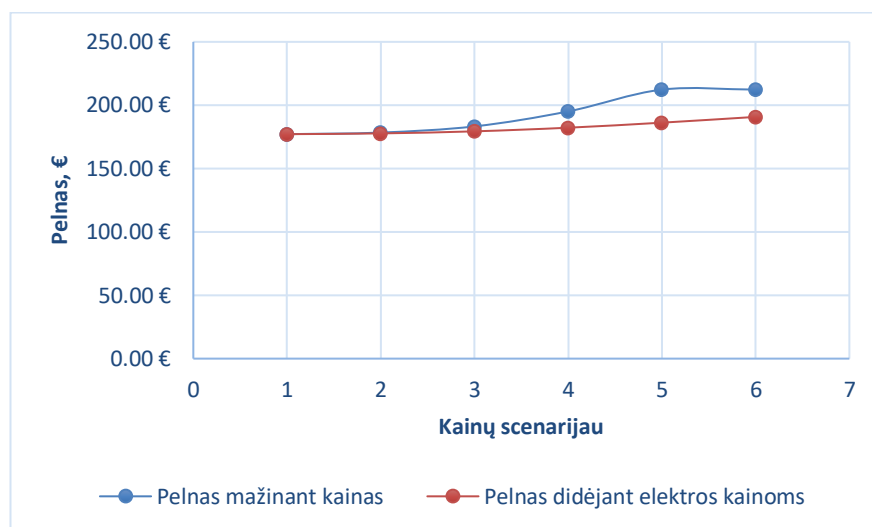
pav. 25 Elektros energijos suvartojimo kitimas, esant skirtingoms kainoms (kainoms mažėjant)

Mažėjant elektros kainoms matome priešingą situaciją, nei didėjant elektros kainoms, vartotojas esant mažesnei kainai vartoja didesnį elektros energijos kiekį. Nors ir vartojamas didesnis elektros kiekis, kaip matėme pagal 11-ą lentelę, uždirbamas pelnas didėja.

Didėjantį pelną lemia tai, kad vartotojo nauda gaunama už aktyvios apkrovos valdymą apibrėžta kvadratine lygtimi (2.1.3 skyrius, 18-as paveikslas), kuri nurodo, kad vartojant mažesnę elektros kiekį gaunamas mažesnis mokestis iš tinklo operatoriaus, ir jei naudojamas didesnis energijos kiekis, gaunamas didesnis mokestis (pelno dalis). Vartojamą elektros kiekį apsprendžia santykis tarp esančios rinkos kainos ir gaunamo mokesčio už aktyvios apkrovos valdymą. Kada kaina mažėja, vartotojas gali daugiau jos vartoti bei gauti didesnį mokesčių iš energijos tiekėjo, kada elektros energija pradeda ženkliai brangti, vartotojui tampa ekonomiškai nenaudinga pirkti didelį energijos kiekį, būtent tai ir matome 23-ajame paveiksle.

Apibendrinus pelno kitimą kainų didinimo ir mažinimo atvejais, remdamiesi 26-uoju paveikslu galime daryti išvadą, kad esant mūsų apibrėžtomis sąlygoms, kainų kitimas didelės įtakos pelnui neturi, abejais scenarijais virtuali elektrinė gauna teigiamas pajamas už dalyvavimą elektros rinkoje bei aktyvios apkrovos valdymą. Tokia situacija palanki visiems norintiems tapti aktyviais vartotojais ir kurti

savo virtualią elektrinę. Tačiau turime aiškiai apibrėžti ir energijos tiekimo operatoriaus gaunamą naudą iš virtualių elektrinių ir aktyvių vartotojų.



pav. 26 Pelno kitimo scenarijai, didėjant ir mažėjant elektros kainoms

Elektros energijos paslaugos teikėjas mokėdamas vartotojui už aktyviają apkrovos valdymą dalinai apsaugo virtualios elektrinės savininką nuo elektros kainų svyravimo ir garantuoja pajamas, tai galime matyti pagal 26-ojo grafiko gautas pajamų kreives, esant skirtingiems elektrų kainų scenarijams. Už mokestį mokamą virtualios elektrinės savininkui, energijos tiekimo operatorius gauna valdomą aktyvią apkrovą, generaciją iš dujų turbinos, saulės elektrinės ir energijos kaupiklį. Elektros energija, gaunama į tinklą iš virtualios elektrinės, suteikia galimybę energijos skirstymo operatoriumi mažinti investicijas į generacijos didinimą elektros tinkle. Iš to galime daryti išvadą, kad energijos tiekimo operatorius investicijas skirtas naujų generacijos agregatų įrengimui paverčia mokesčiu už aktyvios apkrovos valdymą virtualioje elektrinėje, taip naujų elektros generacijos šaltinių investicijos kaštus perleisdamas virtualios elektrinės savininkui. Vadinas norėdamas palaikyti tinkamą balansą ir nepatirti papildomų nuostolių energijos tiekimo operatorius turi tinkamai apibrėžti funkciją  $U_{(EL)}$ , kuri nustato vartotojo gaunamą naudą už vartojamos elektros energijos kiekį. Tolimesniame skyriuje paanalizuosime, kaip kinta pelnas ir energijos šaltinių darbas, keičiant šios funkcijos parametrus.

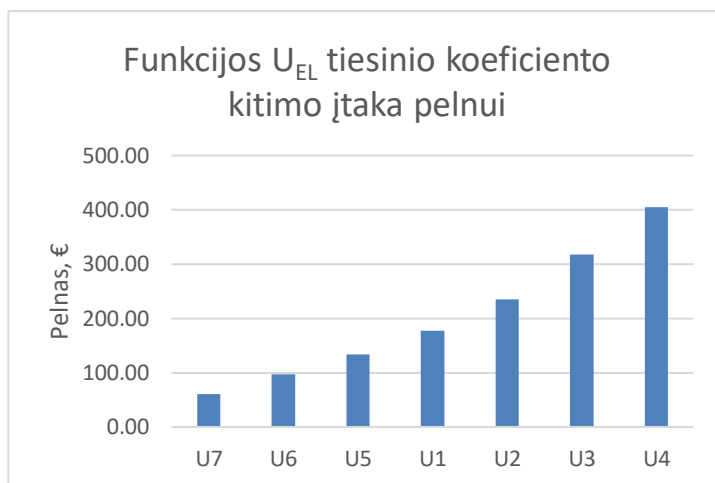
### 2.2.2. Funkcijos $U_{(EL)}$ parametrų kitimo įtaka pelnui

Tirdami vartotojo gaunamą naudą (pajamas) už aktyvios apkrovos valdymą tirsime funkciją  $U_{(EL)}$  ir kaip kinta virtualios elektrinės elementų darbo režimai, didėjant ir mažėjant šios funkcijos parametrui. Pagrindinis tiriamasis parametras yra tiesinis lygties koeficientas. Jį keisime pastoviu žingsniu ir elektrinės darbo režimą tirsime 7 skirtingais variantais (U1-U7), funkcijų trumpiniai ir išraiškos pateiktos 15-oje lentelėje. Funkcija U1 yra mūsų pradinė funkcija naudota ankstesniuose tyrimuose. Funkcijose nuo U1-U4 tiriamas koeficiento didėjimas ir jo įtaka pelnui, funkcijose U5-U7

tiesinio koeficiento mažėjimas ir įtaka pelnui. Visi gauti virtualios elektrinės elementų darbo režimų duomenys, tiriant funkcijos parametrų kitimą, pateikti Priede Nr.4.

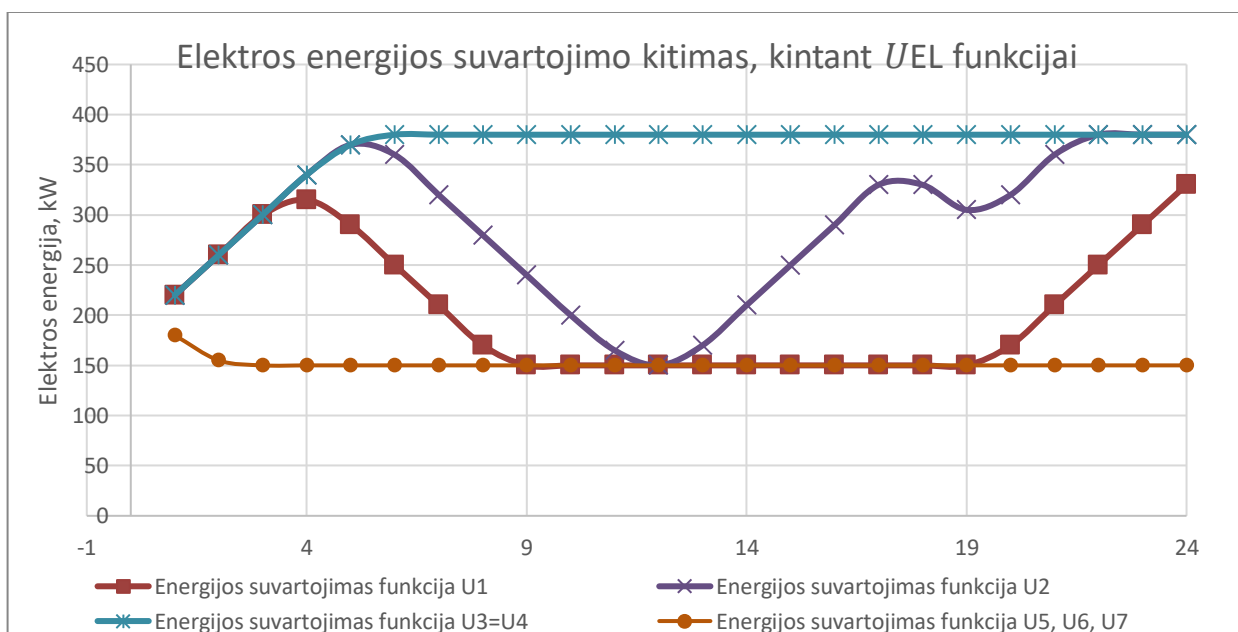
lentelė 15. Funkcijos  $U_{(EL)}$  reikšmės, trumpiniai ir pelno pokytis

Funkcijos trumpinys	Funkcijos išraiška $U_{EL}$	Pelnas
U1	$-10E^2+42E+5$	177,13
U2	$-10E^2+52E+5$	235,26
U3	$-10E^2+62E+5$	317,33
U4	$-10E^2+72E+5$	404,43
U5	$-10E^2+32E+5$	133,65
U6	$-10E^2+22E+5$	97,30
U7	$-10E^2+10E+5$	60,95



pav. 27 Funkcijos  $U_{EL}$  tiesinio koeficiento kitimo įtaka pelnui

Pagal gautus pelno duomenis, matome, kad didėjant tiesinio koeficiento reikšmei vartotojo pelnas didėja, jis gauna didesnę mokesčių už vartojamą energiją iš energijos tiekimo operatoriaus. Kad galėtume daryti gilesnes išvalgas ir atskleisti sąsają, kaip keičiasi elektros energijos vartojimas, didėjant šiam koeficientui, panagrinėkime elektros energijos vartojimo kitimą, esant skirtingoms  $U_{(EL)}$  funkcijoms.



pav. 28 Elektros energijos suvartojimo kitimas, kintant  $U_{EL}$  funkcijos parametrams

Pagal pateiktą 28-ą grafiką matome, kad elektros pelnas ir suvartojimas didėja, didėjant tiesinio koeficiento reikšmei. Vadinasi didėjant gaunamam mokesčiui už aktyviają apkrovą vartotojui

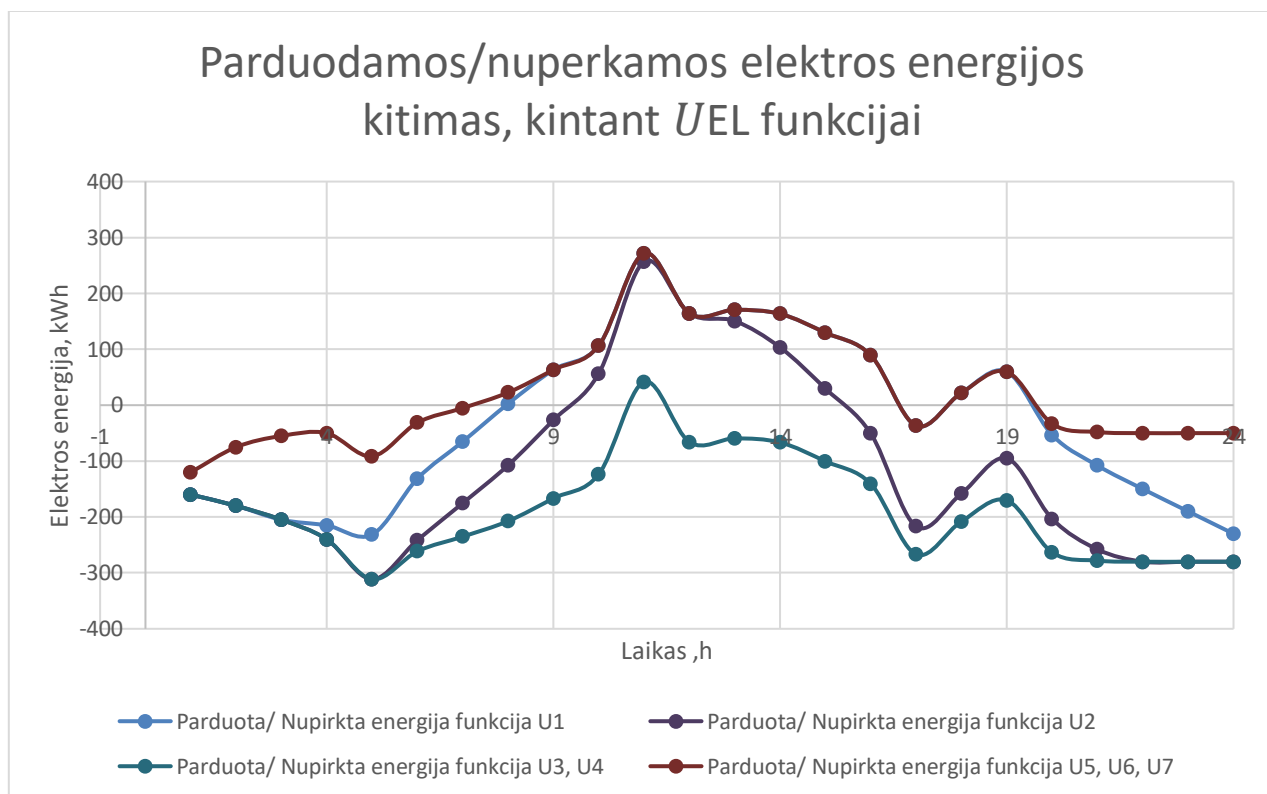


ekonomiškai naudinga vartoti kuo daugiau energijos, nes tai kaip jau minėta anksčiau, didina jo gaunamo mokesčio dalį. Tačiau tokia situacija nėra palanki ir naudinga elektros energijos tiekėjui, jo tikslas mažinti vartotojo vartojamą energiją. Šioje situacijoje gauname du požiūrio taškus. Energijos tiekimo operatorius norėtų, jog vartotojo gaunama nauda būtų apibrėžta U7 funkcija, kuri kurtų sąlygas mažesniai elektros vartojimu, tuo tarpu vartotojas nori savo sąlygas apibrėžti U4 funkcija, kuri ne tik jam garantuotų didžiausią pelną, bet ir suteiktų galimybę vartoti daugiausia elektros energijos (laipsniškas pelno kitimas, prie skirtingų  $U_{(EL)}$  pateiktas 25 – paveiksle). Šioje vietoje elektros energijos operatorius turi skirti didelį dėmesį sąlygų sudarymui ir naudos mokesčio nustatymui, kaip matome pagal gautus tyrimo rezultatus, netinkamai apibrėžus sąlygas nuostolius gali patirti viena arba kita pusė.

Pagal gautas duomenų kreives, mūsų atveju, idealiausia funkcija U2, nes pagal elektros suvartojimo kitimą, ji išlieka lanksti ir reaguoja į kainos augimą rinkoje, taip pat ji suteikia galimybę uždirbti pakankamas pajamas virtualios elektrinės savininkui.

Aukščiau nagrinėjame dviejų parametrų kitimą pelno ir energijos suvartojimo. Be šių dviejų dydžių, tiriant  $U_{(EL)}$  funkciją ir virtualios elektrinės darbo režimus, reikia identifikuoti ir trečiąjį - tai energijos pardavimas/pirkimas. Anksčiau minėjome, jog elektros energijos tiekimo operatorius yra suinteresuotas, kad virtualios elektrinės savininkas ne tik valdytų aktyviają apkrovą, bet ir tiektų elektros energiją į tinklą, tiekiamos elektros energijos dydis tiesiogiai koreliuoja su naudos funkcija  $U_{(EL)}$ .

Žemiau pateiktame 29-ajame paveiksle matome, kaip kinta elektros pardavimas/pirkimas, kintant tiesiniam koeficientui.



pav. 29 Parduodamos/nuperkamos elektros energijos kitimas, kintant  $U_{EL}$  funkcijai

Nagrinėjant elektros energijos pardavimą/pirkimą, suinteresuotos šalys, vartotojas ir energijos tiekimo operatorius į tai žiūri skirtingai. Virtualios elektrinės savininkas, tikisi ją parduoti momentais, kai elektros energija brangiausia, o kitu metu naudoti ją savo reikmėms. Tuo tarpu, energijos tiekimo operatoriaus lūkesčiai yra nupirkti kuo daugiau elektros energijos į tinklą, ne tik tuo metu, kada ji brangiausia. Analizuodami pateiktą grafiką 29-ajame paveiksle matome, kad priklausomai nuo to kaip apibūdinta naudos funkcija, kinta ir parduodamos energijos kiekis, ir jis didžiausias, esant U7 funkcijai, kuri yra parankiausia energijos tiekimo operatoriui, bet kaip jau minėta anksčiau, neparanki vartotojui. Tuo tarpu, funkcija U4, kuri palankiausia vartotojui, į tinklą parduoda mažiausią kiekį elektros energijos (daugiau jos nuperka nei parduoda). Tad energijos tiekimo operatoriui, kaip jau anksčiau išsiaiškinome, svarbu tinkami apibrėžti sąlygas, jog jos būtų palankios abiems pusėms ne tik dėl gaunamo pelno ar patiriamų nuostolių, bet taip pat ir dėl tiekiamos energijos į tinklą.

Pagal 29-ą grafiką galime daryti išvadą, kad abejoms pusėms palanki naudos funkcija yra U3, kuri vidurdienio metu, kuri ne tik tiekia pakankamai energijos į tinklą, bet taip pat užtikrina ir naudą virtualios elektrinės savininkui.

Pagal atliktą  $U_{(EL)}$ .funkcijos teisinio koeficiento kitimo analizę galime daryti išvadą, kad energijos teikimo operatorius turi skirti didelį dėmesį šių sąlygų apibrėžimui, nes tai tiesiogiai įtakoja virtualios elektrinės pelningumą, vartojamą energijos kiekį, aktyvios apkrovos lankstumą ir generuojamą elektros energiją elektros tinklui. Mūsų tiriamu atveju, ši funkcija yra tokia reikšminga, nes aktyvios apkrovos valdymo diapazonas yra platus nuo 150 kW iki 380 kW, ir norint išsiaiškinti, kokią įtaką pelniui ir vartojamai energijai turės keičiamas aktyvios apkrovos diapazonas, atliksime papildomą tyrimą.

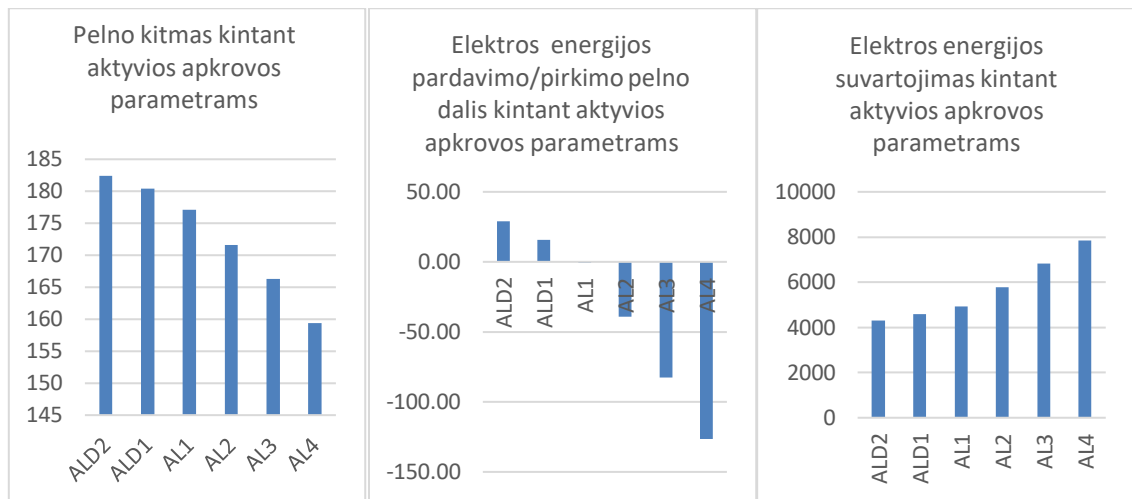
### 2.2.3. Aktyvios apkrovos diapazono kitimo įtaka pelniui ir vartojamai energijai

Šiame skyriuje panagrinėsime aktyvios elektros energijos diapazono kitimą 6-ioms skirtingoms variacijoms. Kiekvienos variacijos metu tiriama suvartojama suminė paros energija, pelnas, taip pat pajamos už nuperkamą/parduodamą elektros energiją. Visi tiriami variantai ir pirminiai tyrimo rezultatai pateikti 16-oje lentelėje. Tyrimo išsamūs rezultatai ir virtualios elektrinės darbo režimai paros bėgyje, vienos valandos intervalu pateikti Priedas Nr.5

lentelė 16. Aktyvios apkrovos diapazono kitimo įtaka pelniui ir vartojamai energijai

Sąlygų trumpinys	Minimalus energijos poreikis	Maksimalus energijos poreikis	Pelnas	Elektros pardavimas/pirkimas	Suvartotas energijos kiekis, kWh
ALD2	100	380	182,41	28,94	4298,92
ALD1	125	380	180,37	15,90	4577,29
AL1	150	380	177,13	-0,57	4915,00
AL2	200	380	171,61	-39,16	5788,29
AL3	250	380	166,26	-82,73	6823,85
AL4	300	380	159,35	-126,33	7840,00

Pateiktoje lentelėje matome, kad elektros energijos pelnas mažėja, mažėjant aktyvios apkrovos leistinam kitimo diapazonui, taip pat mažėja pajamos už paroduotą/nupirktą elektros energiją. Šie duomenys atskleidžia, jog pelnas mažėja dėl didesnės energijos dalies perkamos iš elektros tinklo, taip pat matome, kad esant mažesniai kitimo diapazonui smarkiai išauga energijos sąnaudos.



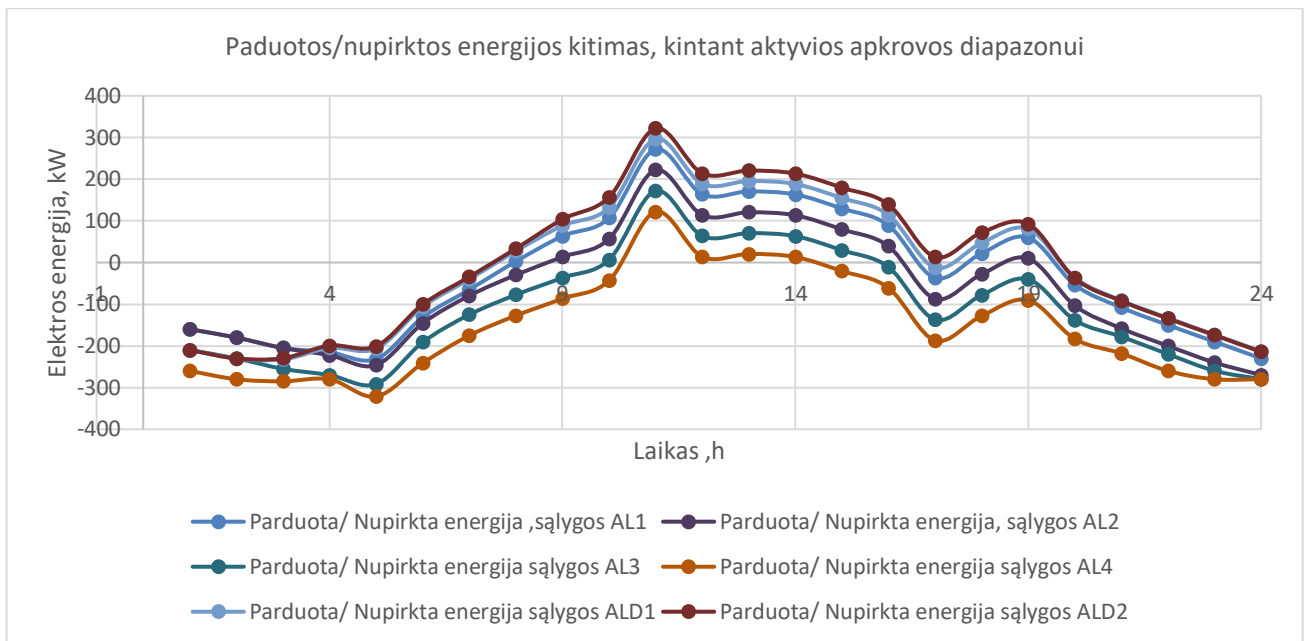
pav. 30 Aktyvios apkrovos diapazono kitimo įtaka pelniui, elektros pardavimo ar pirkimo pelno daliai ir vartojamai energijai

Grafinis kintamųjų atvaizdavimas pateiktas 30-ajame paveiksle. Iš jo matome, kad naudodami didžiausią elektros energijos kiekį patiriame didelį nuostolį už perkamą energiją, nors už tai iš energijos tiekimo operatoriaus gauname didesnes pajamas, kuris apibrėžtas naudos funkcija ir yra didesnės nei prie mažesnio suvartojamo elektros energijos kiekio.

Šioje vietoje galime identifikuoti atsirandančią spragą, ir pagal simuliuotą modelį matome, kad naudos funkcija nėra tinkama, kada aktyvios apkrovos diapazonas yra santykinai nedidelis (AL3 ir AL4 sąlygos), nes šiais atvejais virtualios elektrinės savininkas perka nemažą energijos kiekį iš rinkos, bet vis tiek gauna mokesčio dalį už aktyvią apkrovą. Energijos tiekimo operatorius formuodamas paslaugos kainą ir įkainius turi tinkamai įvertinti, koks yra aktyvios apkrovos kitimo diapazonas, kokią procentinę dalį jis sudaro nuo bendros vartojamos elektros energijos.

Tinkamai iliustruoti parduotos/nupirktos energijos kitimą, kintant aktyvios apkrovos diapazonui, pateikimas 31-as paveikslas, kuriame atvaizduotas kiekvienas scenarijus. Atliekant modeliavimą su GAMS programa, šiai tyrimo daliai, kiti parametrai, išskyrus valdomą diapazoną, nebuvo keičiami, todėl matome, kad mažėjant diapazonui proporcingai mažėja parduodamas elektros energijos kiekis. Toks kitimas nėra palankus elektros energijos tiekėjui, nes jo tikslas yra užtikrinti, kad virtuali elektrinė generuotų, o ne naudotų elektros energiją iš tinklo. Todėl energijos tiekėjui formuojant virtualios elektrinės paslaugų paketą svarbu tinkamai įvertinti valdomos apkrovos diapazoną, nustatyti sąlygas, užtikrinančias jo pastovumą, nes nežymūs svyravimai, gali energijos tiekimo operatoriui atnešti nuostolius.

Vienas iš galimų variantų, kaip užtikrinti didesnę elektros pardavimą, yra didinti saulės jėgainės galingumą. Atliksime analizę, kaip saulės elektrinės galios kitimas įtakoja virtualios elektrinės pelną ir perkamą/parduodamą elektros energiją.



pav. 31 Paeduotos/nupirktos energijos kitimas, kintant aktyvios apkrovos diapazonui

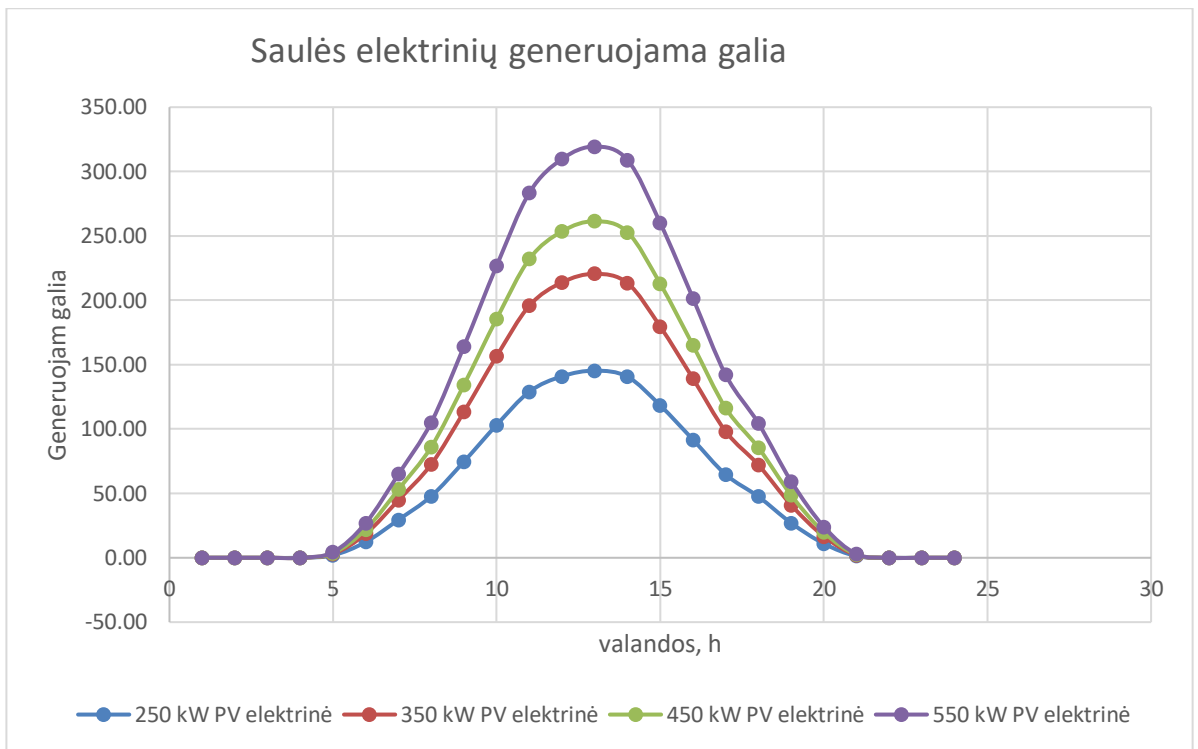
#### 2.2.4. Saulės jėgainės gailios kitimo įtaka pelnui ir perkamai/parduodamai elektros energijai

Analizuojant saulės jėgainės generuojamos galios įtaką virtualios elektrinės pelnui, parinksime keturias skirtingo galingumo saulės elektrines. Parenkamos elektrinės ir jų pirminiai analizės duomenys pateikiami 17-oje lentelėje. Visi analizės metu gauti grafikai, darbo režimo pateikti Priede Nr. 6., saulės elektrinių įrengimo vietos duomenys pateikti Priede Nr. 7.

lentelė 17. Saulės elektrinės galios kitimo įtaka pelnui

Galia	Pelnas	Pelnas už parduotą/ nupirktą elektros energiją, €
250 kW	148,39	-34,93
350 kW	178,13	-5,20
450 kW	194,28	10,95
550 kW	217,20	33,87

Saulės elektrinės generuojamas elektros kiekis nustatytas pasinaudojus PVWatts internetine skaičiuokle, duotoms galioms elektros generavimo kreivėms, pateiktoms 30-ajame paveiksle, duomenų nustatymo diena yra birželio 16.



pav. 32 Saulės elektrinių generuojama galia

Iš gautų analizės duomenų matome, kad didėjant saulės elektrinės galiai, didėja pelno dalis. Tačiau pelno kitimas susidaro tik iš parduotos papildomos energijos elektros rinkoje. Tačiau virtualios elektrinės savininkas negauna papildomos naudos už tai, kad skiria didesnę investicijų dalį elektros generacijos plėtrai, o jo pelnas dalinai priklauso ir nuo vyraujančios elektros rinkos kainos.

Įvertinę saulės elektrinės galios kitimo įtaką pelnui galime daryti išvadą, kad virtualios elektrinės savininkas uždirba tik parduodamas perteklinę energiją, tačiau elektros energijos operatorius formuodamas paslaugos paketą turi būtinai įvertinti virtualios elektrinės generuojamos galios pajėgumus ir taikyti didesnę naudos mokestį virtualios elektrinės savininkui, kurio generacijos pajėgumai yra santykinai didesni lyginant su aktyviaja apkrova (daugiau generuoja galios nei vartoja).

## IŠVADOS

1. Apžvelgus įvairius literatūros šaltinius galima identifikuoti, kad juose išskirti pagrindiniai virtualios elektrinės elementai yra: atsinaujinančios energijos jėgainės, aktyvi apkrova, energijos kaupikliai, pastovios galios jėgainės, dyzeliniai generatoriai, išmani apskaita ir viską apjungianti valdymo sistema.
2. Virtualios elektrinės ir aktyvių vartotojų (angl. *Prosumers*) apibūdinimas skirtinguose literatūros šaltiniuose yra supanašėjęs. Abiems yra priskiriamos aktyvios apkrovos valdymas, galimybė turėti energijos kaupiklius, dyzelinus generatorius, atsinaujinančios energijos generavimo šaltinius. Pagrindinis šių darinių skirtumas yra valdymo sistema. Aktyvaus vartotojo valdyme pagrinde dalyvauja išmanioji apskaita (skaitmeninis elektros energijos skaitiklis), jis neperduoda tinklo valdymo sistemai duomenų apie elementų būseną. Virtuali elektrinė turi atskirą valdymo sistemą, skirtą stebėti kiekvieno elemento būseną ir, esant poreikiui, perduoti duomenis į tinklo valdymo sistemą.
3. Elektros rinkos kainų kitimas nelemia tiesioginio virtualios elektrinės pelno kitimo. Esant kainų deviacijai  $\pm 50\%$ , pelnas kinta tik keliais procentais, tačiau elektros energijos vartojimas kinta proporcingai kainai. Tokią situaciją nulemia vartotojo naudos funkcija  $U_{(E_L)}$ , ir aktyvios apkrovos kitimas, kainoms didėjant ir mažėjant. Didėjant elektros kainai vartotojas mažiau jos vartoja, bet daugiau parduoda saulės elektrinės sugeneruotos energijos, taip pat gauna naudos mokestį. Elektros kainai mažėjant, energijos suvartojama daugiau, bet dėl to gaunamas didesnis naudos mokestis.
4. Vartotojo naudos mokestis matematiškai apibrėžiamas kvadratine funkcija  $U_{(E_L)}$ , o gaunama nauda (pelnas) priklauso nuo vartojamos energijos kiekio, ir kuo jis didesnis tuo gaunamos naudos mokestis (pelnas) didesnis. Ši sąlyga suformuluojama taip todėl, kad esant brangiai energijai būtų vartojamas mažesnis jos kiekis, bei mokamas mažesnis mokestis. Tai lemia, kad energijos paslaugos teikėjas, sąlyginai mažais kaštais pikiniais apkrovimo momentais tinkle, suvaldys elektros energijos vartojimą virtualiose elektrinėse. Esant pigiai energijai tinkle, vartotojas jos vartoja daugiau, ir gauna didesnę naudos mokestį.
5. Energijos tiekimo operatoriui neteisingai apibrėžus vartotojo gaunamą naudą, funkciją  $U_{(E_L)}$ , virtualios elektrinės aktyvi apkrova tampa nedinamiška. Nustačius per mažą mokestį, virtualios elektrinės savininkas naudoja minimalų energijos poreikį,  $E_L^{min}$ , tokiu atveju virtuali elektrinė neefektyvi iš savininko perspektyvos. Nustačius per didelį mokestį, vartojamas maksimalus energijos poreikis,  $E_L^{max}$ , gaunamas didesnis naudos mokestis, virtuali elektrinė neefektyvi iš energijos paslaugos teikėjo perspektyvos.
6. Energijos tiekimo operatoriui, nustatant vartotojo naudos funkciją (pritaikant apsaugos paketą), svarbu išlaikyti sąryšį tarp šios funkcijos parametru ir aktyvios apkrovos valdymo diapazono (skirtumo

tarp  $E_L^{max}$  ir  $E_L^{min}$ ). Platesnis aktyvios apkrovos valdymo diapazonas turėtų suteikti virtualios elektrinės savininkui palankesnes sąlygas. Platesnis valdymo diapazonas, taip pat užtikrina, kad esant aukštai elektros rinkos kainai, virtuali elektrinė patieks didesnę energijos kiekį į tinklą.

7. Formuojant virtualią elektrinę ir apibrėžiant jai taikomą paslaugų paketą, svarbu nustatyti santykį tarp aktyvios apkrovos ir generuojamos energijos virtualioje elektrinėje (dujų turbinos ir saulės jėgainės). Saulės jėgainės galingumo didinimas virtualioje elektrinėje užtikrina didesnę elektros energijos pardavimą į tinklą, bei suteikia galimybę padidinti pelno dalį, didinant elektros pardavimą rinkoje.

8. Energijos kaupiklis integruotas virtualioje elektrinėje padidina pelno dalį, gaunamą iš parduotos energijos. Paprastai paros metu jis atlieka du iškrovimo ciklus. Pirmasis ciklas vyksta rytinio piko metu, antrasis - vakarinio piko metu. Jis padidina gaunamas pajamas už parduotą energiją.

9. Dyzelinis generatorius integruotas virtualioje elektrinėje tampa naudingų, tik esant labai aukštoms rinkos kainoms, tai nulemia didelė šios įrenginio generuojamos elektros energijos savikaina. Kitais atvejais jis naudojamas, kaip avarinis energijos šaltinis ir suteikia virtualiai elektrinei galimybę veikti sutrikus pagrindiniam elektros tinklui. Didina jo patikimumo faktorių.



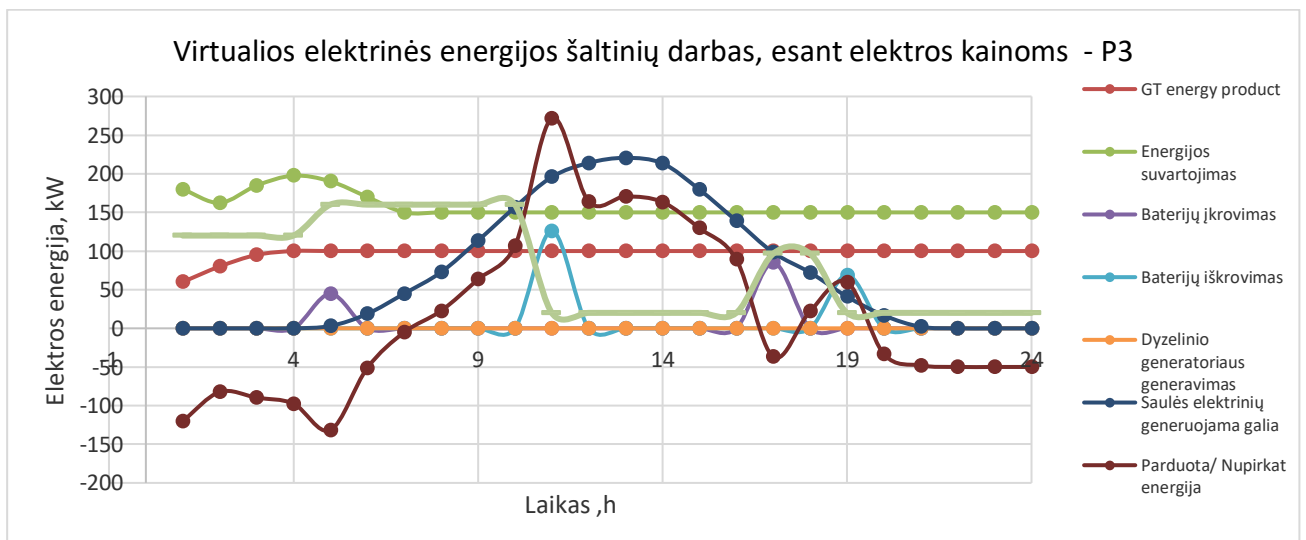
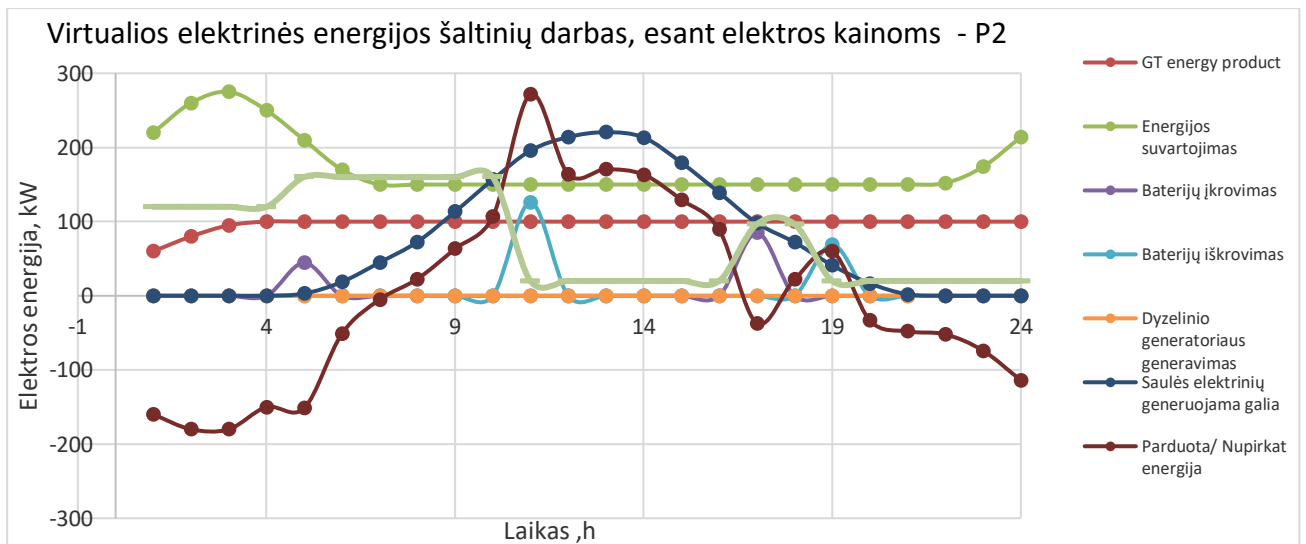
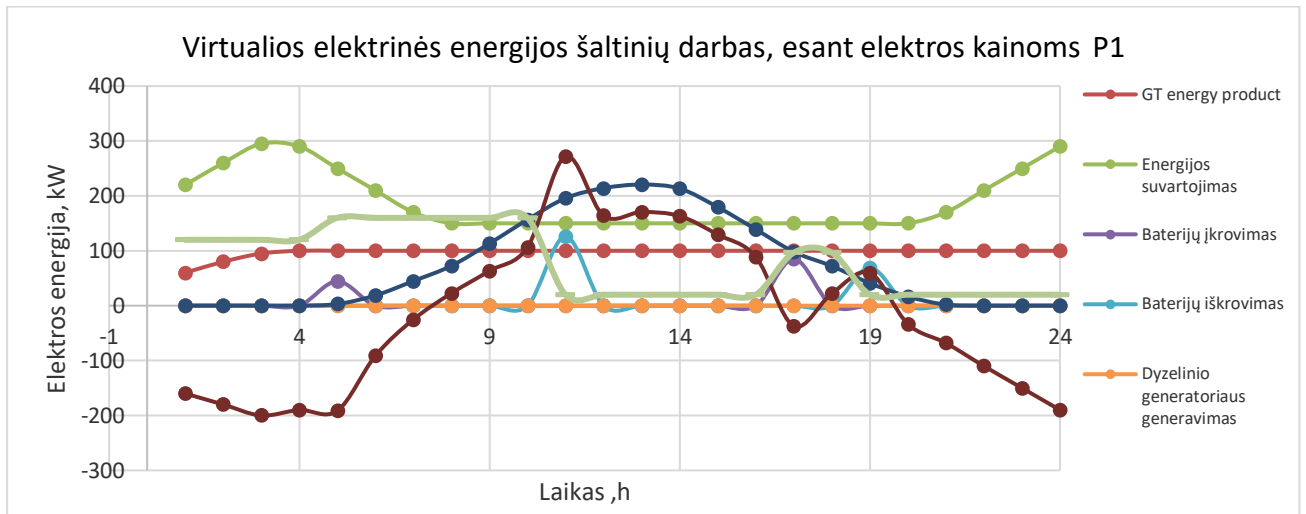
# LITERATŪROS SĄRAŠAS

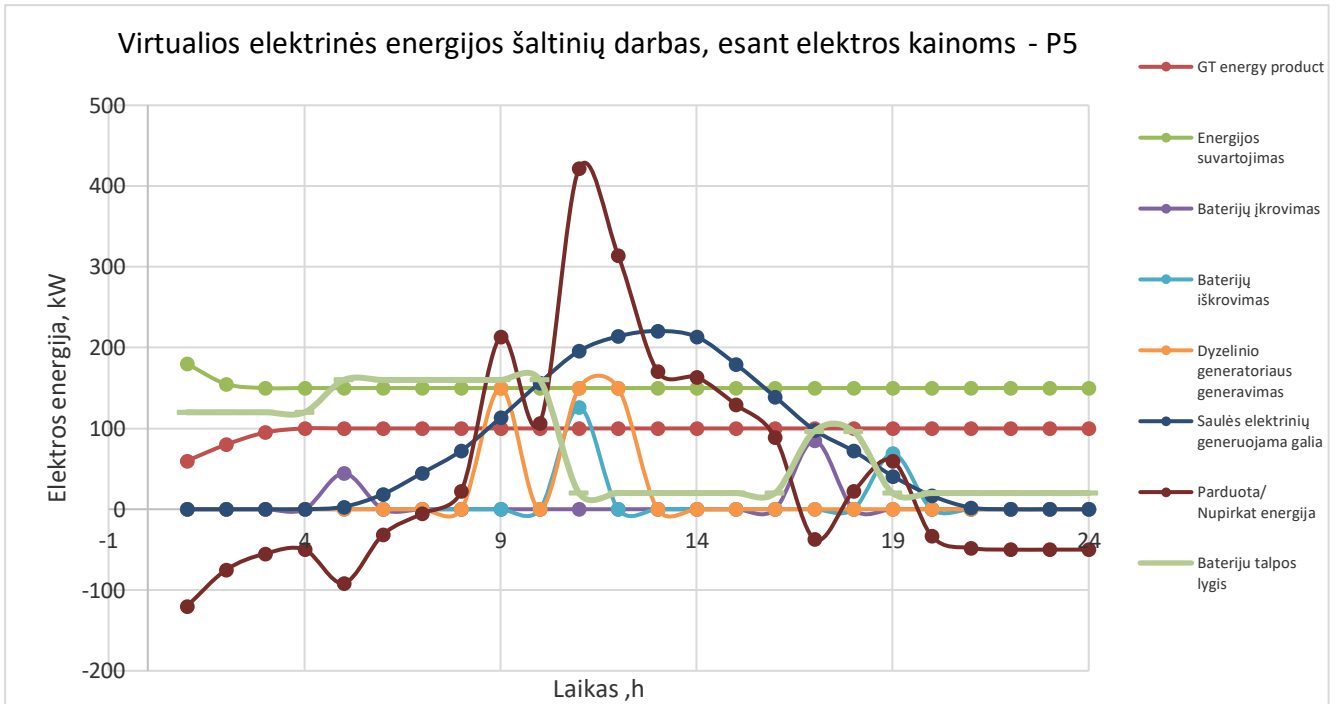
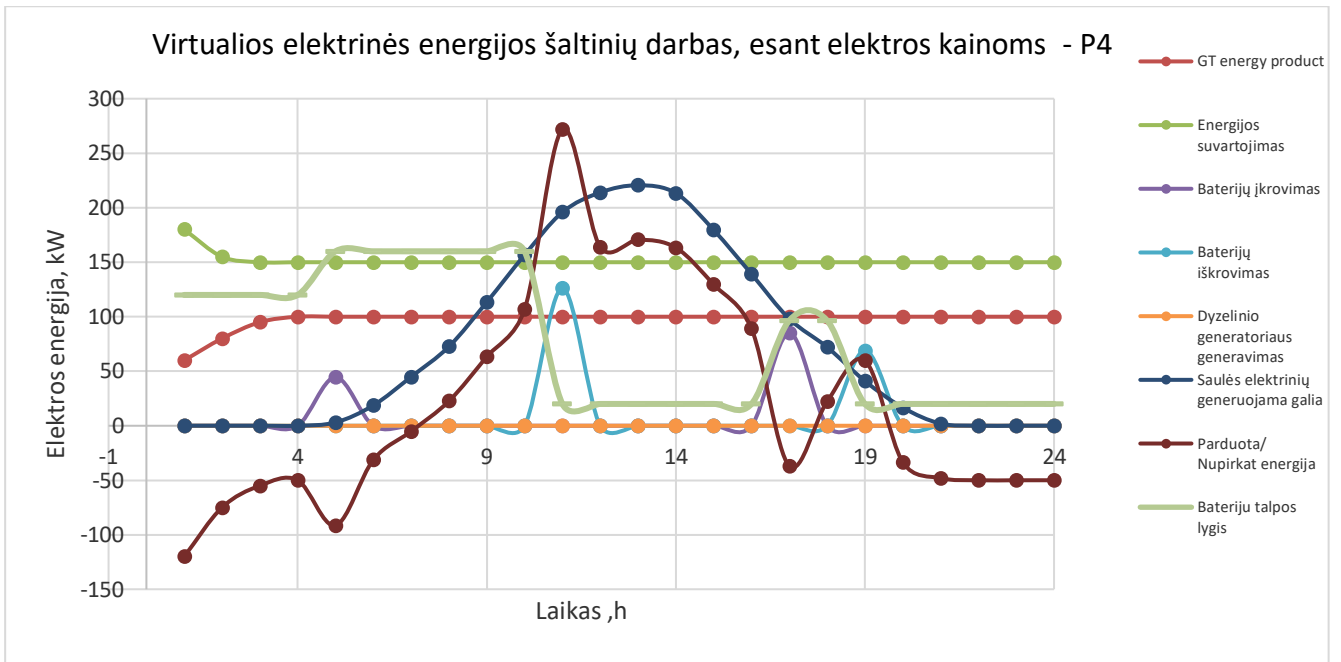
1. “Accelerating Successful Smart Grid Pilots,” World Economic Forum, [interaktyvus]. 2010 [žiūrėta 2018-03-12]. Prieiga per <http://www.weforum.org>
2. “The European Electricity Grid Initiative (EEGI) Roadmap 2010- 18 and Implementation Plan 2010-12,” [interaktyvus]. 2010 [žiūrėta 2018-03-15]. Prieiga per [https://ec.europa.eu/research/participants/portal/doc/call/fp7/fp7-energy-2012-1-1stage/31280-eeqi\\_implementation\\_plan\\_may\\_2010\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/research/participants/portal/doc/call/fp7/fp7-energy-2012-1-1stage/31280-eeqi_implementation_plan_may_2010_en.pdf)
3. Santiago Grijalv and Muhammad Umer Tariq. Prosumer-Based Smart Grid Architecture Enables a Flat, Sustainable Electricity Industry. Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2011 IEEE PES. . ISBN 978-1-61284-220-2
4. „Kaip veikia išmanioji apskaita“ [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2018-03-16]. Prieiga per [http://www.eso.lt/lt/namams/elektra/skaitikliai-ju-prieziura-ir-tikrinimas/ismanieji-skaitikliai/ismanioji-apskaita\\_1819.html](http://www.eso.lt/lt/namams/elektra/skaitikliai-ju-prieziura-ir-tikrinimas/ismanieji-skaitikliai/ismanioji-apskaita_1819.html)
5. „ESO investuos 2019 mln. Eur į išmaniuosius skaitiklius“ [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2018-03-20]. Prieiga per <https://www.vz.lt/energetika/2017/11/16/esoinvestuos-219-mln-eur-i-ismaniuosius-skaitiklius-visiems>
6. SVINKŪNAS Gytis ir NAVICKAS Algimantas. Elektros energetikos pagrindai. Technologija, 2011. ISBN 978-609-0162
7. Lampropoulos I., Vanalme G.M. A., Kling W. L. A methodology for modeling the behavior of electricity prosumers within the smart grid. Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), 2010 IEEE PES. DOI: 10.1109/ISGTEUROPE.2010.5638967. ISBN: 978-1-4244-8510-9
8. Alsaidan I., Gao W., Khodaei A. Battery energy storage sizing for commercial customers. Power & Energy Society General Meeting, 2017 IEEE. DOI: 10.1109/PESGM.2017.8274380. ISBN: 978-1-5386-2212-4
9. Distributed Energy Storage for virtual power plants [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2018-04-25]. Prieiga per: [http://www.ees-magazine.com/distributed-energy-storage-for-virtual-power-plants/?upm\\_export=print](http://www.ees-magazine.com/distributed-energy-storage-for-virtual-power-plants/?upm_export=print)
10. Parastoo Nezamabadi, G.B. Gharehpetian.(2011) Electrical Energy Management of Virtual Power Plants in Distribution Networks with Renewable Energy Resources and Energy Storage Systems. International Electrical engineering Journal (IEEJ).
11. H .Saboori, M. Mohammadi, R. Taghe. (2011) Virtual Power Plant (VPP), Definition, Concept, Components and Types. International Electrical engineering Journal (IEEJ). Vol.1, Nr.11.

12. D. Pudjianto, C. Ramsay and G. Strbac. (2007). Virtual power plant and system integration of distributed energy resources. IET Renewable Power Generation Vol. Issue 1 p. 10-16
13. Reddy Depuru S., Wang L., Devabhaktuni V. Smart meters for power grid — Challenges, issues, advantages and status. Power Systems Conference and Exposition (PSCE), 2011 IEEE/PES. ISBN: 978-1-61284-788-7
14. European Smart Metering Landscape [interaktyvus]. 2016 [žiūrėta 2018-05-02]. Prieiga per [http://www.escansa.es/usmartconsumer/documentos/USmartConsumer\\_European\\_Landscape\\_Report\\_2016\\_web.pdf](http://www.escansa.es/usmartconsumer/documentos/USmartConsumer_European_Landscape_Report_2016_web.pdf)
15. Šašys N. Magistrinis projektas, ALTERNATYVIOSIOS ENERGIJOS MIKROTINKLO PROJEKTAVIMAS IR VALDYMAS. Kauno technologijos universitetas 2015.
16. „Saulės elektrinės generuojamos galios skaičiuoklė“ [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2018-05-12]. Prieiga per: <https://pvwatts.nrel.gov/>
17. Dujų turbina. [interaktyvus]. 2016 [žiūrėta 2018-05-18]. Prieiga per <https://www.ansaldoenergia.com/microturbines/files/assets/common/downloads/publication.pdf>
18. Elektros rinkos kainos [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2018-05-12]. Prieiga per: <https://www.nordpoolgroup.com/Market-data1/Dayahead/Area-Prices/LT/Hourly/?view=table>
19. How to choose the best battery for a solar panel system [interaktyvus] 2016 [žiūrėta: 2018-05-06] Prieiga: <https://www.energysage.com/solar/solar-energy-storage/what-are-the-best-batteries-for-solar-panels/>
20. Morais H., Kádár p., Faria P., Vale Z.A ., Khodra H.M. Optimal scheduling of a renewable micro-grid in an isolated load area using mixed-integer linear programming. Renewable Energy. Volume 35, Issue 1, January 2010, Pages 151-156
21. Morais H., Kadar P., Cardoso M. VPP operating in the isolated grid. Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE. DOI: 10.1109/PES.2008.4596716. ISBN: 978-1-4244-1905-0
22. Saboori H., Mohammadi M., Taghe R. Virtual Power Plant (VPP), Definition, Concept, Components and Types. Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2011 Asia-Pacific. DOI: 10.1109/APPEEC.2011.5749026. ISBN: 978-1-4244-6255-1
23. Morais H., Pinto T., Vale Z. Multilevel Negotiation in Smart Grids for VPP Management of Distributed Resources. IEEE Intelligent Systems. Volume: 27, Issue: 6, Nov.-Dec. 2012. DOI: 10.1109/MIS.2012.105. ISSN: 1541-1672
24. Pasentti M., Rinaldi S. and Manerba D. A Virtual Power Plant Architecture for the Demand-Side Management of Smart Prosumers. MDPI – Applied Sciences. 13 March 2018 Volume 8, Issue 3.

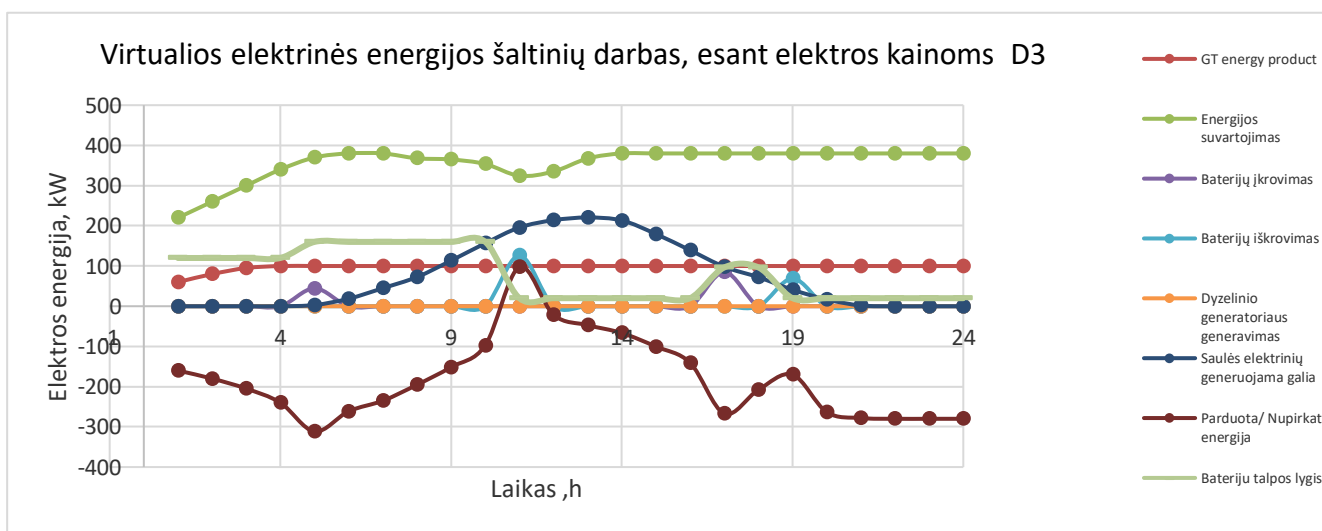
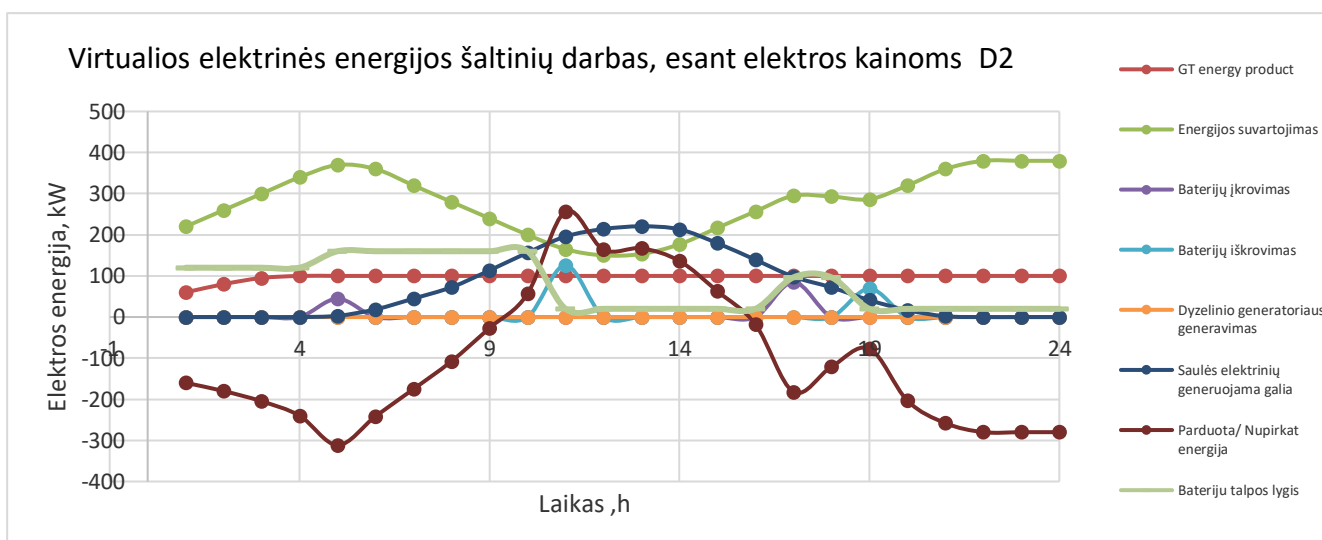
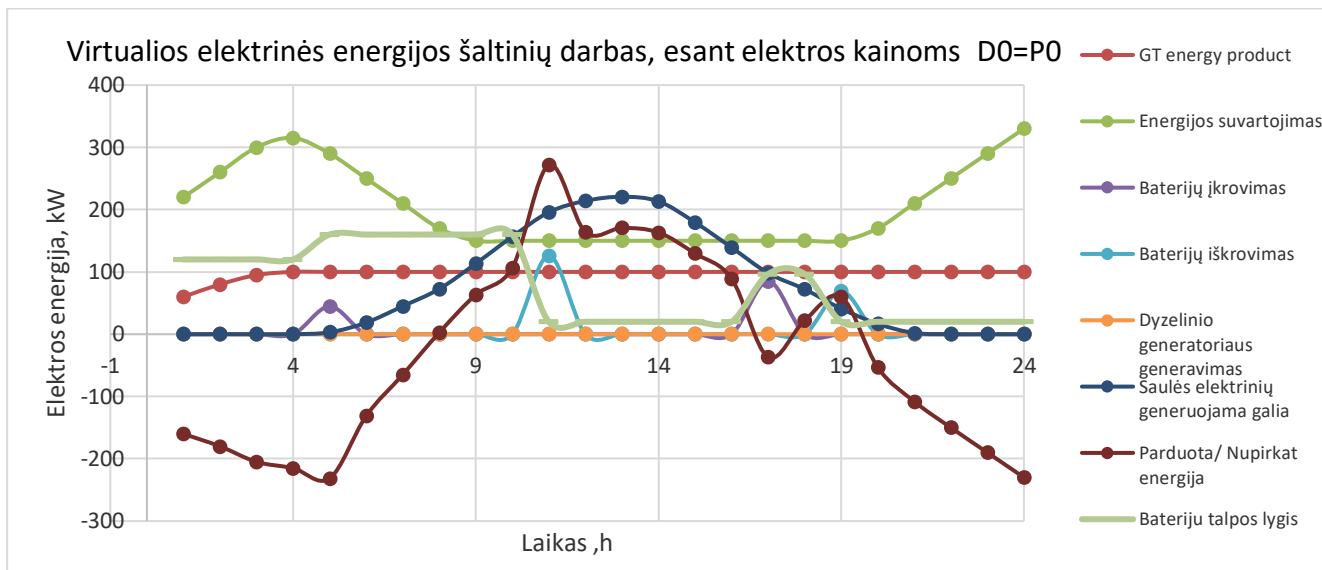
25. Gharavi H., Ghafurian R. Smart Grid: The Electric Energy System of the Future. Volume: 99, Issue: 6, June 2011. DOI: 10.1109/JPROC.2011.2124210. ISSN: 1558-2256
26. Othman M. M., Hegazy Y.G., Abdelaziz A. Y. A Review of Virtual power plant Definitions, Components, Framework and Optimization. International Electrical Engineering Journal (IEEJ). Vol. 6 (2015) No.9, pp. 2010-2024. ISSN 2078-2365
27. Garmabdari R., Moghimi M., Yang F. Battery energy storage capacity optimisation for grid-connected microgrids with distributed generators. Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2017 Australasian. 2018-02-08. DOI: 10.1109/AUPEC.2017.8282480. ISBN: 978-1-5386-2647-4
28. Zhang C., Wei Y., Cao P. Energy storage system: Current studies on batteries and power condition system. Scienc direct. Volume 82, Part 3, February 2018, Pages 3091-3106.
29. S.Ould Amrouche D.Rekioua T.Rekioua, S.Bacha. Overview of energy storage in renewable energy systems. Scienc direct. Volume 41, Issue 45, 7 December 2016, Pages 20914-20927
30. Grijalva S., Tariq U. M., Prosumer-based smart grid architecture enables a flat, sustainable electricity industry. Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2011 IEEE PES. DOI: 10.1109/ISGT.2011.5759167. ISBN: 978-1-61284-220-2
31. Morales J.M., Conejo A. J., Madsen H., Prinson P. Integrating Renewables in Electricity Markets. Springer. 2014. Vol. 205. ISBN 978-1-4614-9410-2

# PRIEDAS Nr. 1 Virtualios elektrinės elementų darbo režimai prie rinkos kainų P0-P5

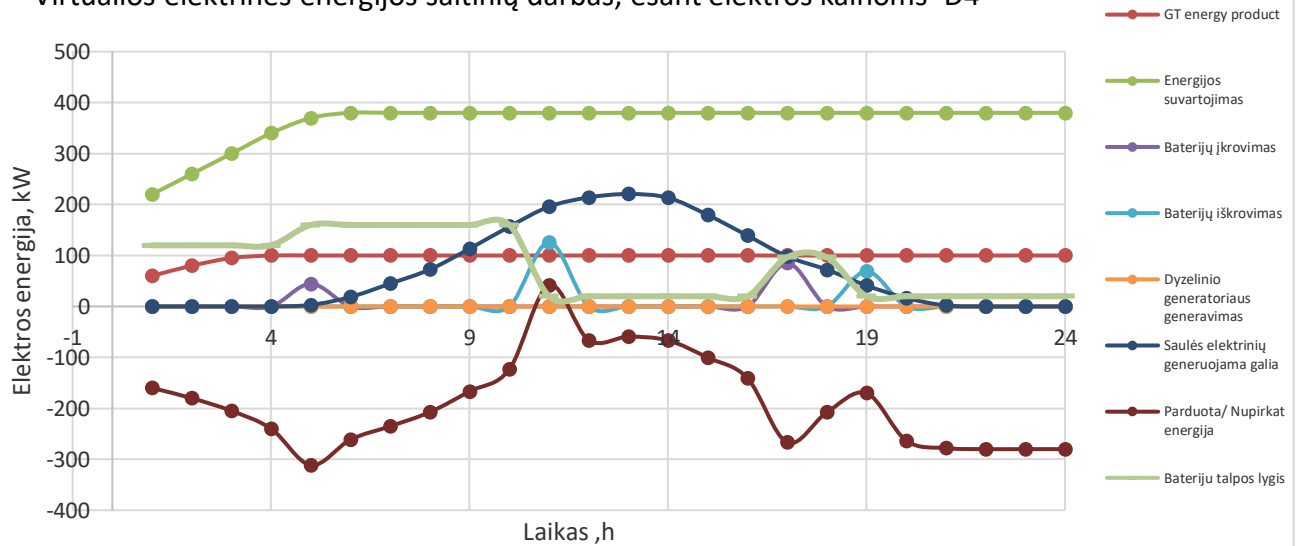




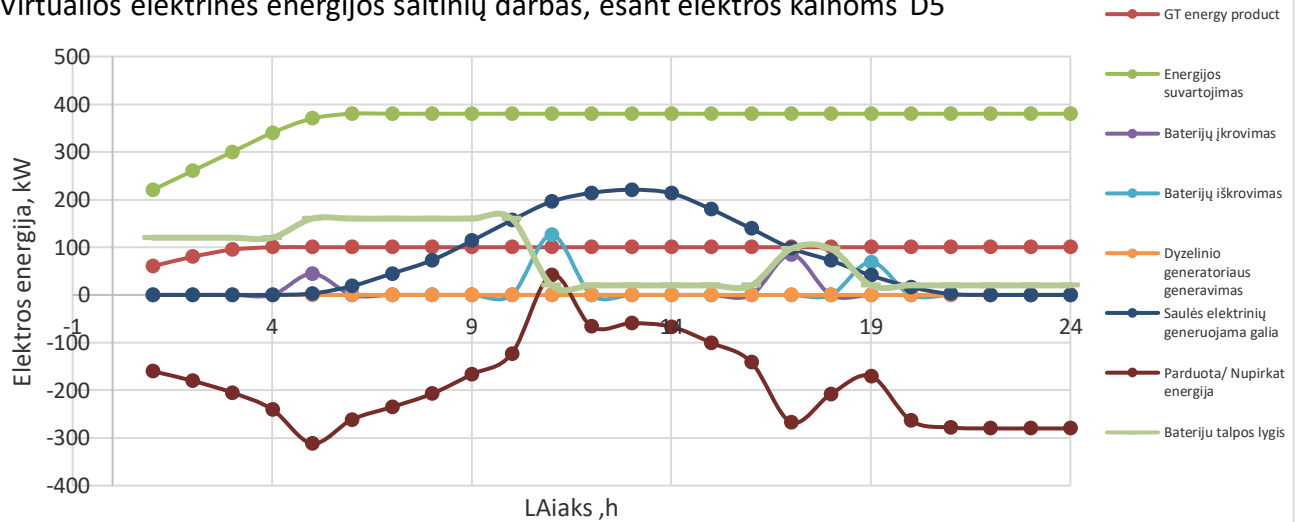
## PRIEDAS Nr.2 Virtualios elektrinės elementų darbo režimai prie rinkos kainų D0-D5



Virtualios elektrinės energijos šaltinių darbas, esant elektros kainoms D4



Virtualios elektrinės energijos šaltinių darbas, esant elektros kainoms D5

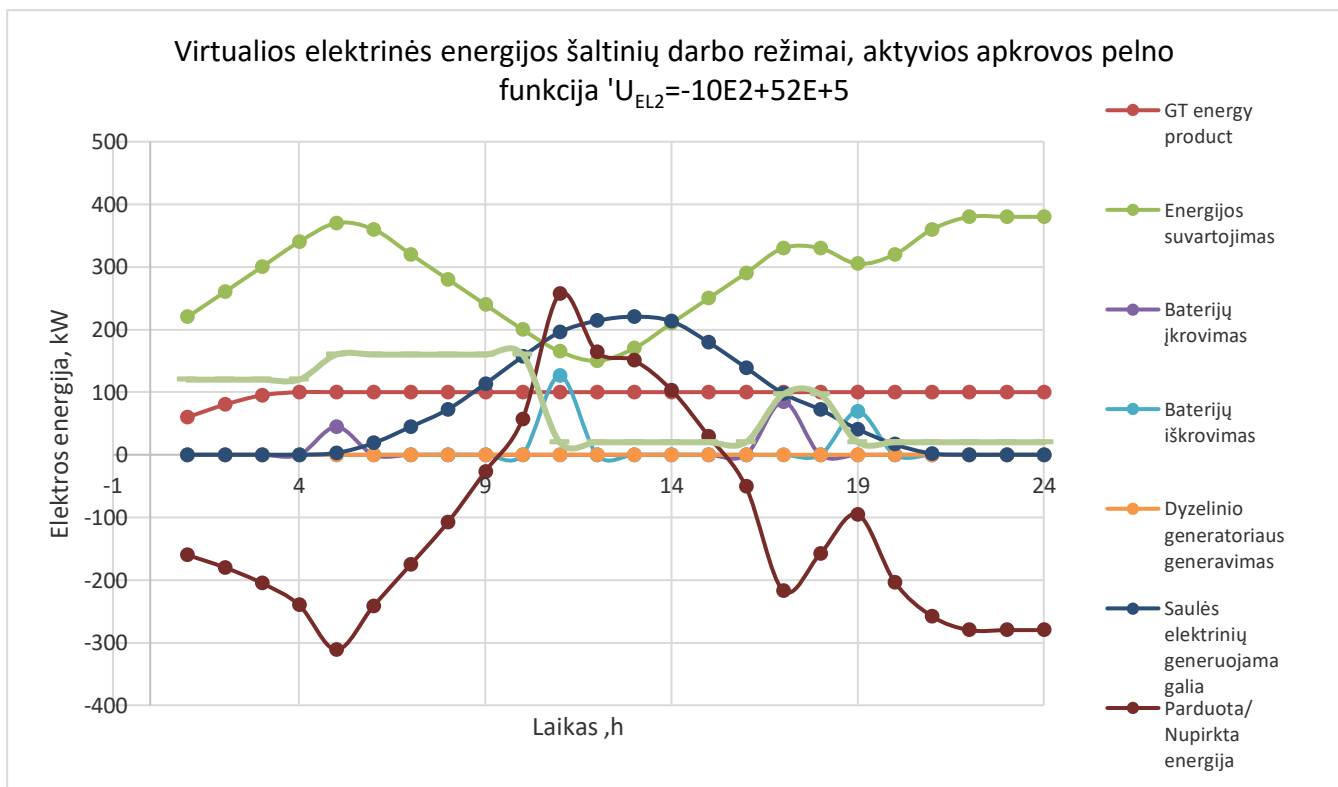
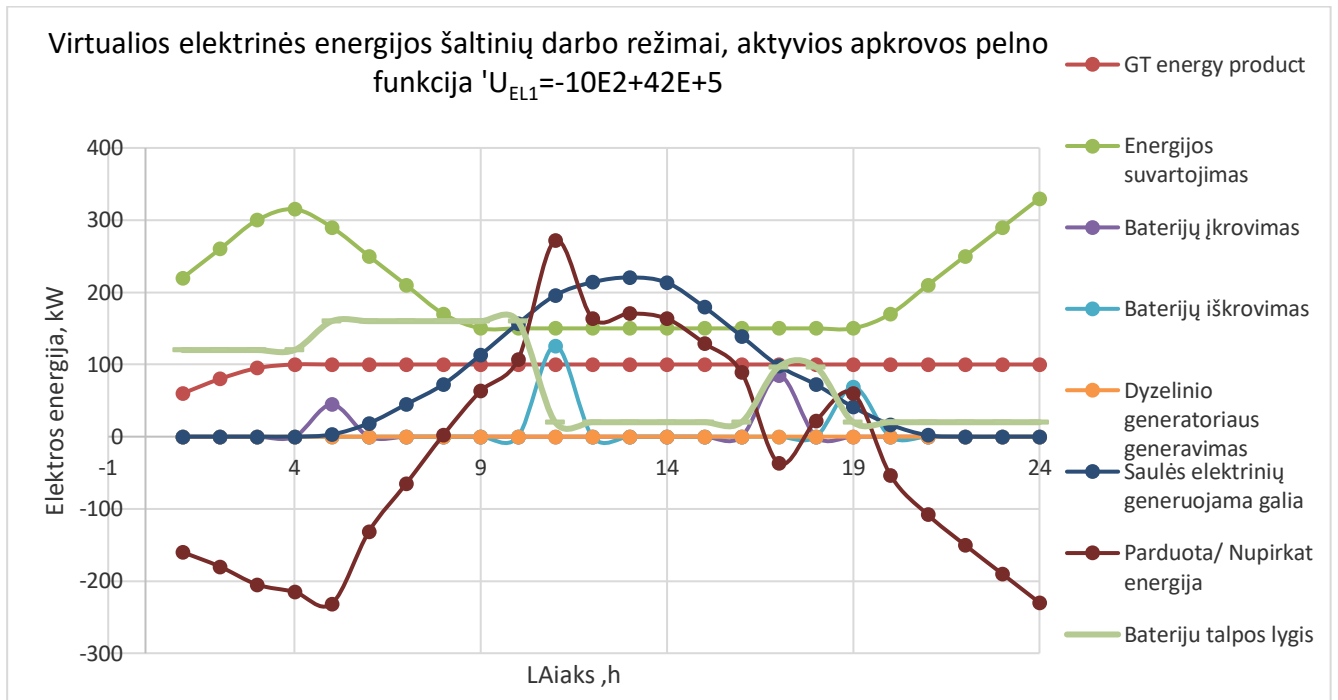


### PRIEDAS Nr. 3 Elektros rinkos kainos D0-D5

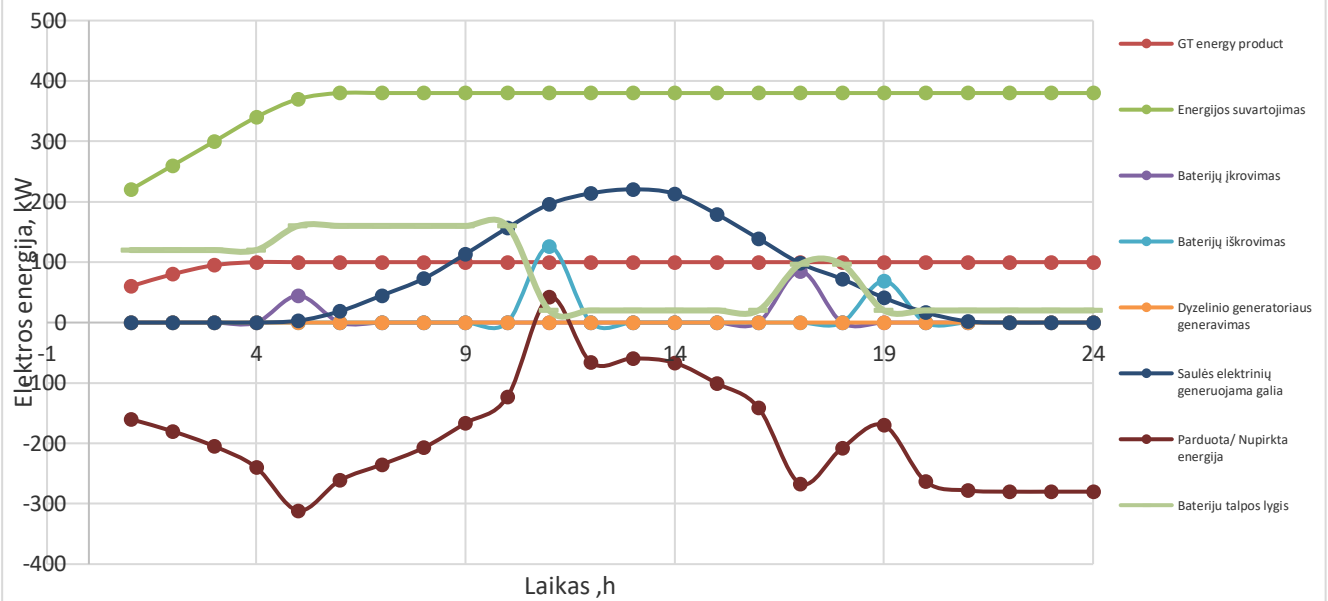
Laiko intervalas	Valandos, h	D0, €/MWh	D1 €/MWh	D2 €/MWh	D3 €/MWh	D4 €/MWh	D5 €/MWh
t1	1	30,24	27,22	24,19	21,17	18,14	15,12
t2	2	30,31	27,28	24,25	21,22	18,19	15,16
t3	3	29,04	26,14	23,23	20,33	17,42	14,52
t4	4	29,62	26,66	23,70	20,73	17,77	14,81
t5	5	29,03	26,13	23,22	20,32	17,42	14,52
t6	6	29,69	26,72	23,75	20,78	17,81	14,85
t7	7	48,84	43,96	39,07	34,19	29,30	24,42
t8	8	49,02	44,12	39,22	34,31	29,41	24,51
t9	9	50,04	45,04	40,03	35,03	30,02	25,02
t10	10	49,02	44,12	39,22	34,31	29,41	24,51
t11	11	52,01	46,81	41,61	36,41	31,21	26,01
t12	12	50,09	45,08	40,07	35,06	30,05	25,05
t13	13	48,89	44,00	39,11	34,22	29,33	24,45
t14	14	48,83	43,95	39,06	34,18	29,30	24,42
t15	15	48,87	43,98	39,10	34,21	29,32	24,44
t16	16	48,80	43,92	39,04	34,16	29,28	24,40
t17	17	34,35	30,92	27,48	24,05	20,61	17,18
t18	18	48,80	43,92	39,04	34,16	29,28	24,40
t19	19	48,85	43,97	39,08	34,20	29,31	24,43
t20	20	48,84	43,96	39,07	34,19	29,30	24,42
t21	21	35,42	31,88	28,34	24,79	21,25	17,71
t22	22	35,89	32,30	28,71	25,12	21,53	17,95
t23	23	31,66	28,49	25,33	22,16	19,00	15,83
t24	24	30,16	27,14	24,13	21,11	18,10	15,08
<b>suminės elektros kainos</b>		986,31	887,68	789,05	690,42	591,79	493,16



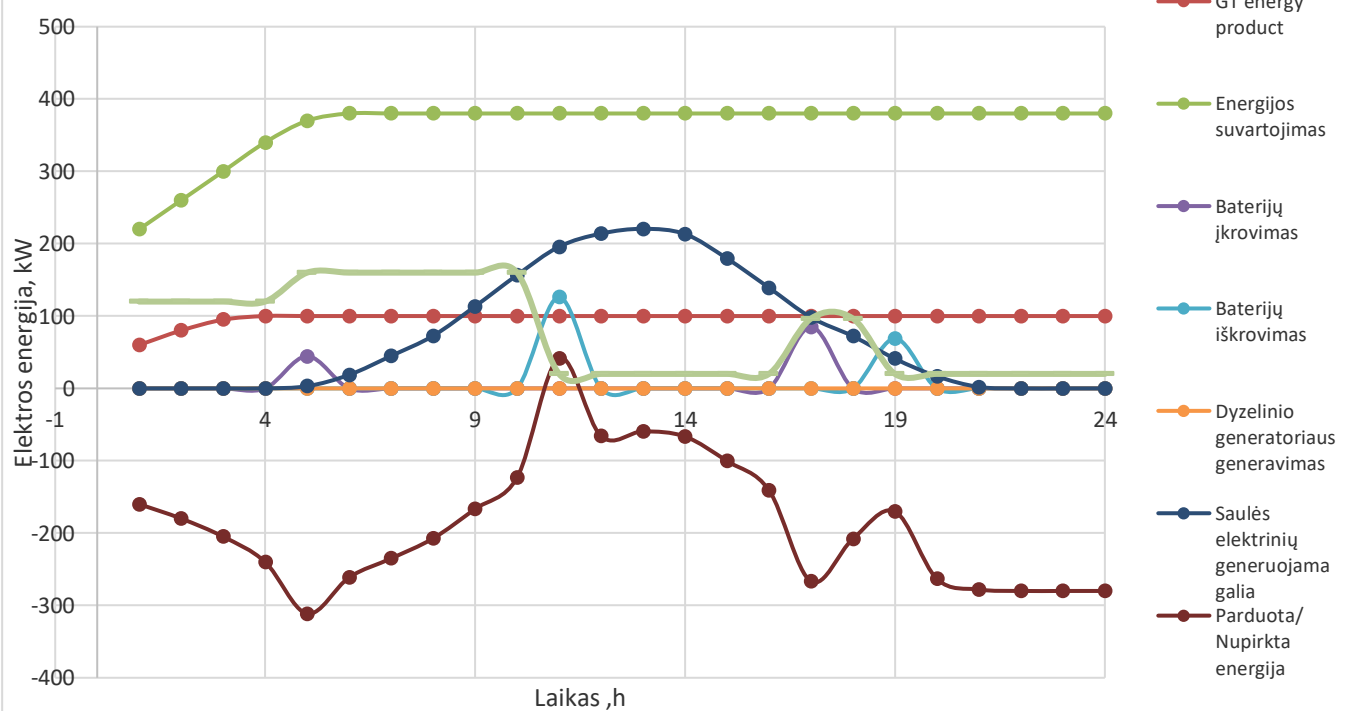
## PRIEDAS Nr. 4 Virtualios elektrinės darbo režimų kitimas, kintant $U_{EL}$ funkcijai



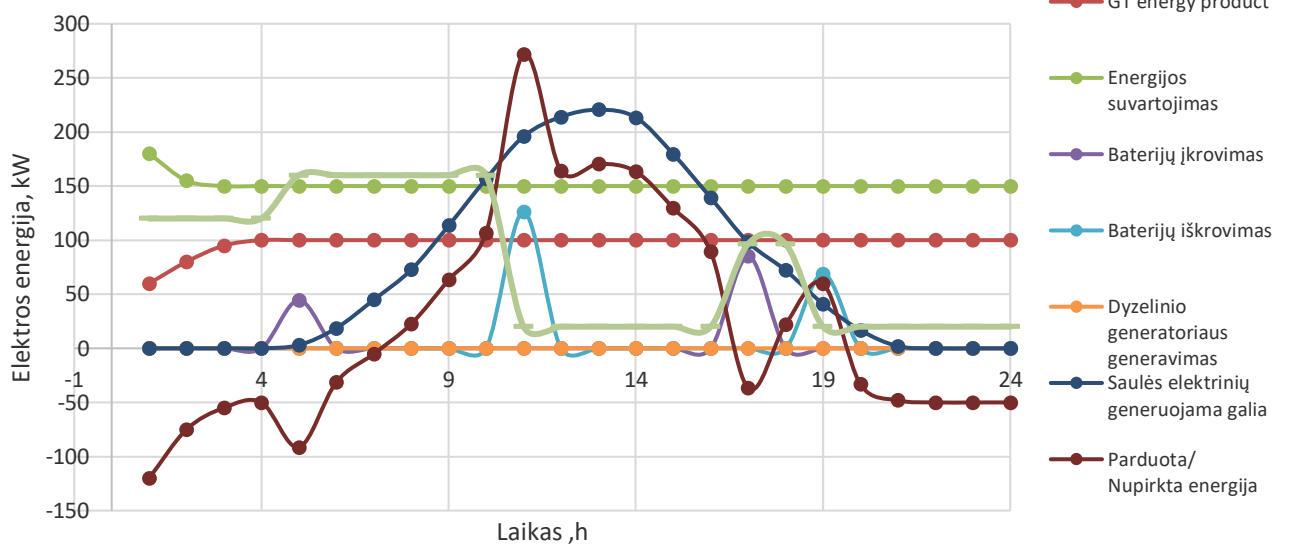
Virtualios elektrinės energijos šaltinių darbo režimai, aktyvios apkrovos pelno funkcija  $U_{EL3} - 10E2 + 62E + 5$



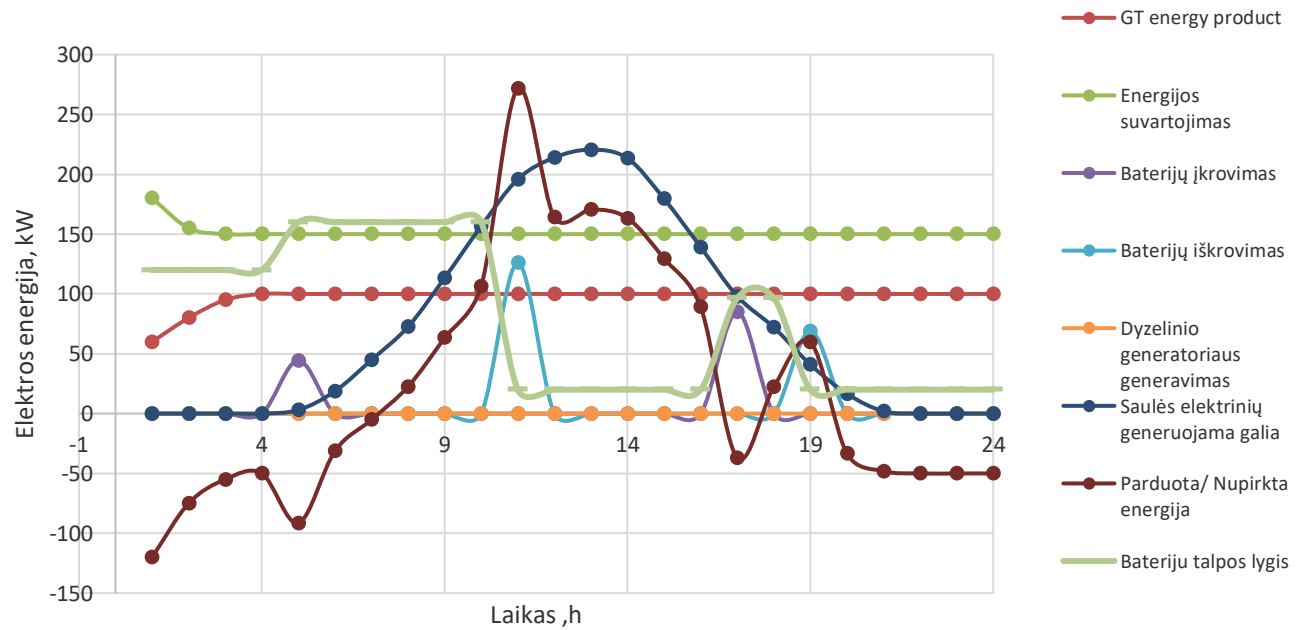
Virtualios elektrinės energijos šaltinių darbo režimai, aktyvios apkrovos pelno funkcija  $U_{EL4} - 10E2 + 72E + 5$



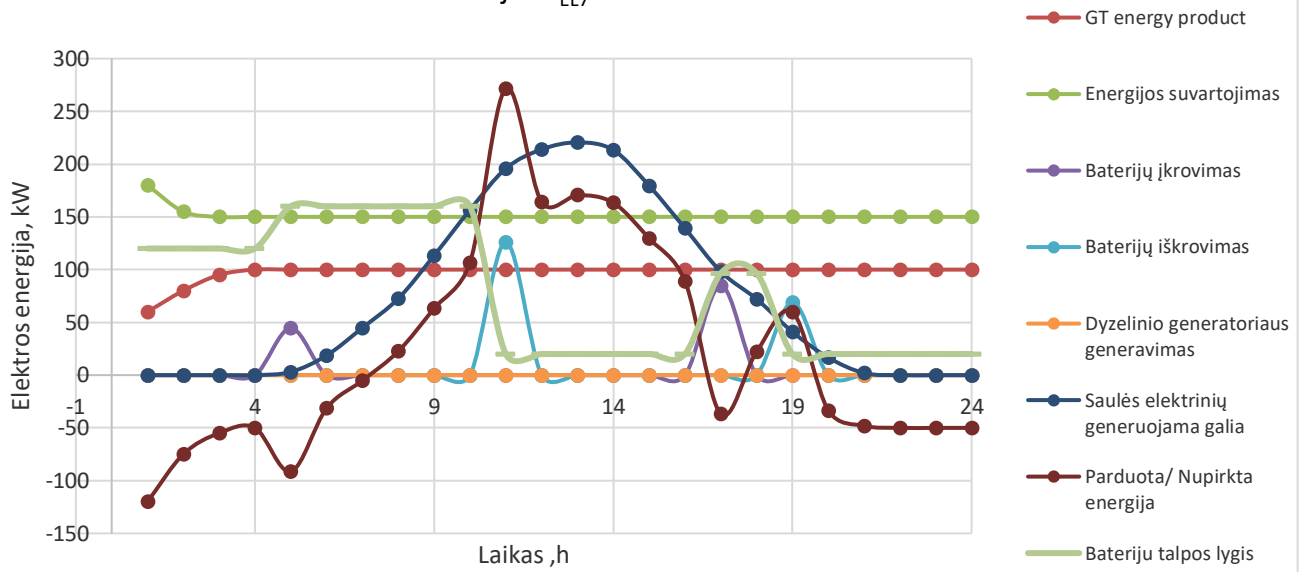
Virtualios elektrinės energijos šaltinių darbo režimai, aktyvios apkrovos pelno funkcija  $U_{EL5} = -10E2 + 32E+5$



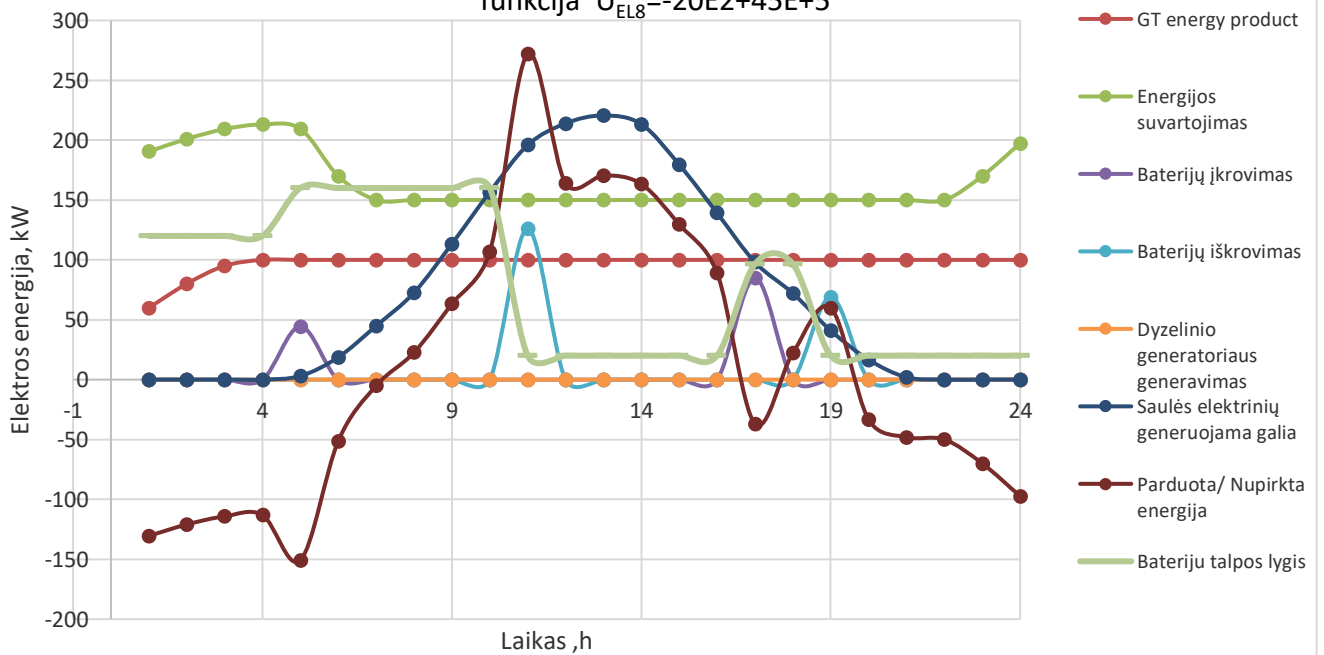
Virtualios elektrinės energijos šaltinių darbo režimai, aktyvios apkrovos pelno funkcija  $U_{EL6} = -10E2 + 22E+5$



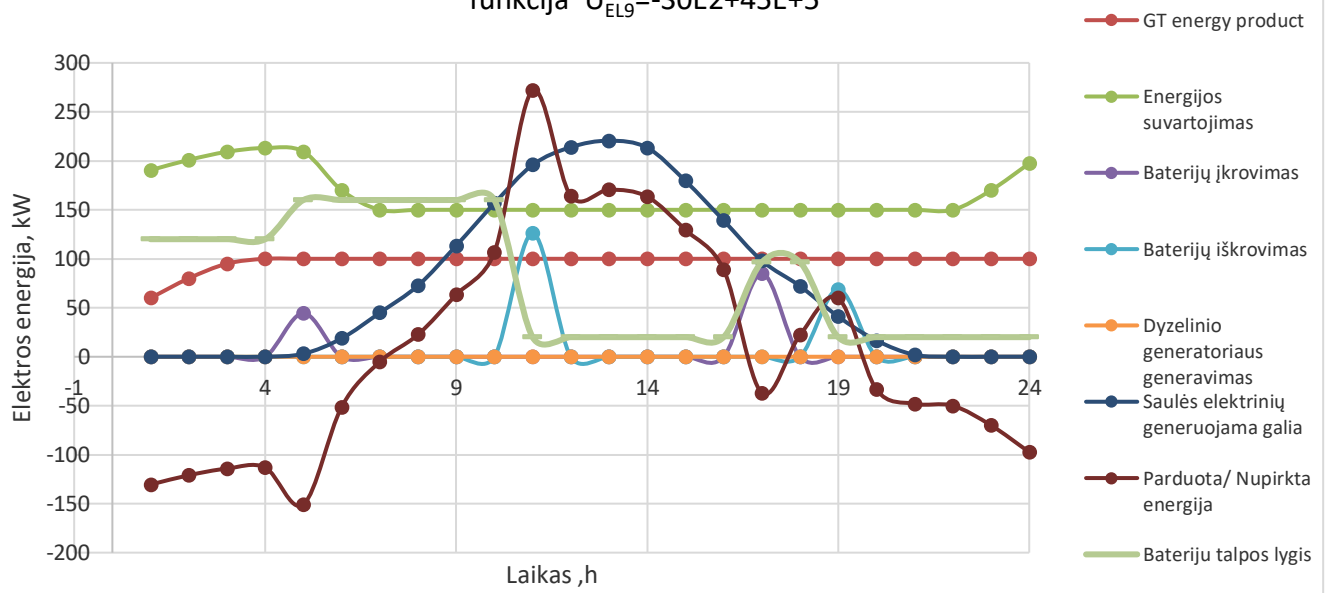
Virtualios elektrinės energijos šaltinių darbo režimai, aktyvios apkrovos pelno funkcija  $U_{EL7} = -10E2 + 12E+5$



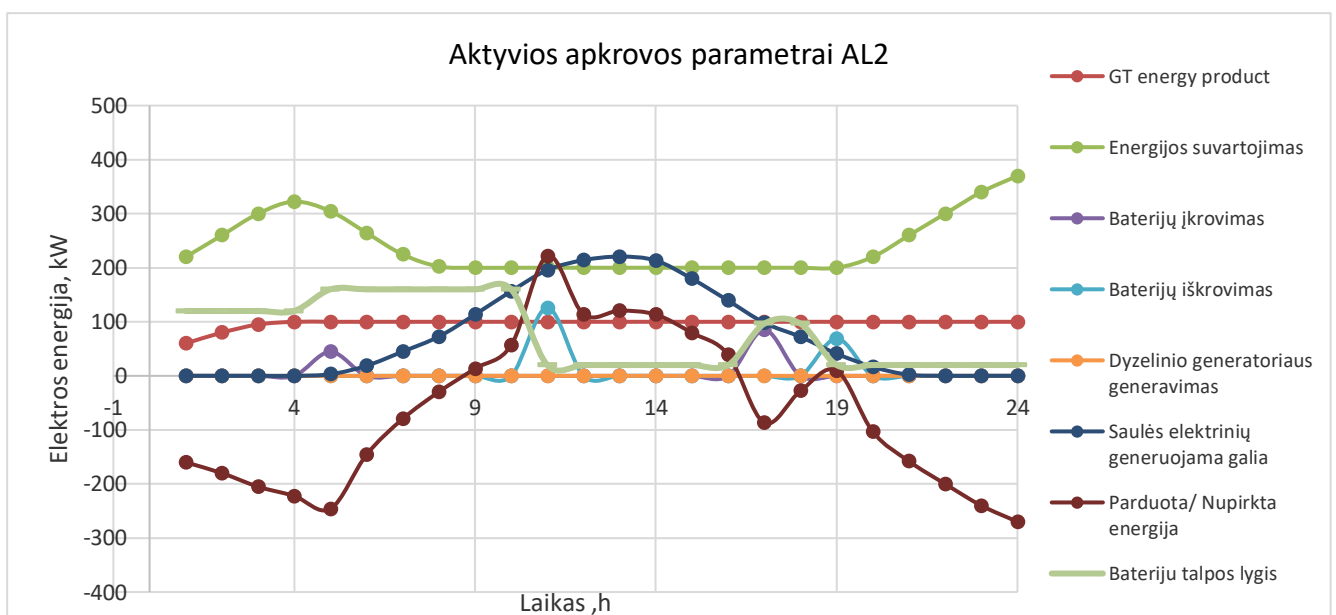
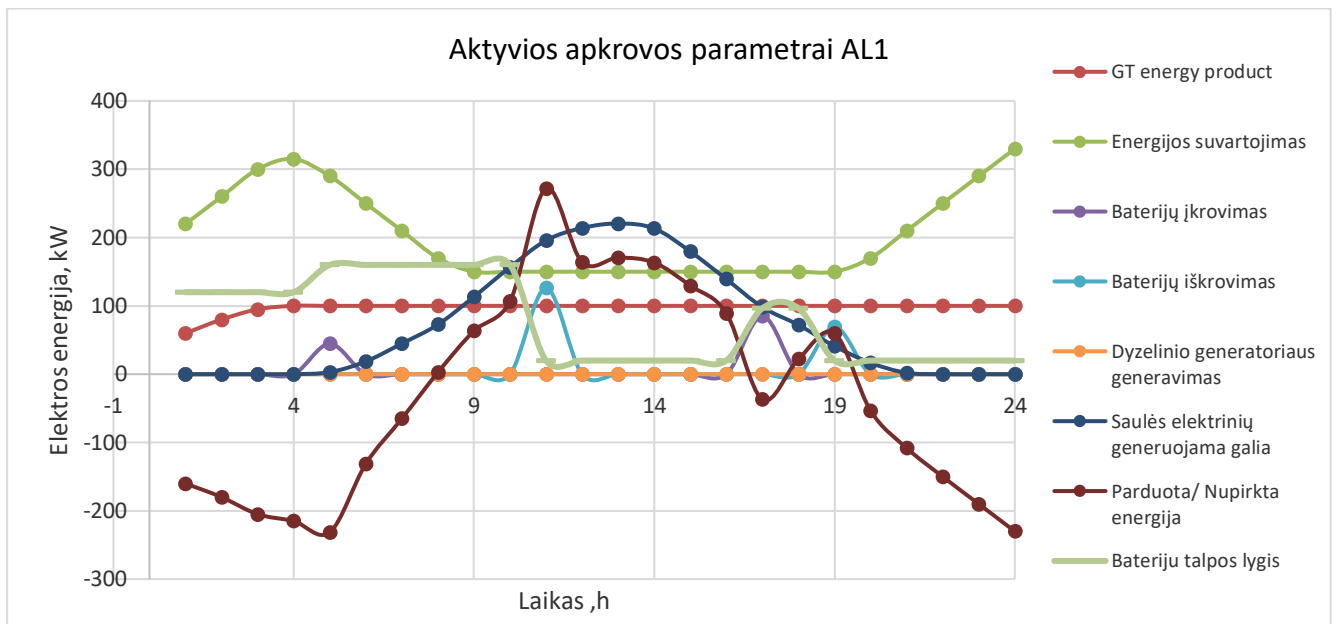
Virtualios elektrinės energijos šaltinių darbo režimai, aktyvios apkrovos pelno funkcija  $U_{EL8} = -20E2 + 45E+5$

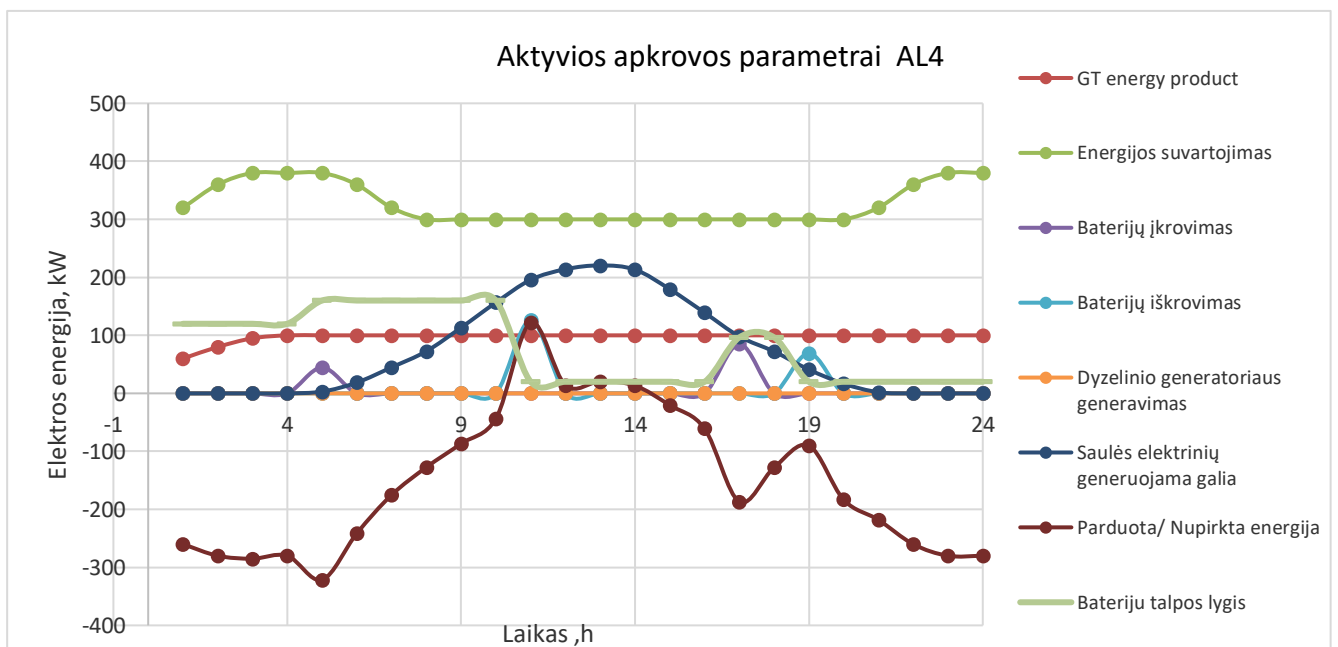
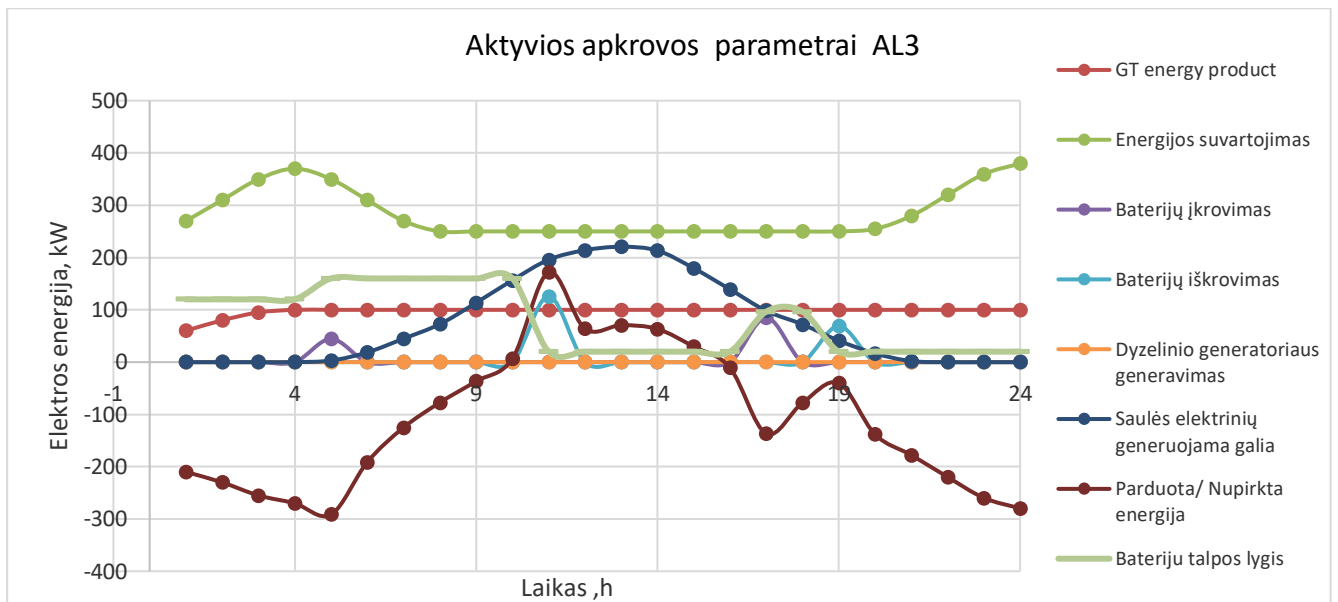


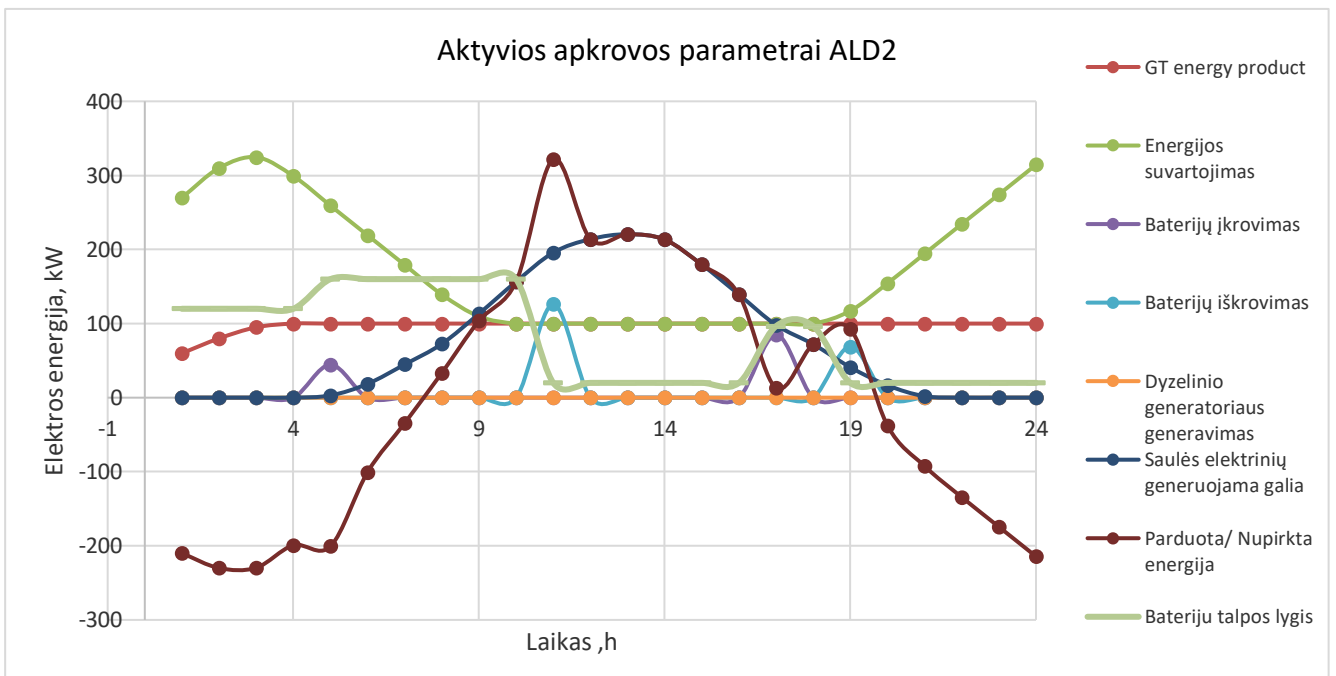
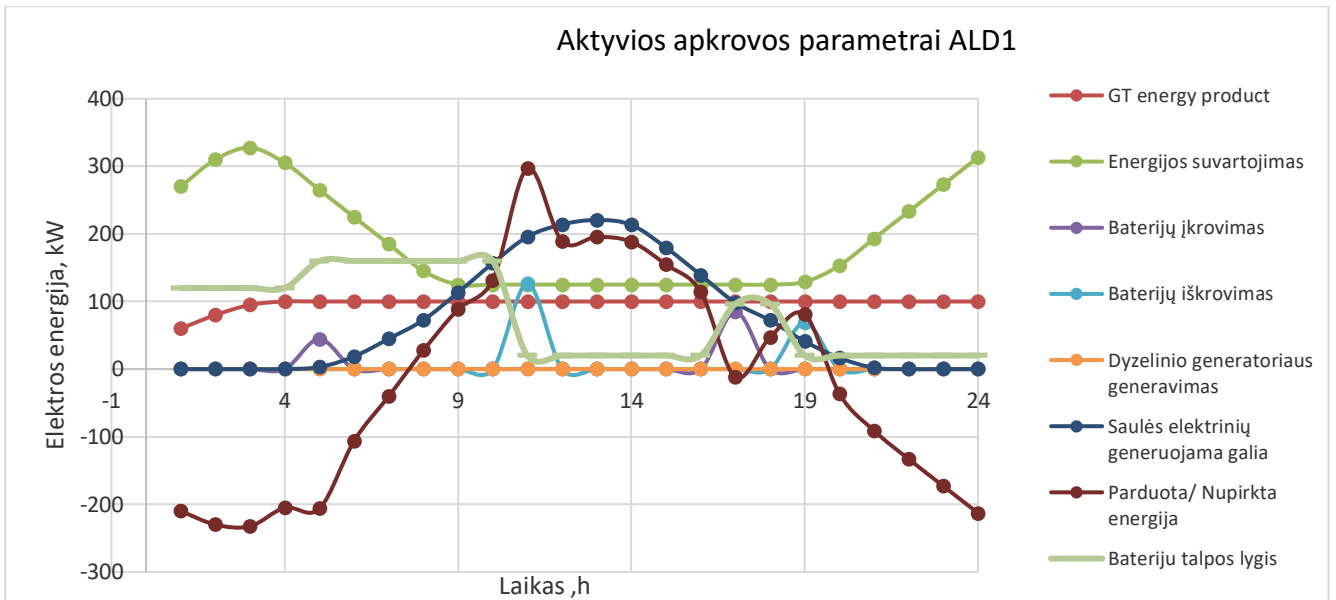
Virtualios elektrinės energijos šaltinių darbo režimai, aktyvios apkrovos pelno funkcija  $U_{EL9} = -30E^2 + 45E + 5$



## PRIEDAS NR. 5 Aktyvios apkrovos diapazono kitimo įtaka pelniui ir vartojamai energija

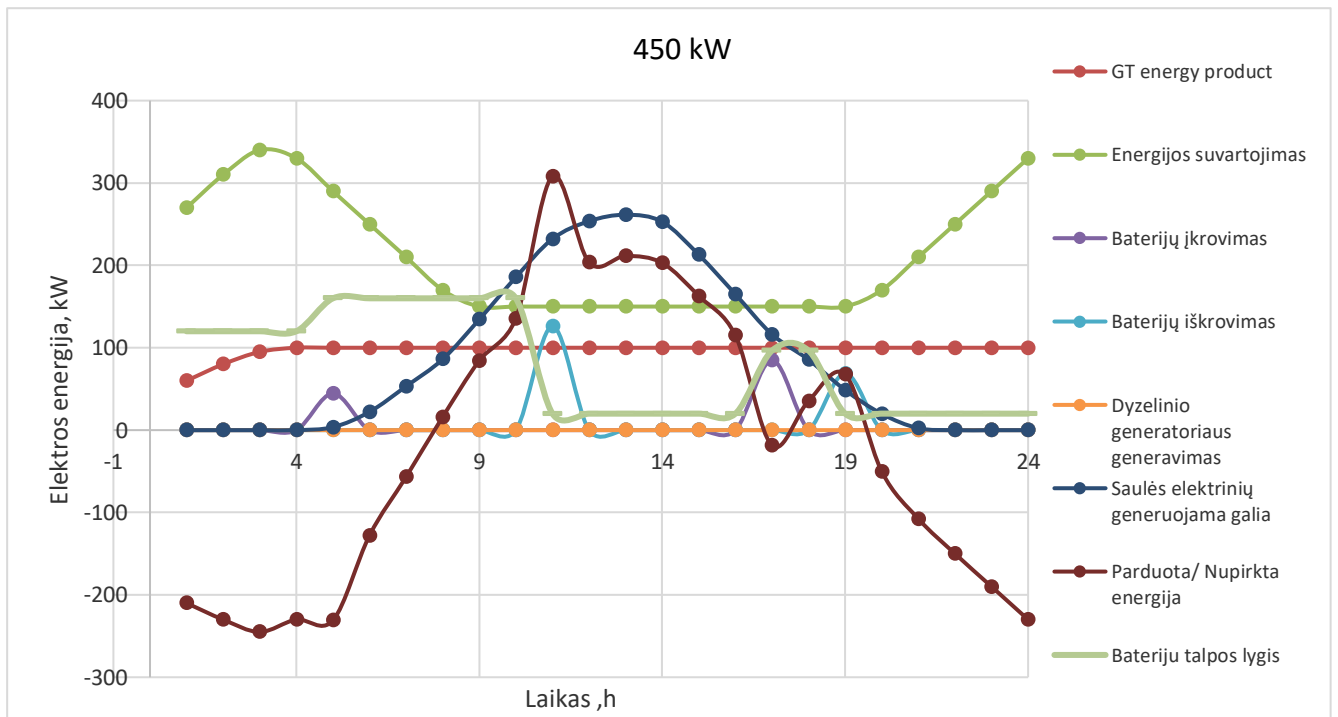
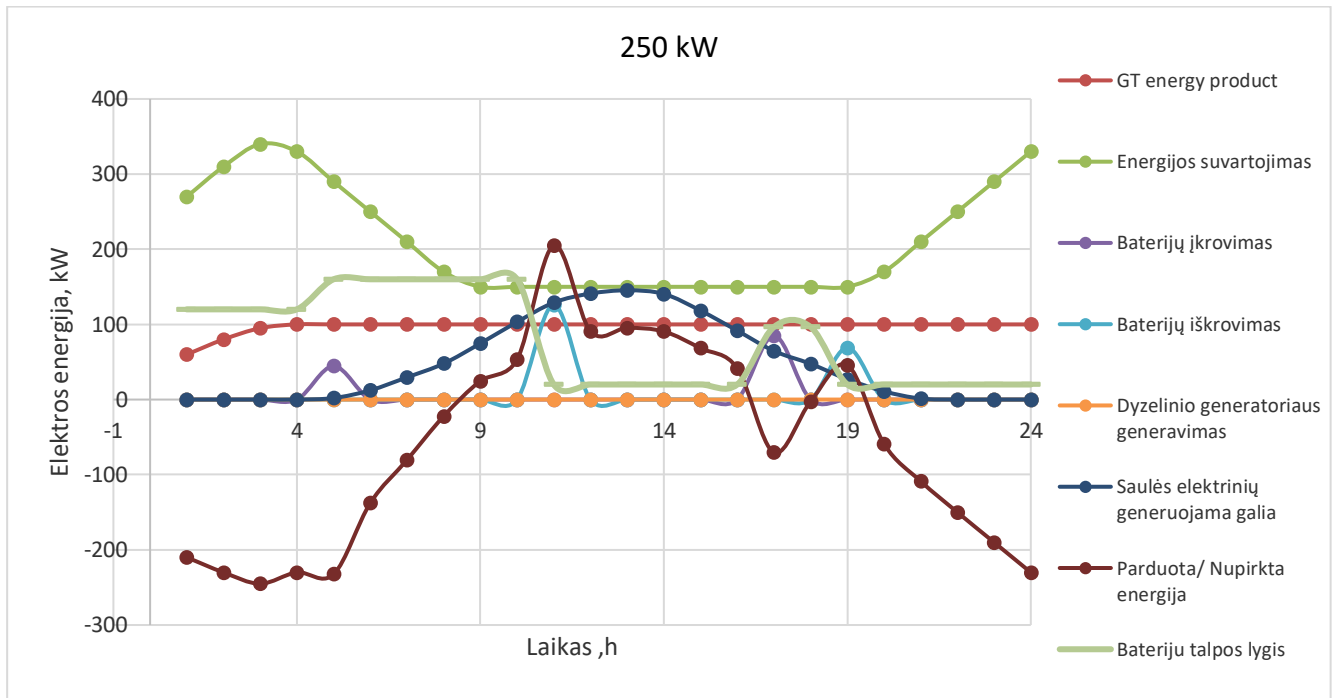


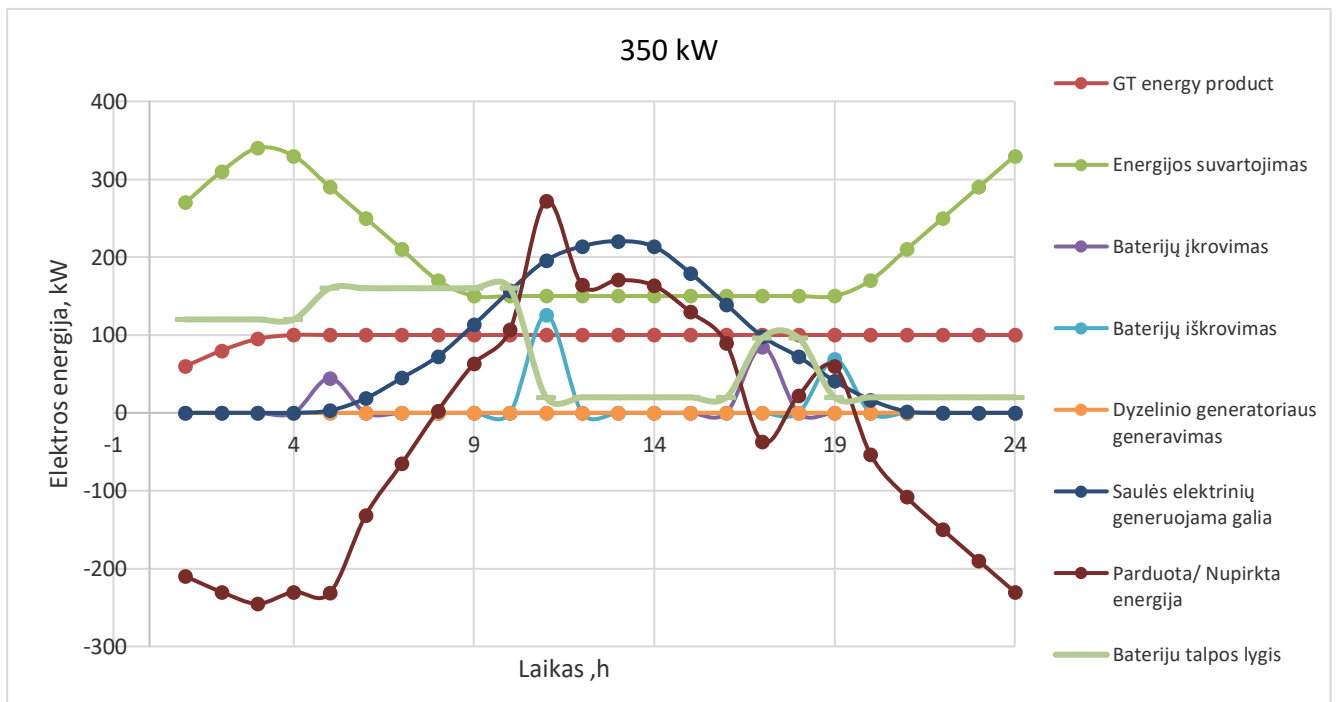
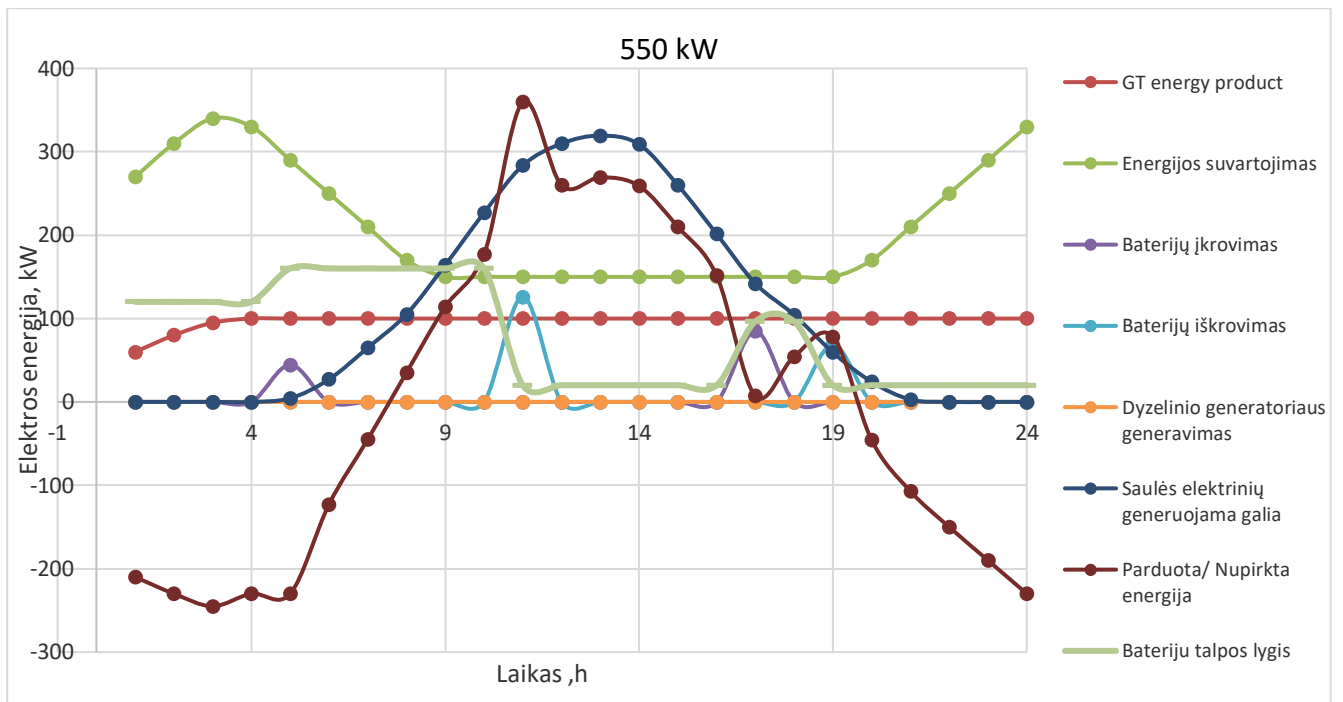






## PRIEDAS Nr. 6 Saulės jėgainės generuojamos galios kitimo įtaka pelniui



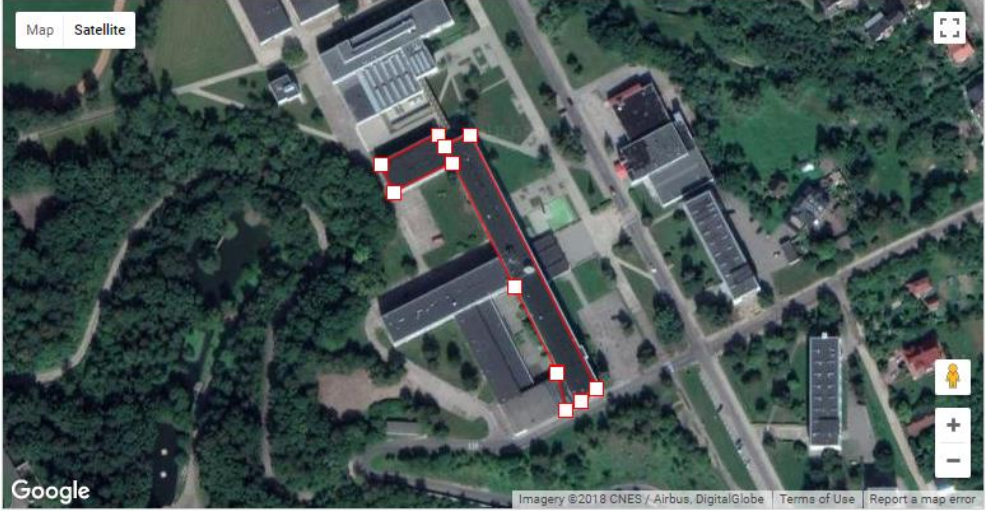


## PRIEDAS NR.7 Saulės jėginių įrengimo vietos ir užimamas plotas

### Customize Your System To Your Roof

On the map below, click the corners of the desired system. Note that the roof tilt and azimuth cannot be automatically determined from the aerial imagery, and consequently the estimated system capacity may not reflect what is actually possible.

**System Capacity: 450.4 kWdc (3002 m<sup>2</sup>)**



Map Satellite


Google Imagery ©2018 CNES / Airbus, DigitalGlobe Terms of Use Report a map error

RESET CANCEL SAVE

### Customize Your System To Your Roof

On the map below, click the corners of the desired system. Note that the roof tilt and azimuth cannot be automatically determined from the aerial imagery, and consequently the estimated system capacity may not reflect what is actually possible.

**System Capacity: 550.3 kWdc (3669 m<sup>2</sup>)**



Map Satellite

Google Imagery ©2018 CNES / Airbus, DigitalGlobe Terms of Use Report a map error

RESET CANCEL SAVE

### Customize Your System To Your Roof



On the map below, click the corners of the desired system. Note that the roof tilt and azimuth cannot be automatically determined from the aerial imagery, and consequently the estimated system capacity may not reflect what is actually possible.

**System Capacity: 250.4 kWdc (1670 m<sup>2</sup>)**



RESET

CANCEL

SAVE

## PRIEDAS NR. 8 GAMS programinės aplinkso algoritmas

### Sets

t row labels 'Time periods'

w 'Scenario index' /w1/;

### Scalar

PGmax	'Dujų turbinos galingumas '	/0.1/
PGmin	'Minimali dujų turbinos generuojama galia'	/0.03/
PGramp	'Elektros energijos generacijos kitimo greitis'	/0.02/
PG0	'Dujų turbinos generacija laiko momentu t0'	/0.05/
V0	'Dujų turbinos būsenas laiko momentu t=0'	/1/
aG	'Kvadratinės kainos funkcijos lygties koeficientas'	/6/
bG	'Tiesinės kainos funkcijos lygties koeficientas'	/7/
cG	'No-load kaštai'	/5/
SU	'Start-up kaštai'	/7/
PLmax	'Vartotojo maksimali suvartojama galia'	/0.38/
PLmin	'Vartotojo minimali suvartojama galia'	/0.15/
PLramp	'Suvartojams galios kitimo greitis'	/0.04/
PL0	'Vartotojo galios poreikis t=0 momentu'	/0.25/
MinCon	'Bednra minimalus energijos suvartojimas'	/0.25/
aL	'Kvadratinės lygties koficientas '	/-10/
bL	'Tiesinės lygties koficientas '	/42/
cL	'Funkcijos konstanta'	/5/
ESmax	'PSP equivalent energy capacity'	/0.16/
ESmin	'PSP minimum storage level'	/0.020/
ES0	'PSP initial storage level'	/0.12/
PSmax	'PSP charging power limit'	/0.085/
PSdmax	'PSP discharging power limit'	/0.14/
eff	'PSP efficiency'	/0.90/

Cdiesel 'Generating cost of the diesel set' /75/  
MaxDiesel 'Capacity of the diesel set' /0.150/;

#### Parameters

pi(w) 'Scenario probability' /  
w1 1  
/

price(t);

\$onecho > tasks.txt

dset=t rng=a1 rdim=1

par=price rng=Sheet1!a1 rdim=1

\$offecho

\$call GDXXRW indata.xlsx trace=3 @tasks.txt

\$GDXIN indata.gdx

\$LOAD t

\$LOAD price

\$GDXIN

\$call GDXXRW results.xlsx trace=3 par=PVoutput rng=sheet1!A1

Parameter

PVoutput(t,w) 'PV power output scenarios, duomenys importuojami is excel'

\$GDXIN results.gdx

\$LOAD PVoutput

\$GDXIN

#### Variables

rho 'Maksimalaus pelno funkcija'

PD(t) 'Energija parduota(>0) arba nupirka (<0) rinkoje';

#### Positive variables

CSU(t,w) 'GT start-up cost'

PG(t,w) 'GT power output'

$EG(t,w)$  'GT energy production'  
  
 $PL(t,w)$  'Gear factory load consumption'  
 $EL(t,w)$  'Gear factory energy consumption'  
  
 $ES(t,w)$  'PSP storage level'  
 $PSc(t,w)$  'PSP power charge'  
 $PSd(t,w)$  'PSP power discharge'  
 $EGdiesel(t,w)$  'Electricity generated by the diesel set'  
 $PWcurt(t,w)$  'PV generation curtailment';

#### Binary variables

$v(t,w)$  'On-off status of the GT unit';  
 $PL.up(t,w)=PLmax;$   
 $PL.lo(t,w)=PLmin;$   
 $PSc.up(t,w)=PScmax;$   
 $PSd.up(t,w)=PSdmax;$   
 $ES.up(t,w)=ESmax;$   
 $ES.lo(t,w)=ESmin;$   
 $EGdiesel.up(t,w)=MaxDiesel;$   
 $PWcurt.up(t,w)=PVoutput(t,w);$

#### Equations

$Obj$  'Objective function'  
 $EB(t,w)$  'Energy balance'  
  
 $GLup(t,w)$  'GT capacity limit'  
 $GLlo(t,w)$  'GT minimum power output'  
 $SUC0(w)$  'Start-up cost definition ( $t = 1$ )'  
 $SUC(t,w)$  'Start-up cost definition'  
 $GRL0up(w)$  'GT ramping limits ( $t = 1$  upward)'  
 $GRLup(t,w)$  'GT ramping limits (upward)'

GRL0dn(w) 'GT ramping limits (t = 1 downward)'

GRLdn(t,w) 'GT ramping limits (downward)'

GPE0(w) 'GT power-energy equivalence (t = 1)'

GPE(t,w) 'GT power-energy equivalence'

LRLup0(w) 'Gear factory ramping limits (t = 1 upward)'

LRLup(t,w) 'Gear factory ramping limits (upward)'

LRLdn0(w) 'Gear factory ramping limits (t = 1 downward)'

LRLdn(t,w) 'Gear factory ramping limits (downward)'

LPE0(w) 'Gear factory power equivalence (t = 1)'

LPE(t,w) 'Gear factory power equivalence'

MEC(w) 'Gear factory minimum energy consumption'

STE0(w) 'PSP state-transition function (t = 1)'

STE(t,w) 'PSP state-transition function';

Obj..rho =e= sum(t, Price(t)\*PD(t)) +sum(w,  
pi(w)\*sum(t,-aG\*EG(t,w)\*EG(t,w) - bG\*EG(t,w) - cG\*v(t,w)  
+ aL\*EL(t,w)\*EL(t,w) + bL\*EL(t,w) + cL - CSU(t,w)  
- Cdiesel\*EGdiesel(t,w)));

EB(t,w)..EG(t,w)+EGdiesel(t,w)+PVoutput(t,w)-PWcurt(t,w)  
+PSd(t,w)=e=EL(t,w)+PSc(t,w)+PD(t);

GLup(t,w)..PG(t,w)=l=PGmax \* v(t,w);

GLlo(t,w)..PG(t,w)=g=PGmin \* v(t,w);

SUC0(w)..CSU('t1',w)=g=SU\*(v('t1',w)-V0);

SUC(t,w)\$(ord(t) GT 1).. CSU(t,w)=g=SU\*(v(t,w)-v(t-1,w));

GRL0up(w)..PG('t1',w)-PG0=l=PGramp;

GRLup(t,w)\$(ord(t) GT 1)..PG(t,w)-PG(t-1,w)=l=PGramp;

GRL0dn(w)..PG0-PG('t1',w)=l=PGramp;

GRLdn(t,w)\$(ord(t)GT 1)..PG(t-1,w)-PG(t,w)=l=PGramp;

GPE0(w).. (PG0 + PG('t1',w))/2=e=EG('t1',w);

GPE(t,w)\$(ord(t)GT 1)..(PG(t-1,w) + PG(t,w))/2=e=EG(t,w);



```

LRLup0(w)..PL('t1',w)-PL0=l=PLramp;
LRLup(t,w)$(ord(t)GT 1)..PL(t,w)-PL(t-1,w)=l=PLramp;
LRLdn0(w)..PL0-PL('t1',w)=l=PLramp;
LRLdn(t,w)$(ord(t)GT 1)..PL(t-1,w)-PL(t,w)=l=PLramp;
LPE0(w)..(PL0+PL('t1',w))/2=e=EL('t1',w);
LPE(t,w)$(ord(t)GT 1)..(PL(t-1,w)+PL(t,w))/2=e=EL(t,w);
MEC(w)..sum(t,EL(t,w))=g=MinCon;

```

```

STE0(w)..ES('t1',w)=e=ES0+eff*PSc('t1',w)
- (1/eff) * PSd('t1',w);
STE(t,w)$(ord(t)GT 1)..ES(t,w)=e=ES(t-1,w)+eff*PSc(t,w)
- (1/eff)*PSd(t,w);

```

Model StochStrategy /all/;

```

OPTION iterlim=1e8;
OPTION reslim=1e10;
OPTION miqcp=cplex;

```

StochStrategy.optcr=0;

Solve StochStrategy maximizing rho using miqcp;

Display price, rho.L ,PD.L, ES.L, PG.L, CSU.L, PG.L, EG.L, PL.L, EL.L, PSc.L, PSd.L, EGdiesel.L, PWcurt.up;

\*=== Export to Excel using GDX utilities

\*=== First unload to GDX file (occurs during execution phase)

```

execute_unload "rho.gdx" rho.L PD.L ES.L PG.L CSU.L PG.L EG.L PL.L EL.L PSc.L PSd.L
EGdiesel.L PWcurt.up price

```

\*=== Now write to variable levels to Excel file from GDX

\*=== Since we do not specify a sheet, data is placed in first sheet

```

execute 'gdxxrw.exe rho.gdx o=rho.xls var=rho.L rng=pelnas!a1'

```

\*=== Write marginals to a different sheet with a specific range  
execute 'gdxxrw.exe rho.gdx o=rho.xls var=PD.L rng=Energysold!a1'

\*=== Write marginals to a different sheet with a specific range  
execute 'gdxxrw.exe rho.gdx o=rho.xls var=price rng=Price!a1'

\*=== Write marginals to a different sheet with a specific range  
execute 'gdxxrw.exe rho.gdx o=rho.xls var=ES.L rng=ESlevel!a1'

\*=== Write marginals to a different sheet with a specific range  
execute 'gdxxrw.exe rho.gdx o=rho.xls var=PG.L rng=GTpoweroutput!a1'

\*=== Write marginals to a different sheet with a specific range  
execute 'gdxxrw.exe rho.gdx o=rho.xls var=CSU.L rng=GTstart-upcost!a1'

\*=== Write marginals to a different sheet with a specific range  
execute 'gdxxrw.exe rho.gdx o=rho.xls var=PG.L rng=GTpoweroutput!a1'

\*=== Write marginals to a different sheet with a specific range  
execute 'gdxxrw.exe rho.gdx o=rho.xls var=EG.L rng=GTenergyProdn!a1'

\*=== Write marginals to a different sheet with a specific range  
execute 'gdxxrw.exe rho.gdx o=rho.xls var=PE.L rng=GFloadconsumption!a1'

\*=== Write marginals to a different sheet with a specific range  
execute 'gdxxrw.exe rho.gdx o=rho.xls var=EL.L rng=factoryenergycon!a1'

\*=== Write marginals to a different sheet with a specific range  
execute 'gdxxrw.exe rho.gdx o=rho.xls var=PSc.L rng=ChargingBatt!a1'

\*=== Write marginals to a different sheet with a specific range  
execute 'gdxxrw.exe rho.gdx o=rho.xls var=PSd.L rng=DischargingBatt!a1'

\*=== Write marginals to a different sheet with a specific range  
execute 'gdxxrw.exe rho.gdx o=rho.xls var=EGdiesel.L rng=DieselEner!a1'

\*=== Write marginals to a different sheet with a specific range  
execute 'gdxxrw.exe rho.gdx o=rho.xls var=PWcurt.up rng=PWoutput!a1'

\*=== Write marginals to a different sheet with a specific range  
execute 'gdxxrw.exe rho.gdx o=rho.xls var=price rng=kaina'