



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Fotovoltinės saulės elektrinės ir elektros energijos kaupimo sistemos optimizavimo tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Tomas Povilaitis

Projekto autorius

Doc. Gytis Svinkūnas

Vadovas

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Fotovoltinės saulės elektrinės ir elektros energijos kaupimo sistemos optimizavimo tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

Tomas Povilaitis

Projekto autorius

Doc. Gytis Svinkūnas

Vadovas

Lekt. Roma Račkienė

Recenzentė

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Tomas Povilaitis

Fotovoltinės saulės elektrinės ir elektros energijos kaupimo sistemos optimizavimo tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasis Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs;
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Tomas Povilaitis

Patvirtinta elektroniniu būdu

Povilaitis, Tomas. Fotovoltinės saulės elektrinės ir elektros energijos kaupimo sistemos optimizavimo tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Gytis Svinkūnas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): elektros inžinerija, inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: Fotovoltinė saulės elektrinė, elektros energijos kaupimo sistema, optimizavimo tyrimas.

Kaunas, 2023 Number of pages – 59

Santrauka

Keičiantis saulės apšviestumui fotovoltinių saulės elektrinių galia taip pat svyruoja. Saulės apšvietai padidėjus, didėja tinklo apkrovos ir leistina įtampa gali viršyti leistinas ribas, dėl ko gali nustoti veikti saulės inverteriai ir kiti elektros įrenginiai. Perteklinę energiją galima sukaupti energijos kaupimo sistemose ir panaudoti po saulėlydžio arba kai saulės spinduliuojama energija yra maža.

Šiame darbe modeliuojama saulės elektrinės ir elektros energijos kaupimo sistemos optimalių parametru parinkimas, elektros energijos valdymas pagal vidaus tinklo apkrovas, gauti rezultatai patikrinami eksperimentu.

Tiriamąjame dalyje yra apskaičiuoti saulės elektrinės ir elektros energijos kaupimo sistemos parametrai. Skaičiavimas panaudoti šie duomenys: saulės spindulių energijos duomenys Kauno mieste, individualaus gyvenamojo namo elektros energijos sunaudojimo duomenys, eksperimentinės saulės elektrinės ir elektros energijos kaupimo sistemos generuojamos ir sukauptos energijos duomenys.

Eksperimentinėje dalyje buvo patikrintas sumažintas saulės elektrinė ir elektros energijos kaupimo sistemos modelis. Sukaupti pagamintos ir sunaudotos elektros energijos duomenys. Išbandyta programos valdymo algoritmas pagal vartotojo elektros energijos poreikius ir apkrovas.

Ekonominėje dalyje yra apskaičiuota saulės elektrinės ir dviejų skirtingų elektros energijos kaupimo sistemų finansinė nauda.

Darbo tikslas – sukurti saulės elektrinės ir energijos kaupimo sistemos optimalių parametru parinkimo ir valdymo modelį pagal vartotojo energijos poreikius ir apkrovas.

Darbo uždaviniai – atlikti mokslinės literatūros apie saulės elektrinės ir elektros energijos kaupimo sistemas, veikimo principus, atlikti jų analizę, pritaikyti modeliavimo programoje bei pateikti tyrimo rezultatų analizę ir išvadas.

Povilaitis, Tomas. Research of Optimisation of Photovoltaic Solar Power Plant and Energy Storage System. Master's Final Degree Project / supervisor assoc. prof. dr. Gytis Svinkūnas; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): electrical engineering, engineering science.

Keywords: Photovoltaic solar power plant, electricity energy storage system, optimization study.

Kaunas, 2023. Number of pages – 59

Summary

The output of photovoltaic solar power plants also fluctuates as sunlight changes. As sunlight increases, grid loads increase and allowable voltages may exceed allowable limits, causing solar inverters and other electrical equipment to stop working. Excess energy can be stored in energy storage system and used after sunset or when the energy of sunlight is low.

In this paper work, optimal solar power plant and electricity energy storage system parameters and control are modeled according to the electricity energy demand and electricity power load.

The parameters of the solar power plant and electricity storage system are calculated in the research part. The following data were used in the calculation: solar energy data in the city of Kaunas, electricity consumption data of an individual residential building, energy data generated and stored by the experimental solar power plant and electricity storage system.

In the experimental part, a reduced model of the solar power plant and the electricity storage system was tested. Accumulated data of produced and consumed electricity. The program control algorithm was tested according to the user's electricity needs and loads.

In the economic part, the financial benefits of the solar power plant and two different electricity storage systems are calculated.

The conclusions of the study contain a summary of the results.

The aim of the work is to create a model for selecting and controlling the optimal parameters of the solar power plant and energy storage system.

The tasks of the work are to carry out the scientific literature on solar power plant and electricity storage systems, the principles of their operation, analyze them, apply them in the modeling program and present the analysis and conclusions of the research results.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų ir terminų sąrašas	10
Įvadas.....	12
1 Informacinių šaltinių analizė.....	13
1.1 Fotovoltinio elemento ekvivalentinė schema ir I-V kreivės taškai	13
1.2 Saulės spindulių energija.....	14
1.3 Fotovoltinių modulių tipai.....	18
1.4 Fotovoltiniai moduliai su saulės sekimo sistema	20
1.5 Fotovoltinės elektrinės parametrų skaičiavimas.....	21
1.6 Fotovoltinių modulių maksimalios galios sekimo algoritmas.....	22
1.7 Įtampos ir srovės keitikliai	23
1.8 Elektros energijos kaupimo sistemos	25
1.9 PV ir akumuliatoriaus įkrovimo valdymas pagal apšviestumo prognozę ir tinklo apkrovą.....	33
1.10 Optimalus akumuliatoriaus talpos parinkimas ir valdymas.....	34
2 Tiriamoji dalis.....	37
2.1 Energijos poreikio analizė	37
2.2 Saulės elektrinės instaliuotos galios skaičiavimas	39
2.3 Energijos kaupimo sistemos parametrų skaičiavimas	41
2.4 Nuolatinės ir kintamosios srovės laidininkų įtampos kritimo ir nuostolių skaičiavimas	42
2.5 Ekonominė dalis	46
2.5.1 Saulės elektrinės 3,9 kWp ir energijos kaupimo sistemos žemos įtampos (48 V) 9,66 kWh finansinė nauda.....	46
2.5.2 Saulės elektrinės 3,9 kWp ir elektros energijos kaupimo sistemos aukštos įtampos (288 V) 10,66 kWh finansinė nauda	48
2.6 Eksperimentas.....	51
2.6.1 Eksperimento metu naudoti komponentai.....	53
2.6.2 Eksperimento metu gauti rezultatai	54
Išvados	59
Literatūros sąrašas	60
3 Priedai.....	64
3.1 Saulės elektrinės ir elektros energijos kaupimo sistemos skaičiavimo programos kodas.....	64
3.2 Eksperimento metu naudoti komponentai	69
3.3 Elektros energijos 2023.04.01-2023.04.30 sunaudojimo ir elektros energijos gamybos duomenys.....	72
3.4 Elektros energijos 4 parų energijos srautų duomenys	73

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Metinė elektros energijos gamyba su skirtingų tipų fotovoltiniais moduliais [14].....	19
2 lentelė. Skirtingų tipų energijos kaupimo sistemų savybės [23].....	25
3 lentelė. Skirtingų tipų ličio jonų akumuliatorių savybės [23].....	25
4 lentelė. Elektros energijos poreikis per metus.....	37
5 lentelė. Sunaudotos ir sugeneruotos elektros energijos rezultatai.....	37
6 lentelė. Akumuliatoriaus parametrai	42
7 lentelė. Įtampos kritimas ir galios nuostoliai nuolatinės srovės laidininkuose	43
8 lentelė. Įtampos kritimas ir galios nuostoliai kintamosios srovės laidininkuose	44
9 lentelė. Elektros energijos poreikio, saulės elektrinės 3,9 kWp su elektros energijos kaupimo sistema LFP 9,6 kWh 48 V duomenys	45
10 lentelė. Saulės elektrinės 3.9 kWp ir energijos kaupimo sistemos LFP 9.6 kWh 48 V įrengimo kaštai.....	46
11 lentelė. Saulės elektrinės 3,9 kWp ir energijos kaupimo sistemos LFP 10,66 kWh , 288 V įrengimo kaštai.....	48
12 lentelė Individualaus namo elektros energijos sunaudojimo duomenys 2023.04.01-2023.04.30	72
13 lentelė Saulės elektrinės 0,75 kWp elektros gamybos duomenys 2023.04.01-2023.04.30	72
14 lentelė. Sunaudotos ir gražintos į tinklą energijos duomenys	73
15 lentelė. Gražintos į tinklą energijos duomenys	73
16 lentelė. Saulės elektrinės 0,7 kWp ir 2 kWh akumuliatoriaus energijos srautų duomenys	74
17 lentelė. Paros energijos srautų duomenys	74

Paveikslų sąrašas

1 pav. Fotovoltinio elemento ekvivalentinė schema [1]	13
2 pav. I-V fotovoltinio elemento kreivė [1]	14
3 pav. Spinduliuotės intensyvumo poveikis P-V charakteristikoms [2]	14
4 pav. Skirtingo bangos ilgio saulės spinduliuotės energija [3].....	14
5 pav. Saulės energijos spinduliavimo tipai [5].	15
6 pav. Horizontalioji saulės spindulių (GHI) energija [6]	15
7 pav. Tiesioginė spinduliuotė (DNI) [8].....	16
8 pav. Saulės elektrinių elektros gamybos potencialas [8]	16
9 pav. 1 kWp instaliuotos galios (DNI, PV) energijos gamyba kas mėnesį [9].....	17
10 pav. 1 kWp instaliuotos galios saulės elektrinės energijos gamyba kas mėnesį [9]	17
11 pav. Skirtingų technologijų fotovoltiniai moduliai [10]	18
12 pav. Pusinių elementų (<i>Half cell</i>) moduliai [13].....	19
13 pav. Stacionarių fotovoltinių modulių elektros energijos gamyba [14].....	19
14 pav. Fotovoltinių modulių su integruota sekimo sistema elektros energijos gamyba [14].....	20
15 pav. Kampai iš stebėtojo pusės Q horizontalioje plokštumoje (a) ir žemės pusiaujo plokštumoje (b) [14].....	20
16 pav. Fotovoltinis modulis su apėjimo diodais ir blokuojančiais diodais [16].....	21
17 pav. MPPT sekimo kreivė [20].	23
18 pav. P&O sekimo algoritmas [20].	23
19 pav. DC/DC sąsajos sujungimo schema [22].....	24
20 pav. AC sąsajos sujungimo schema [22]	24
21 pav. Ličio jonų akumulatoriaus įkrovimo iškrovimo ciklai [24].	26
22 pav. LFP / grafito elementų gyvavimo ciklo tyrimai skirtingu C greičiu. a) Energijos išlaikymas. b) elementų temperatūra [25]	26
23 pav. Specifinė galia ir specifinė skirtingų baterijų energija [28]	27
24 pav. Ciklo trukmė ir skirtingų baterijų išsikrovimo gylis [28]	28
25 pav. Savitoji galia ir specifinė energija įvairiose taikymo srityse [28].	28
26 pav. Skirtingų baterijų didžiausias ir mažiausias DC-DC efektyvumas (medianos vertės) [28].	29
27 pav. Skirtingų baterijų didžiausia ir mažiausia kalendorinė tarnavimo trukmė (vidutinės reikšmės) [28]	29
28 pav. Konkrečios skirtingų baterijų technologijų sąnaudos (gamintojo ir literatūros duomenys) [28]	30
29 pav. Įtampos ir DOD priklausomybė esant skirtingam iškrovimo greičiui [29].....	30
30 pav. Ličio akumuliatorių įkrovimo etapai [31]	31
31 pav. Ličio baterijų talpos, įtampos palyginimas laiko atžvilgiu [30].....	31
32 pav. PV ir akumulatoriaus valdymo schema [38].....	33
33 pav. Optimalaus valdymo modelio struktūrinė schema [38]	34
34 pav. Gyvenamojo namo energijos poreikis kas mėnesį	38
35 pav. Energijos sunaudojimo grafikas kas dieną 04.01-04-30.	38
36 pav. Vidutinė sunaudota energija pagal paros laiką.....	38
37 pav. Paros energijos sąnaudos pagal valandas.	39
38 pav. Saulės elektrinės energijos gamybos mažėjimas dėl fotovoltinių modulių degradacijos	40
39 pav. Saulės elektrinės 3,9 kWp ir energijos kaupimo sistemos 9,6 kWh LFP žemos įtampos (48 V) atsipirkimo laikas	47

40 pav. 48 V elektros energijos kaupimo sistemos atsipirkimo laikas	48
41 pav. Saulės elektrinės 3,9 kWp ir energijos kaupimo sistemos 10,66 kWh LFP aukštos įtampos (288V) atsipirkimo laikas	49
42 pav. Aukštos įtampos (288 V) LFP elektros energijos kaupimo sistemos atsipirkimo laikas	50
43 pav. Fotovoltinės saulės elektrinės ir energijos kaupimo sistemos principinė valdymo schema	51
44 pav. Fotovoltinės saulės elektrinės ir energijos kaupiklio valdymo algoritmas	52
45 pav. <i>On-grid</i> darbo režimas.....	53
47 pav. Fotovoltiniai moduliai	53
48 pav. Valdymo skydas	54
49 pav. Saulės elektrinės valandinis energijos generavimas.....	54
50 pav. Saulės elektrinės energijos generavimas kas dieną	55
51 pav. Vidutinis paros saulės elektrinės elektros generavimas ir sunaudojimas iš tinklo.....	55
52 pav. Saulės elektrinės vidutinis valandinis elektros generavimas.....	56
53 pav. Vidutinis valandinis energijos generavimas ir energijos sunaudojimas.....	56
54 pav. Saulės elektrinės energijos generavimas ir energijos sunaudojimas iš tinklo per mėnesį....	57
55 pav. Elektros energijos šaltinių pasiskirstymas per parą.....	57
56 pav. Vidutinė valandinė elektros energijos gamyba ir sunaudojimas per parą.....	58
57 pav. Baterijos įtampos kitimas esant skirtingai apkrovai.....	58

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

Pgrid – Elektros tinklo galia (kW);

Pbat – Baterijų galia (kW);

PV – Fotovoltinis modulis;

PPV – Fotovoltinės elektrinės galia (kW);

Pload – Apkrovos galia (kW);

Voc – Fotomodulio, inverterio atviros grandinės didžiausia leistina įtampa (V);

Pmpp – Fotomodulio, inverterio didžiausia galia (W);

Vmpp – Fotomodulio, inverterio (V);

Imp – Fotomodulio, inverterio didžiausia srovė didžiausiame galios taške (A);

Isc – trumpojo jungimo srovė;

Li-ion – Ličio jonų arba ličio jonų akumuliatorius yra įkraunamas akumuliatorius, kuriame energijai kaupti naudojamas grįžtamasis ličio jonų redukcija;

LiFePO₄ – arba (LFP) yra įkraunamos ličio-geležies fosfato baterijos;

SOC – Baterijos įkrovimo lygis;

SOH – Baterijos talpa, lyginant su naujomis to pačio tipo baterijomis;

DOD – Baterijų iškrovimo lygis;

Cbat – Baterijų talpa (Ah);

Feed in tariff – pagamintos energijos supirkimo tarifas;

BESS – baterijų energijos kaupiklis;

PSH – pikinės saulės valandos;

TOU – energijos laiko tarifas;

SPT – atsipirkimo laikas;

LCOE – elektros energijos savikaina;

TOR – keitimo laikotarpis;

DC/AC – srovės ir įtampos keitiklis iš nuolatinės srovės į kintamą srovės.

AC/DC – srovės ir įtampos keitiklis iš į kintamą srovės į nuolatinės srovės.

DC/DC – nuolatinės srovės keitiklis;

DC/DC – nuolatinės srovės keitiklis;

C_{rate} – akumulatoriaus įkrovimo, iškrovimo greitis;

TCF – temperatūros korekcijos koeficientas;

PR – našumo koeficientas.

Terminai:

MPPT charge controller – didžiausios galios taško sekimo valdiklis

Step-up – aukštinantis įtampos keitiklis;

Step-down – žeminantis įtampos keitiklis;

Half-cell – pusinių fotovoltinių elementų technologija;

Bifacial – dvipusio stiklo fotovoltinių modulių technologija;

Thin-film – plonasluoksnė fotovoltinių modulių technologija;

On-grid – Fotolinė elektrinė prijungta prie skirtomųjų elektros tinklų.

Įvadas

Atsinaujinančių energijos šaltinių dalis nuolat didėja. Tai vyksta dėl ekonominių priežasčių ir pastangų mažinti išmetamų teršalų kiekį į atmosferą. Saulės spindulių energijos padidėjimas dažniausiai vyksta vienam regione tuo pačiu metu, todėl didėja tinklo apkrovos ir leistina įtampa gali viršyti leistinas ribas, dėl ko gali nustoti veikti saulės inverteriai ir kiti elektros įrenginiai.

Sustiprinti elektros perdavimo linijas kainuoja brangiai. Perteklinė energija gali būti saugoma elektros energijos kaupimo sistemose ir panaudojama nakties metu arba kuomet saulės spindulių energija yra maža. Įrengiant apskaitos prietaisus su duomenų nuskaitymu galima kontroliuoti saulės elektrinės perduodamos energijos kiekį į tinklą ir į energijos kaupimo sistemą. Šiame darbe buvo analizuojama elektros energijos sunaudojimo, elektros energijos gamybos ir elektros saugojimo duomenys. Surinkti duomenys buvo panaudoti modeliuojant valdymo algoritmą ir skaičiuojant optimalius saulės elektrinės ir energijos kaupimo sistemos parametrus.

Darbo objektas – fotovoltinės saulės elektrinės ir energijos kaupimo sistemos optimizuotas valdymas.

Darbo tikslas – sukurti saulės elektrinės ir energijos kaupimo sistemos optimalių parametru parinkimo ir valdymo modelį pagal vartotojo energijos poreikius ir apkrovas.

Darbo uždaviniai:

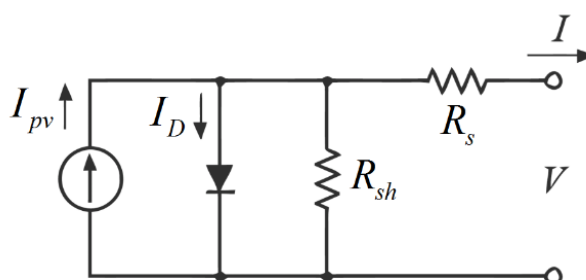
1. atlikti mokslinės literatūros analizę;
2. surinkti duomenis iš elektros energijos apskaitos prietaisų;
3. apskaičiuoti saulės elektrinės ir elektros energijos kaupimo sistemos parametrus pagal elektros energijos poreikį.
4. atlikti ekonominę naudos analizę saulės elektrinės su skirtingomis ličio jonų energijos kaupimo sistemomis.
5. Atlikti eksperimentinį tyrimą;

1 Informacinių šaltinių analizė

Šiame skyriuje pateikiama informacija apie fotovoltinius modulius, saulės spindulių energiją, elektros energijos kaupimo sistemas ir elektros srovės ir įtampos keitiklius.

1.1 Fotovoltinio elemento ekvivalentinė schema ir I-V kreivės taškai

Fotovoltinis elementas yra srovės šaltinis. Ekvivalentinė fotovoltinio elemento schema pavaizduota (1 pav.). Fotosrovę galima apskaičiuoti naudojant *Shokley* lygtį (1).



1 pav. Fotovoltinio elemento ekvivalentinė schema [1]

$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{aV_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

čia:

I_{pv} – fotosrovė;

I_0 – atvirkštinė soties srovė, įtakojama diodo;

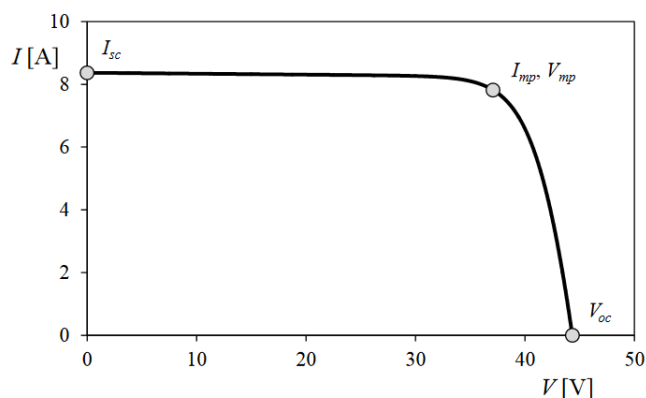
R_s – nuosekliai įjungtas rezistorius, kuriame atsižvelgiama į nuostolius elementų jungtyse;

R_{sh} – šunto rezistorius, kuris įtakojamas srovės nuotėkio per p-n sandūrą;

a – idealus koeficientas, kuris atsižvelgia į diodų nuokrypį nuo *Shockley* difuzijos teorijos;

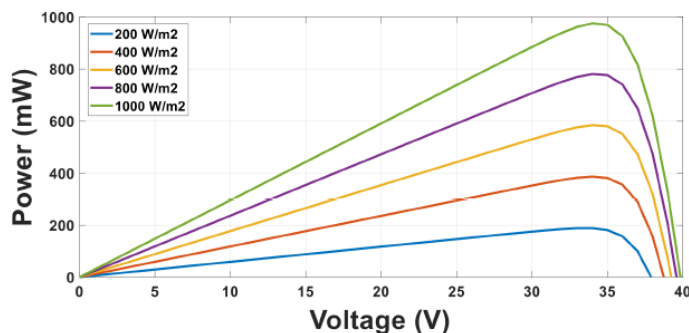
V_T – diodo šiluminė įtampa priklauso nuo elektrono krūvio q , Boltzmanno konstantos, k ; nuosekliai sujungų elementų skaičiaus, n ; ir temperatūros, T .

Fotovoltinio elemento I-V kreivės taškai parodyti 2 paveiksle: I_{sc} - trumpasis jungimas, I_{mp} ir V_{mp} atitinka didžiausią galią ir V_{oc} – atviros grandinės įtampa.



2 pav. I-V fotovoltinio elemento kreivė [1]

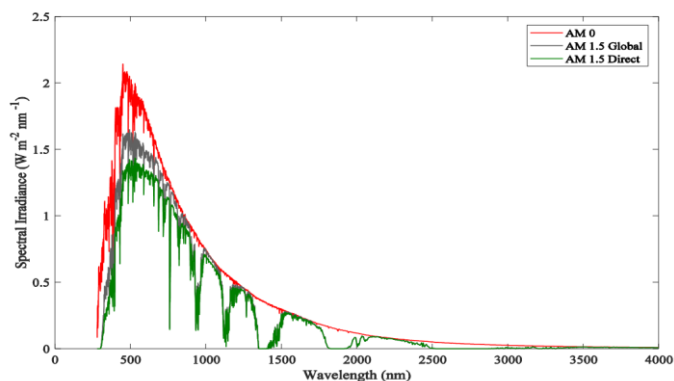
Fotovoltinio modulio galia didėja, didėjant spinduliuotės intensyvumui. Spinduliuotės intensyvumo poveikis pavaizduotas fotovoltinio elemento elektrinėms charakteristikoms esant 25 °C elementų temperatūrai.



3 pav. Spinduliuotės intensyvumo poveikis P-V charakteristikoms [2]

1.2 Saulės spindulių energija

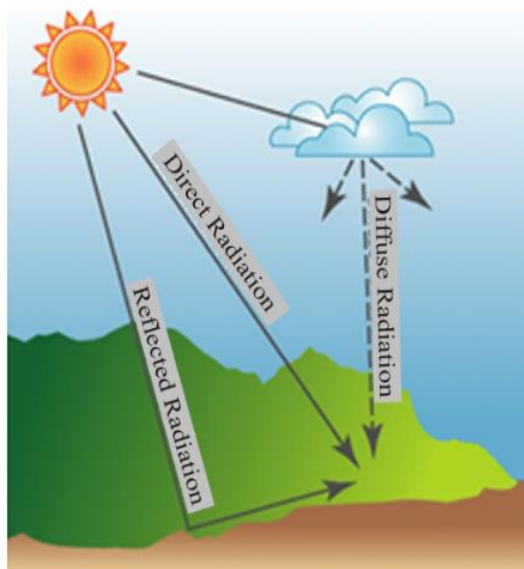
Saulės spindulių energija gaunama plataus spektro elektromagnetinių bangų pavidalu. Trumpesnis bangos ilgis turi daugiau energijos nei ilgesnės bangos. Saulės šviesa praeina per atmosferą ir sąveikauja su skirtingais atmosferos elementais, dalis jų yra absorbuojama, o dalis yra išsklaidoma. Kuo didesnis atmosferos storis, tuo labiau silpnėja šviesa. Skirtingo bangos ilgio saulės spinduliuotės energija pavaizduota 4 paveiksle.



4 pav. Skirtingo bangos ilgio saulės spinduliuotės energija [3]

Horizontali spindulių energija (*GHI Global Horizontal Radiance*) yra energija ant horizontalaus paviršiaus arba horizontalios plokštumos. Šia energiją galima suskirstyti į tris komponentus, kurių proporcijos ir intensyvumas skiriasi priklausomai nuo vietos, paros laiko ir sezono [4].

Trys pagrindiniai saulės spinduliuotės komponentai yra: tiesioginė (DNI), išsklaidyta (DHI) ir atspindėta saulės spinduliuotė. Šių spindulių tipai pavaizduoti 5 paveiksle.



5 pav. Saulės energijos spinduliavimo tipai [5].

Bendra saulės spindulių energija ant horizontalaus žemės paviršiaus, apskaičiuojama pagal šią formulę:

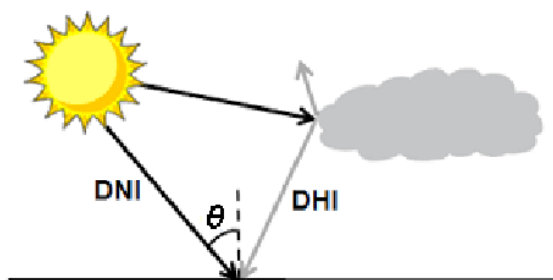
$$GHI = DNI \times \cos(z) + DHI \quad (2)$$

čia:

GHI - horizontalioji spindulių energija (*GHI Global Horizontal Radiance*);

DHI - išskaidyta spindulių energija (*DHI Diffuse Horizontal Irradiance*);

DNI - tiesioginė spindulių energija (*DNI Direct irradiance*).

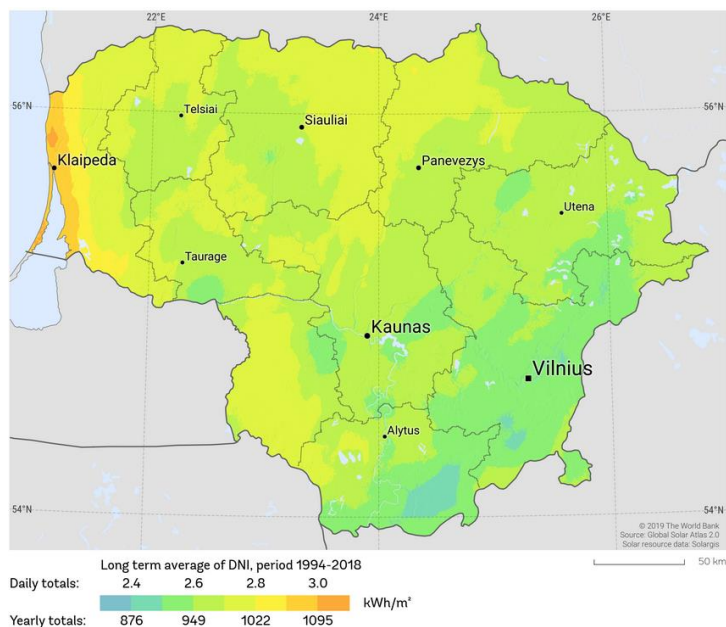


6 pav. Horizontalioji saulės spindulių (GHI) energija [6]

Pikinės saulės valandos (PSH) apibrėžiama kaip konkretus laikotarpis arba valanda, kai saulės spinduliuotės intensyvumas pasiekia iki 1000 vatų vienam kvadratiniam metrui.

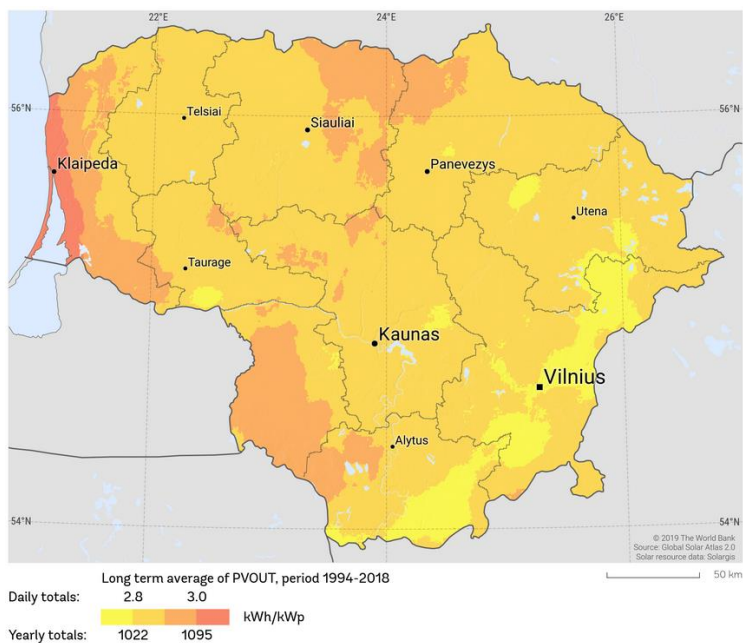
Saulės spindulių didžiausia energija pasiekama kuomet fotovoltinio modulio paviršius yra statmenas saulės spindulių kryptčiai [7].

Lietuvos regione tiesioginė spinduliuojama energija svyruoja nuo 876 iki 1095 kWh/m² per metus ir nuo 2,4 iki 3 kWh/m² per dieną. Spinduliavimo energija pavaizduota 7 paveiksle.



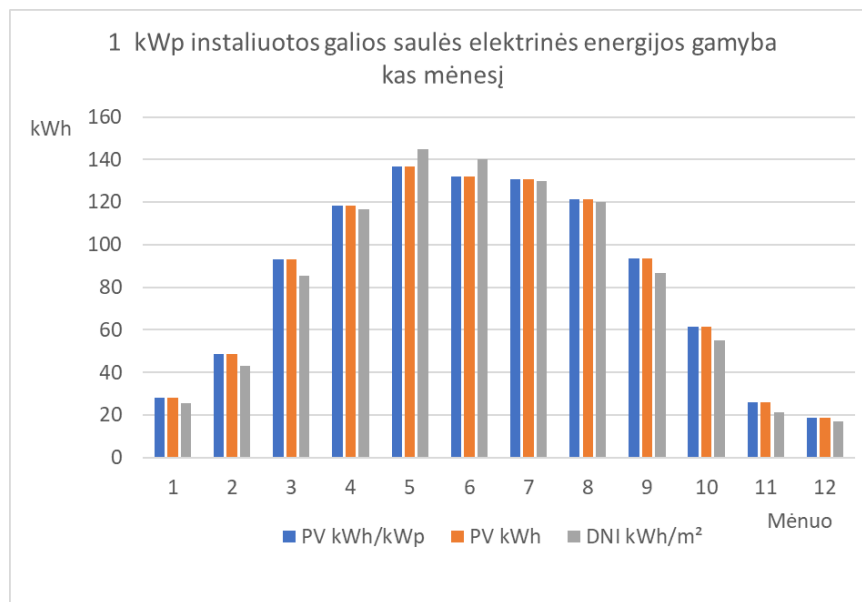
7 pav. Tiesioginė spinduliuotė (DNI) [8]

Lietuvoje saulės elektrinių elektros gamyba pagal regioną svyruoja nuo 1022 iki 1095 kWh/kWp per metus. Spinduliavimo energija pavaizduota 8 paveiksle. Skaičiavimuose įvertinti nuostoliai: 3,5 % dėl dulketumo ir 7,5 % dėl įrangos nuostolių.

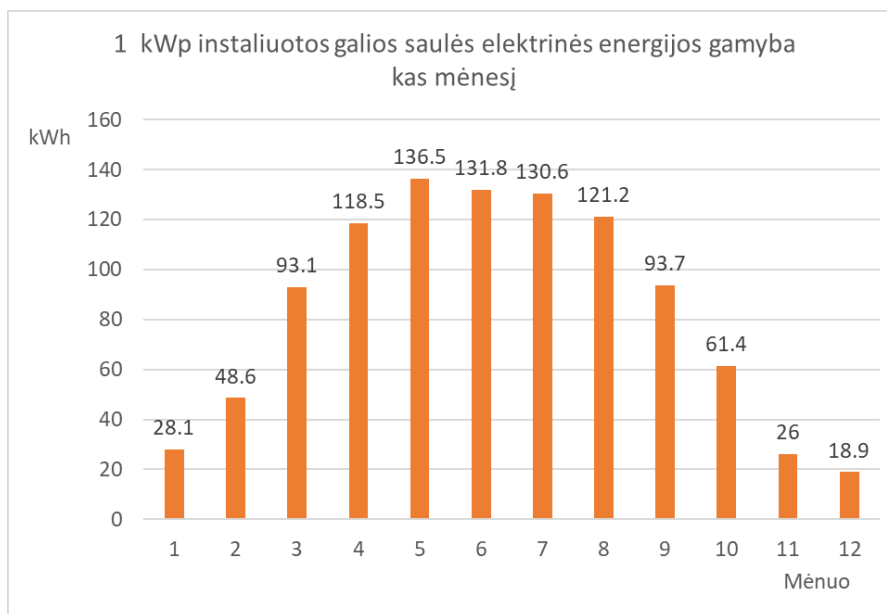


8 pav. Saulės elektrinių elektros gamybos potencialas [8]

Kauno regione 1 kWp instaliuotos galios saulės elektrinė per metus pagamina:
 elektros energijos – 1008,4 kWh, DNI – 969,9 kWh/m², GHI – 1039,2 kWh/m²
 Fotovoltinių modulių optimalus vertikalus pavirtimo kampas – 39° azimutas – 180° [9].
 Saulės energijos ir elektrinės energijos gamyba kas mėnesį pavaizduota (9 pav.). 1 kWp saulės
 elektrinės energijos gamyba kas mėnesį pavaizduota 10 paveiksle.



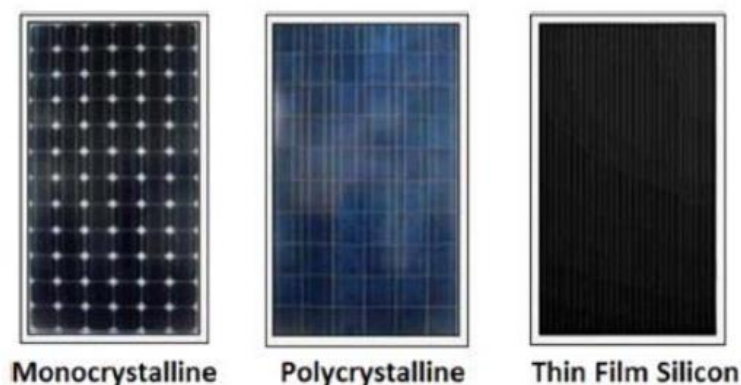
9 pav. 1 kWp instaliuotos galios (DNI, PV) energijos gamyba kas mėnesį [9]



10 pav. 1 kWp instaliuotos galios saulės elektrinės energijos gamyba kas mėnesį [9]

1.3 Fotovolinių modulių tipai

Dažniausiai fotovoltinės energijos konvertavimui naudojamos medžiagos yra monokristalinis, polikristalinis silicis, amorfinis silicis ir plonasluoksnės technologijos. Silicio kristalas turi įvairių tipų struktūrą: monokristalinį silicį, daugiakristalinį silicį ir plonasluoksnį liejinį daugiakristalinį silicį [10]. Daugiau nei 90 % šiuolaikinių fotovolinių sistemų naudoja modulius pagamintus iš kristalinio silicio [11]. Skirtingų technologijų fotovoliniai moduliai pavaizduoti 11 paveiksle.

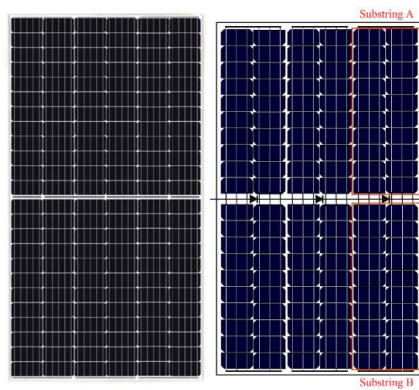


11 pav. Skirtingų technologijų fotovoliniai moduliai [10]

Monokristalinis PV elementas. Šis elementas pagamintas iš silicio monokristalų, atskirtų nuo luitų. Jis yra tamsios spalvos ir išilgai visų kampų yra apipjaustytas. Tai yra vienas aiškus skirtumas nuo polikristalinių plokščių. Šis PV elementų tipas yra efektyviausias, nes yra pagamintas iš vieno kristalo, tačiau taip pat yra pats brangiausias. Monokristalinės struktūros efektyvumas svyruoja nuo 15% iki 20% [11]. Ši technologija yra pirmoji visų PV elementų karta kuri pasižymi dideliu atsparumu karščiui. Naudojant šią technologiją, apšvietus 1000 W/m^2 saulės spinduliuote išgaunama 140 W elektros galios 1 m^2 PV elementų paviršiaus plote [12].

Polikristalinis PV elementas. Šis elementas pagamintas iš mažesnio kiekių silicio kristalų derinio. Naudojant šią technologiją, apšvietus 1000 W/m^2 saulės spinduliuote išgaunama 130 W elektros galios 1 m^2 PV elementų paviršiaus plote [12]. Šio tipo elementų efektyvumas mažesnis nei monokristalinių elementų, tačiau elementų gamyba yra pigesnė.

Pusinių elementų technologija (*Half-cell*) pavaizduota 12 paveiksle. Perpjautas elementas per pusę, gali generuoti srovę, lygią pusei viso elemento vertės. Dėl srovės sumažėjimo varžos nuostoliai tampa mažesni, todėl du elementai gali pagaminti šiek tiek daugiau energijos nei visas elementas [13]. Gamintojų skaičiavimais, pusinių elementų modulių efektyvumas padidėja 3 %, mažesnė mechaninio įtempimo sukeltų įtrūkimų tikimybė dėl mažesnio ploto, lyginant su visu elementu, todėl mažėja ir karštųjų taškų tikimybė [13]. Šio tipo jungtis leidžia pusinių elementų moduliams geriau reaguoti į šešėliavimą, nes viena modulio pusė neturi įtakos kitai [13].



12 pav. Pusinių elementų (*Half cell*) moduliai [13]

Fotovoltinių modulių technologija stiklas-stiklas (*Bifacial*). PV turi grūdintą stiklą tiek priekyje, tiek gale, o tai padidina patvarumą ir efektyvumą. Šie moduliai turi būti montuojami ant stelažų kur šviesa atsispindėtų į galinę modulio pusę. Šie moduliai generuoja nuo 5 iki 30 % daugiau elektros energijos.

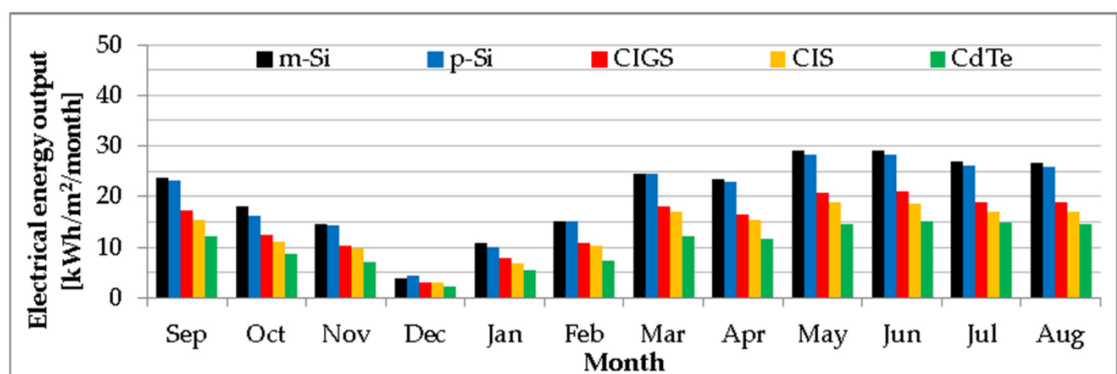
Plonasluoksnės plėvelės technologija (*Thin film*). Šioje technologijoje naudojamas amorfinis silicis, Kadmio teluridas, titano dioksidas ir kt. Šios technologijos efektyvumas mažesnis už monokristalinio ar polikristalinio silicio technologijas, tačiau jų masinė gamyba yra paprasta, temperatūra ir šešėliai turi mažesnę įtaką efektyvumui.

Palyginimui skirtingų fotovoltinių modulių mėnesio elektros energijos gamyba pavaizduota 14 ir 15 paveiksluose. Metinė elektros energijos gamyba su 5 tipų skirtingais PV moduliais parodyta 1 lentelėje [14].

1 lentelė. Metinė elektros energijos gamyba su skirtingų tipų fotovoltiniais moduliais [14]

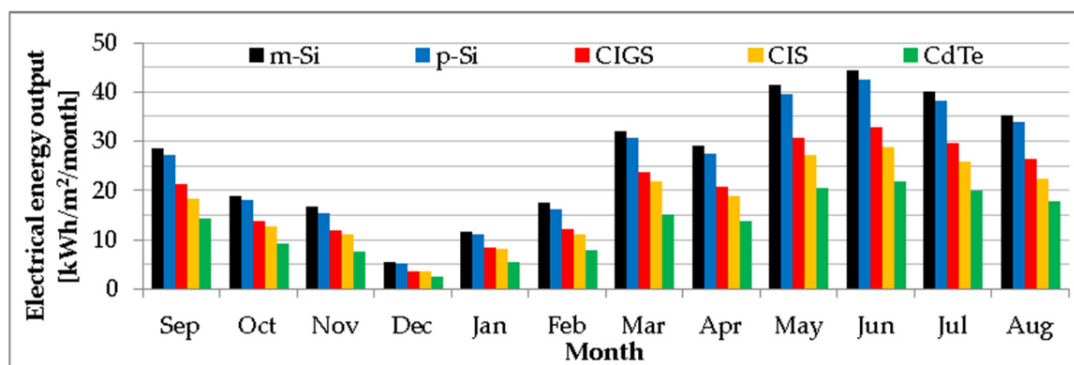
PV Technology	m-Si	p-Si	CIGS	CIS	CdTe
Electrical energy output fixed module[kWh/m ² /year]	245.46	239.37	175.28	160.18	125.94
Electrical energy output tracked module [kWh/m ² /year]	320.56	304.74	234.82	209.55	155.36
Absolute electrical energy gain[kWh/m ² /year]	65.37	75.09	59.54	49.38	29.42
Relative electrical energy gain [%]	30.59	27.31	33.97	30.83	23.36
Temperature coefficient of P _{MPP} [%/°K]	-0.44	-0.45	-0.38	-0.39	-0.25

Stacionarių fotovoltinių modulių mėnesio elektros energijos gamyba pavaizduota 13 pav.



13 pav. Stacionarių fotovoltinių modulių elektros energijos gamyba [14]

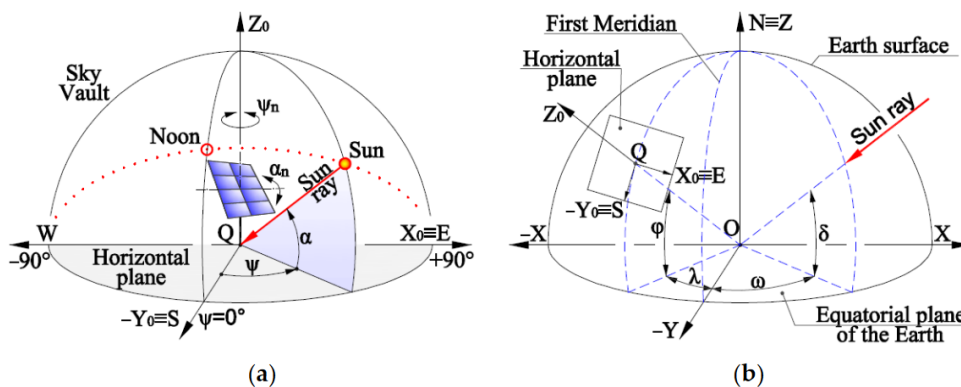
Fotovoltinių modulių su integruota sekimo sistema, mėnesio elektros energijos gamyba pavaizduota (14 pav.).



14 pav. Fotovoltinių modulių su integruota sekimo sistema elektros energijos gamyba [14]

1.4 Fotovoltiniai moduliai su saulės sekimo sistema

Saulės energijos efektyvumas taip pat priklauso nuo stebėjimo sistemos, kuri valdo PV modulį. Sekimo sistema skirta nukreipti PV modulius saulės šviesos kryptimi, kuri padidina saulės spinduliuotę į PV modulio paviršių [14]. Kampai iš stebėtojo pusės Q horizontalioje plokštumoje ir žemės pusiaujo plokštumoje pavaizduoti (15 a ir 15 b pav.).



15 pav. Kampai iš stebėtojo pusės Q horizontalioje plokštumoje (a) ir žemės pusiaujo plokštumoje (b) [14]

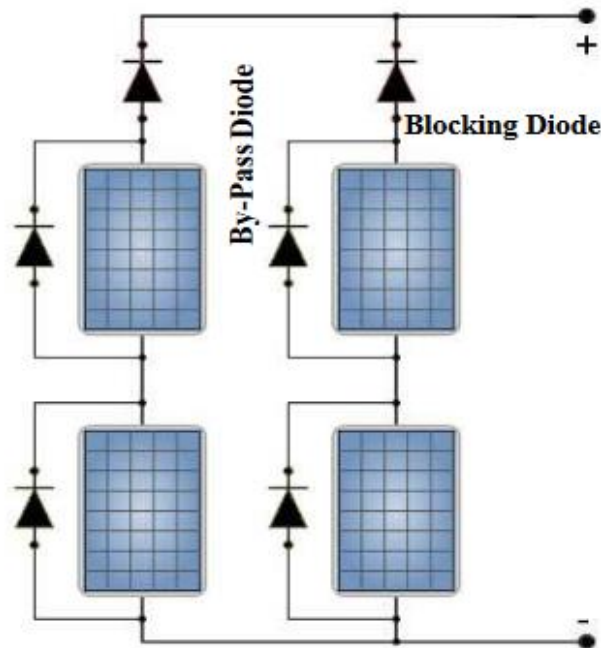
α_n – fotovoltinės konstrukcijos vertikalus kampas, apibrėžiamas kaip kampas tarp horizontalios plokštumos ir PV konstrukcijos (15 a pav.) [14];

ψ_n yra fotovoltinės konstrukcijos azimutinis kampas, apibrėžiamas, kaip kampas tarp pietų krypties ir PV konstrukcijos projekcijos horizontalioje plokštumoje (15 a pav.) [14];

α ir ψ yra saulės aukščio kampas ir saulės azimutinis kampas, apskaičiuotas pagal deklinacijos kampą (δ), valandos kampą (ω) ir vietos platumą (φ) (15 b pav.).

Kauno regione optimalus fotovoltinių modulių posvyrio kampas vertikalia ašimi yra 33° [15].

Daliniai nuostoliai dėl šešėliavimo. Šešėliui krintant per modulio sekciją, mažiausiai vienos ar kelių modulio elementų eilučių elektros energija nukrenta iki nulio, bet viso modulio galia nenukrenta iki nulio [16]. Fotovoltinis modulis su apėjimo diodais ir blokuojančiais diodais pavaizduotas (16 pav.).



16 pav. Fotovoltinis modulis su apėjimo diodais ir blokuojančiais diodais [16].

Našumo koeficientas (PR). Našumo koeficientas leidžia palyginti PV saulės sistemas, neatsižvelgiant į saulės spinduliuotės energiją, posvyrio kampą, orientacijos kampą ir jų vardinę galią. Našumo koeficientas parodo, kaip arti yra PV sistema iki idealaus našumo per tikrąjį darbo laiką [17].

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R} \% \quad (3)$$

čia:

Y_F – faktinė energija (kWh);

Y_R – teorinė energija STC 1 kW/m² 25 °.

1.5 Fotovoltinės elektrinės parametru skaičiavimas

Atskira elektros energijos tiekimo sistema (*Stand-alone photovoltaic power systems*) - naudojama atokiose vietovėse, kur elektros tinklų įrengimas yra neekonomiškas dėl reljefo, elektros tinklo apsaugos zonų ribojimo ar aplinkosaugos problemų [18]. Fotovoltinėje autonominėje sistemoje, fotovoltiniai moduliai tiekia elektros energiją apkrovai ir įkrauna akumuliatorių, kuomet saulė šviečia. Kuomet saulės spindulių nėra ar energija yra nedidelė, akumuliatorius maitina apkrovą. Vardinė fotovoltinių modulių galia apskaičiuojama naudojant (4) lygtį [18].

$$P_{pv} = \frac{E_{total}}{T_{min}} \quad (4)$$

čia:

P_{pv} – fotovoltinių modulių galia (W);

E_{total} – 1 dienai reikalingas energijos kiekis, įskaičiuavus nuostolius;

T_{min} – minimalus saulės valandų (*PSH*) skaičius.

PV masyvo plotą galima apskaičiuoti naudojant šią lygtį [19]:

$$PV_{area} = \frac{E_L}{G_{in} \times \eta_{pv} \times TCF \times \eta_{out}} \quad (5)$$

čia:

PV_{area} – fotovoltinių modulių plotas;

G_{in} – sugeneruota saulės energija per dieną (Wh);

η_{pv} – fotovoltinio modulio efektyvumas;

TCF – temperatūros korekcijos koeficientas;

η_{out} – baterijos ir inverterio efektyvumas.

Fotovoltinių modulių didžiausia galia skaičiuojama pagal (6) lygtį:

$$P_{peak\ power} = PV_{area} \times PSI \times \eta_{PV} \quad (6)$$

čia:

PSI – didžiausia saulės apšvieta 1000 W/m²

Fotovoltinių modulių skaičius skaičiuojamas pagal (7) lygtį:

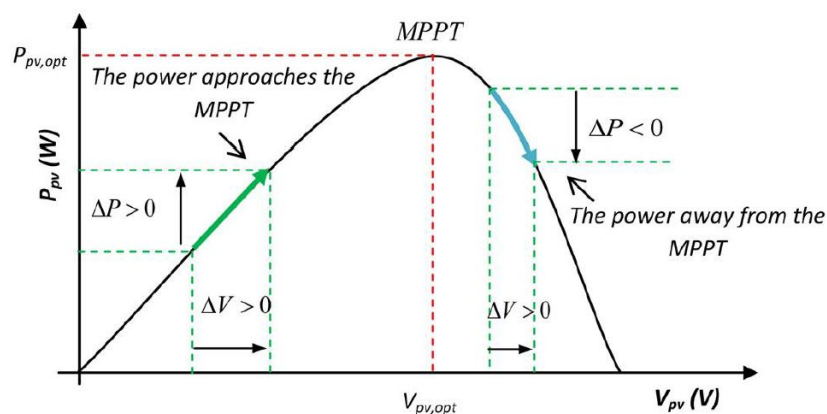
$$N_{PV} = \frac{PV_{peak\ power}}{Peak\ power\ of\ module} \quad (7)$$

Fotovoltinių modulių bendra galia skaičiuojama pagal (8) lygtį:

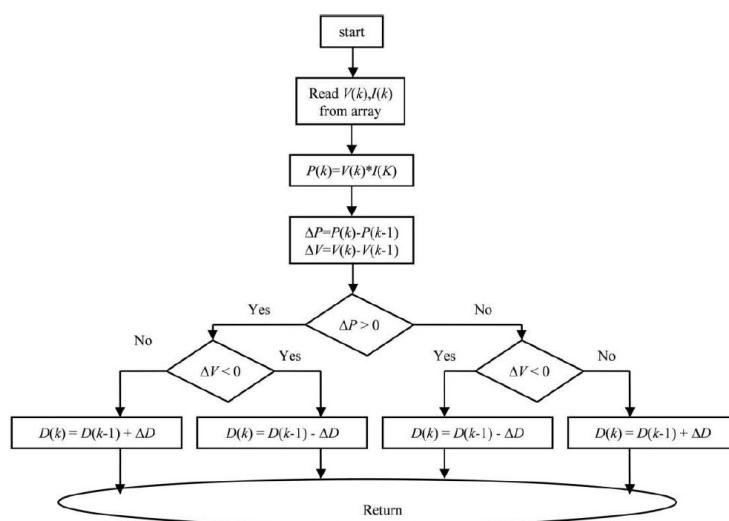
$$PV_{out} = G_{in} \times PV_{area} \times \eta_{pv} \times \eta_B \times \eta_{inv} \quad (8)$$

1.6 Fotovoltinių modulių maksimalios galios sekimo algoritmas

Keičiantis aplinkos sąlygomis keičiasi ir generuojama galia, todėl reikalinga stebėti generuojamos galios duomenis. Didžiausios galios sekimas reikalingas išgauti didžiausią PV elemento galią. DC/DC keitiklis, keičia signalo plotį, taip keičiasi apkrovos varža, kad ji atitiktų šaltinio varžą, ir būtų išgaunama didžiausia galia [20]. Šiame algoritme matuojama modulio įtampa, vėliau trikdoma ir lyginama su ankstesniu matavimu. Šis metodas sukelia nedidelius svyravimus, dėl to PV modulio generuojama galia taip pat svyruoja. Jei galia padidėja, trikdžiai ir toliau vystosi šia kryptimi. Pasiekus piką, galios pokytis ties MPP yra lygus nuliui, vėliau pokytis mažėja, todėl trikdžiai pasikeičia šia kryptimi. MPP sekimo kreivė pavaizduota (17 pav.) Šio algoritmo veikimo principą paaiškinanti struktūrinė schema parodyta (18 pav.) [20].



17 pav. MPPT sekimo kreivė [20].



18 pav. P&O sekimo algoritmas [20].

1.7 Įtampos ir srovės keitikliai

Nuolatinės – kintamosios srovės keitiklio DC/AC pagrindinė paskirtis yra perduoti maitinimą į kintamosios srovės elektros grandinę, taip pat sinchronizuoti gaminamos elektros srovę su kintamosios srovės tinklu. Keitiklio apkrova priklauso nuo galios tiekiamos iš PV modulių ir akumuliatoriaus.

Keitiklio galios nuostoliai susideda iš nekintačios dalies ir nuo apkrovos priklausančios dalies. Nekintanti dalis apima galią, reikalingą valdymo sistemoms ir kitoms pagalbinėms keitiklio dalims tiekti [21]. Nuo apkrovos priklausomą dalį sudaro keitiklio tranzistorių laidumo ir perjungimo nuostoliai. Laidumo nuostoliai ir perjungimo nuostoliai skiriasi priklausomai nuo išėjimo srovės dydžio, todėl saulės keitiklio efektyvumas nėra pastovus [21].

Keitiklio efektyvumas skaičiuojamas pagal šią formulę:

$$\eta(t) = \frac{P_{ac}}{P_{dc}} = \frac{P_{dc} - P_{loss}(t)}{P_{dc}(t)} \quad (9)$$

čia:

$\eta(t)$ – inverterio efektyvumas;

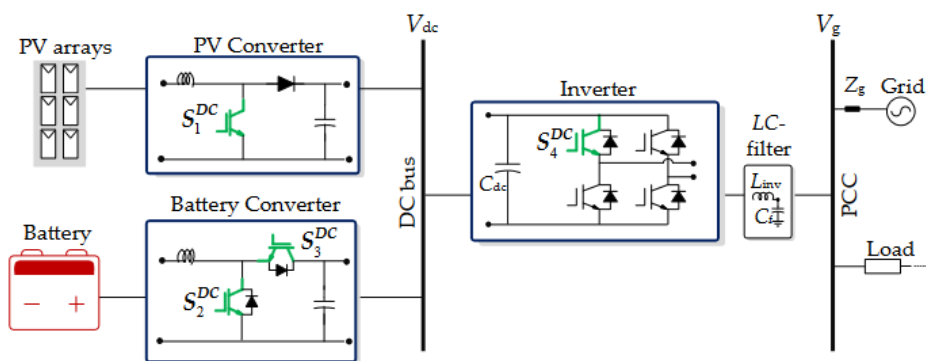
P_{ac} – kintamosios srovės galia;

P_{dc} – nuolatinės srovės galia ;

P_{loss} – galios nuostoliai.

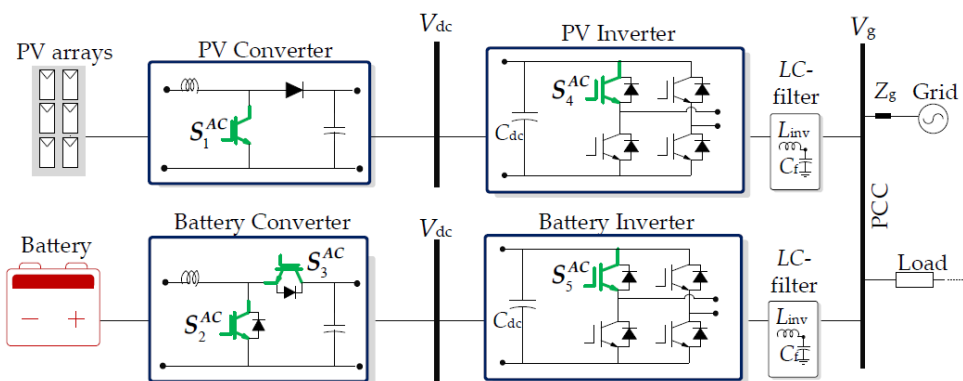
Akumuliatoriaus įkrovimo valdiklis yra dvikryptis DC/DC keitiklis, prijungtas prie akumuliatoriaus. Kai akumuliatorius iškraunamas, DC/DC keitiklis veikia kaip aukštinantis (*step-up*) keitiklis, kuris reguliuoja srovę ir įtampą. Kuomet akumuliatorius įkraunamas, DC/DC srovės keitiklis veikia kaip (*step-down*) keitiklis, mažina įtampą ir reguliuoja įkrovimo srovę [22].

Nuolatinės srovės sąsaja (DC/DC). Prijungtoje konfigūracijoje sudaro PV , akumuliatorius ir keitikliai. DC/DC sąsajos schema pavaizduota (19 pav.) [22].



19 pav. DC/DC sąsajos sujungimo schema [22]

Kintamosios srovės sąsaja (AC). Kintamosios srovės konfigūracijos sistemos schema pavaizduota (20 pav.). [22].



20 pav. AC sąsajos sujungimo schema [22]

1.8 Elektros energijos kaupimo sistemos

Energijai sukaupti naudojamos įvairios energijos kaupimo sistemos: švino - rūgšties, ličio jonų (Li-ion), natrio nikelio chloridas (NaNiCl), vanadžio redokso srauto baterija (VRFB), nikelio kadmio (NiCd), cinko bromo srauto baterija (ZBFB) ir natrio sieros (NaS) baterijos yra naudojamos energijos kaupimui [23]. Ličio jonų akumuliatorius pasižymi dideliu patikimumu, dideliu galios tankiu, ilgu tarnavimo laiku, dideliu energijos tankiu, mažu iškrovos greičiu ir dideliu efektyvumu [22]. Ličio jonų akumuliatorių kaina mažėja, o tai padidina jų naudojimą, ličio jonų akumuliatorių rinka didėja [23]. Akumuliatorių parametrai aprašyti 2 ir 3 lentelėje.

2 lentelė. Skirtingų tipų energijos kaupimo sistemų savybės [23].

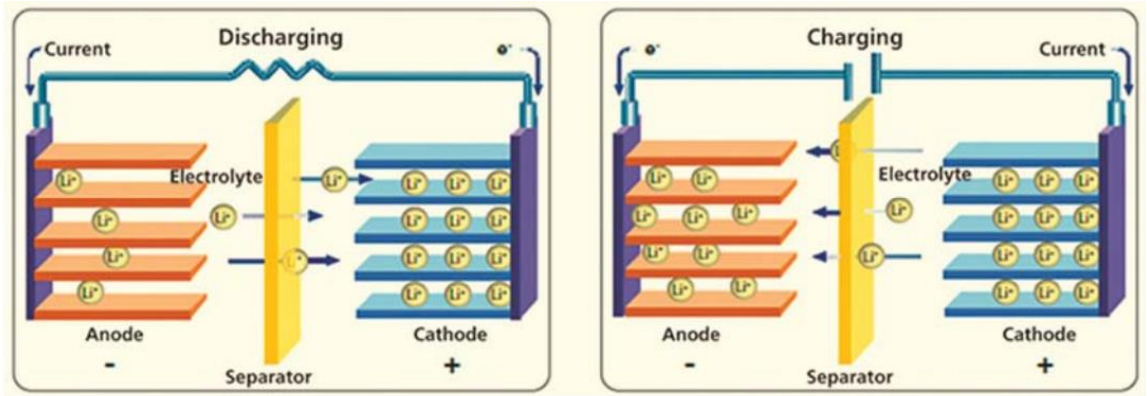
Battery type	Energy density (Wh/L)	Power density (W/L)	Nominal voltage (V)	Life cycle	Depth of discharge (%)	Round trip efficiency (%)	Estimated cost (USD/kWh)
Lead-acid	50–80	10–400	2.0	1500	50	82	105–475
NaS	140–300	140–180	2.08	5000	100	80	263–735
NaNiCl	160–275	150–270	-	3000	100	84	315–488
NiCd	60–150	80–600	1.3	2500	85	83	-
VRFB	25–33	1–2	1.4	13,000	100	70	315–1050
ZBFB	55–65	1–25	1.8	10,000	100	70	525–1680
Li-ion	200–400	1500–10,000	4.3	10,000	95	96	200–1260

Lentelėje nr. 2 parodyta, kad tarp visų saugojimo įrenginių VRFB gyvavimo ciklas yra didžiausias [22]. Ličio jonų akumuliatorius turi didžiausią energijos ir galios tankį, palyginti su kitais [23]. Svarbūs veiksniai yra akumuliatoriaus kaina, gyvavimo ciklas ir nominali įtampa [23]. Nominali elemento įtampa yra kritinis taškas, nes ji nusprendžia, kiek pavienių elementų reikia akumuliatoriaus bloke, kad būtų galimas saugus ir patikimas veikimas [23]. Galima teigti, kad ličio jonų akumuliatorius yra geresnis pasirinkimas dėl savo energijos tankio, eksploataavimo trukmės, vardinės įtampos, galios tankio ir kainos [23].

3 lentelė. Skirtingų tipų ličio jonų akumuliatorių savybės [23].

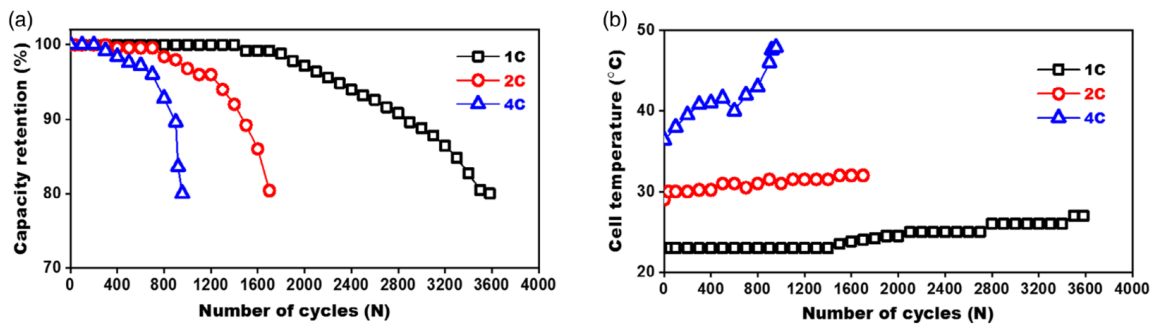
Type	Energy Density (Wh/kg)	Power Density (W/kg)	Life Cycle (100% DOD)	Estimated Cost (US\$/kWh)	Safety	Maturity
LMO	160	200	≥2000	~360	Good	Commercial
LFP	120	200	≥2500	~360	Good	Commercial
LNMC	200	200	≥2000	~360	Good	Commercial
Li-titanate oxide	70	1000	≥10000	~860	Good	Demo
Li-sulfur	500	-	~100	-	Good	R&D stage

Ličio jonų akumuliatorius. Ličio jonų elementas pagamintas iš teigiamo elektrodo (anodo), neigiamo elektrodo (katodo), separatoriaus ir dviejų srovės kolektorių [24]. Ličio jonai yra perkelti iš anodo į katodą per elektrolitinį separatorių, kad būtų užbaigtas iškrovimo ciklas. Neigiamas elektrodas paprastai yra pagamintas iš grafito, o anodo pagrindą sudaro viena iš šių medžiagų: ličio jonų mangano oksidas (LMO), ličio geležies fosfatas (LFP) ir ličio nikelio, mangano ir kobalto oksidas (LNMC) [23]. Dietilo karbonatas arba etileno karbonatas naudojamas kaip elektrolitas [24]. Aliuminis ir varis atitinkamai naudojami kaip teigiami ir neigiami srovės kolektoriai [24]. Ličio jonų akumuliatoriaus veikimo schema pavaizduota (21 pav.).



21 pav. Ličio jonų akumulatoriaus įkrovimo iškrovimo ciklai [24].

LFP akumulatoriaus talpos priklausomybė nuo ciklų skaičiaus įkraunant, iškraunant skirtingu 1C, 2C ir 4C greičiu pavaizduota (22 pav. a) Temperatūros ir ciklų skaičiaus priklausomybė įkraunant ir iškraunant skirtingu 1C, 2C ir 4C greičiu pavaizduota (22 pav. a ir b) [25].



22 pav. LFP / grafito elementų gyvavimo ciklo tyrimai skirtingu C greičiu. a) Energijos išlaikymas. b) elementų temperatūra [25]

Nominali talpa (C_n) – tai gamintojo nurodytas elektros energijos kiekis (C_n) Ah (ampervalandėmis), kurį vienas elementas arba akumulatorius gali tiekti per 1 valandą. Dažnai vardinė talpa C_n yra susijusi su akumulatoriaus veikimo pradžia (BOL) [26]. Tai reiškia, kad esant BOL ir SOC=100% (visiškai įkrauta), talpa C yra lygi vardinei talpai C_n [26].

Akumulatoriaus srovė ($i_{bat}(t)$) yra įkrovimo arba iškrovimo srovė [26].

C_{rate} - akumulatoriaus įkrovimo arba išsikrovimo greitis [26]. C_{rate} rodo, įkrovimo arba iškrovimo srovės santykį su vardine talpa C_n . [26].

$$C_{rate} = \frac{|i_{bat}(t)|}{I_{ref}} \quad (10)$$

čia:

I_{ref} – tiesiogiai proporcinga akumulatoriaus talpai (C_n);

$i_{bat}(t)$ – įkrovimo, iškrovimo akumulatoriaus srovė.

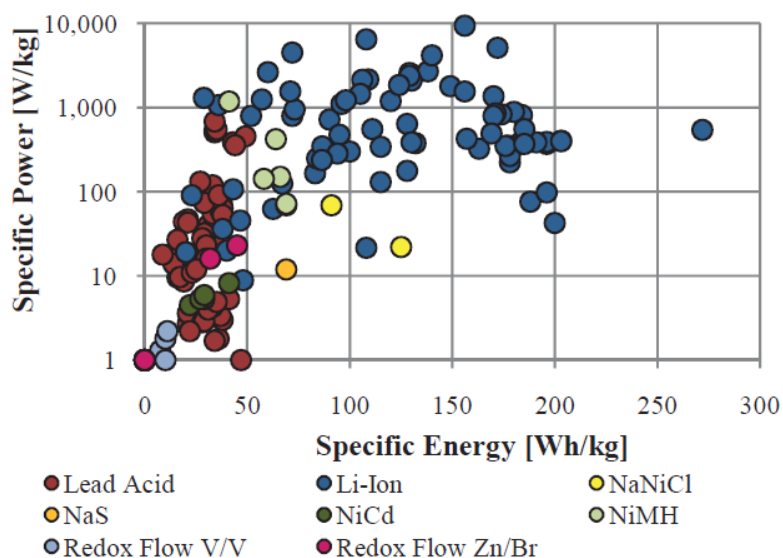
Akumuliatorių keitimo laikas (*time of replacement TOR*) skiriasi priklausomai nuo skirtingų akumuliatorių technologijų ir kitų veiksnių. Keitimo laikas taip pat priklauso nuo įkrovimo – iškrovimo ciklų skaičiaus, taip pat nuo akumulatoriaus veikimo trukmės [27].

Ličio geležies fosfato akumulatorius (LiFePO_4). LiFePO_4 elemento įtampų lygiai:

- nominali elemento įtampa – 3,2 V;
- pilnai įkrauto elemento įtampa – 3,6 V;
- iškrauto elemento įtampa – 2,5 – 2,8 V.

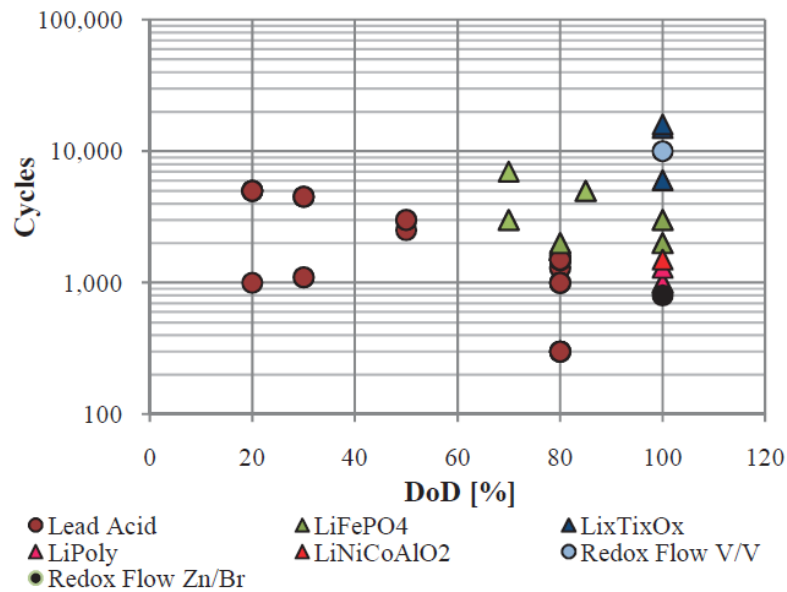
Paprastai LiFePO_4 iškrauto elemento įtampa yra 2,8 V. Svarbu neiškrauti akumulatoriaus elemento žemiau 2,8 V įtampos, nes tai gali sugadinti akumuliatorių arba sutrumpinti jo naudojimo laiką. LiFePO_4 baterijų veikimo laikas svyruoja nuo 2000 iki 7000 ciklų, priklausomai nuo akumulatoriaus kokybės ir naudojimo.

Kiekviena energijos kaupimo technologija turi savo specifiką charakteristikas ir optimalią taikymo sritį [28]. Sprendimas kokia technologija turėtų būti pasirinkta tam tikrai programai priklauso nuo energijos kiekio, kurį reikia sukaupti, saugojimo trukmės, įkrovimo ir iškrovimo galios, ciklų skaičiaus, išlaidų ir kitų veiksnių [28]. Skirtingoms akumuliatorių technologijoms specifinė galia pavaizduota (23 pav.) [28].



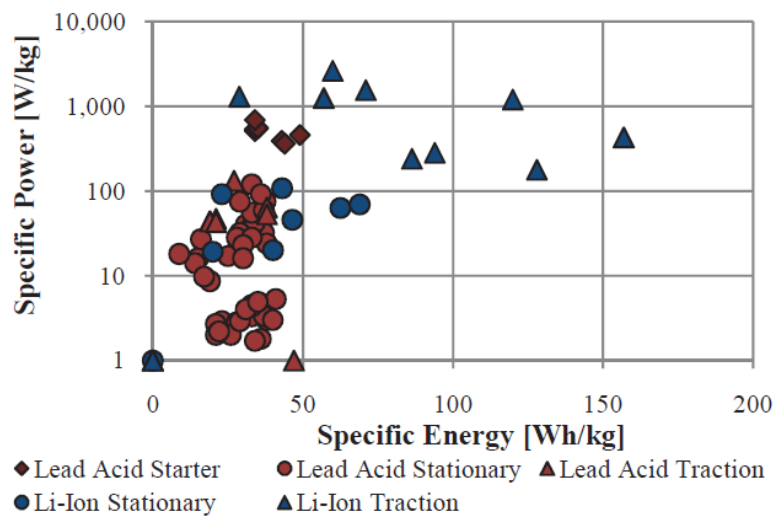
23 pav. Specifinė galia ir specifinė skirtingų baterijų energija [28]

Iškrovimo gylis (*DOD deaf of discharge*). Iškrovimo gylis yra absoliutus iškrovimas, palyginti su susijusia akumulatoriaus talpa. Iškrovimo gylis sukelia mechaninius įtempius ir šalutines reakcijas akumuliatoriuje, dėl kurių sumažėja akumulatoriaus ciklas. Ciklo trukmė labai priklauso nuo iškrovimo gylio. Kuo didesnis iškrovimo gylis, tuo trumpesnis bus akumulatoriaus veikimo laikas [28]. Koreliacija tarp ciklo trukmės ir iškrovimo gylio skirtingoms baterijų technologijoms parodyta (24 pav.) [28].



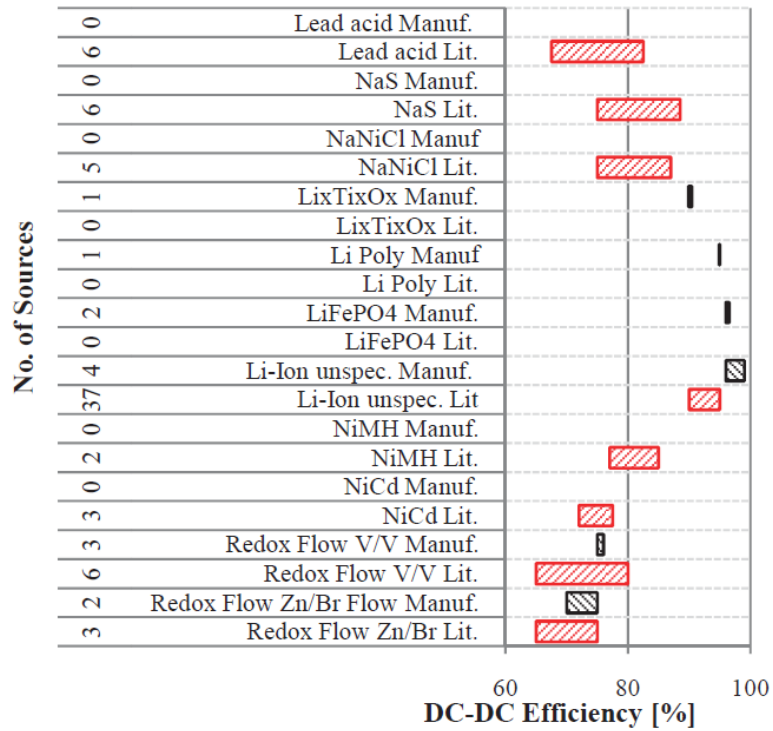
24 pav. Ciklo trukmė ir skirtingų baterijų išsikrovimo gylis [28]

Stacionarios švino rūgšties ir ličio jonų baterijos turi santykinai mažos specifinės energijos ir galios vertes. Stacionarios sistemos turi aukštus energijos ir galios rodiklius. Švino rūgšties akumuliatoriai pasiekia pakankamai didelį galios tankį, bet tik mažesnę nei 50 Wh/kg energijos tankį (žr. 25 pav). Ličio jonų akumuliatoriai paprastai turi žymiai didesnę energijos tankį (iki 157 Wh/kg) [28].



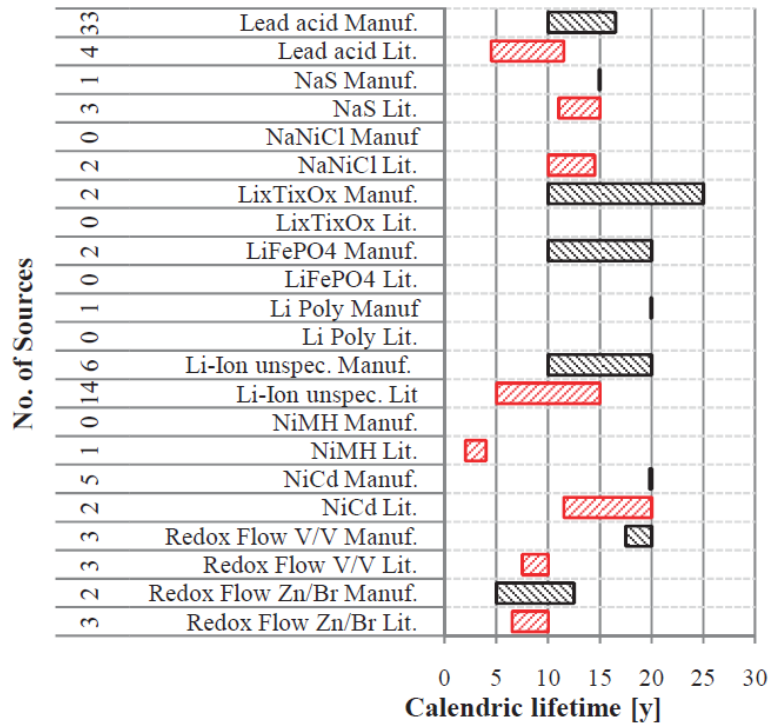
25 pav. Savitoji galia ir specifinė energija įvairiose taikymo srityse [28].

Efektyvumo laipsnis. Efektyvumo laipsnis svarbus veiksnys, nes jis lemia energijos kiekį, kurį galima sukaupti ir atiduoti. DC-DC efektyvumas skirtingiems akumuliatorių technologijoms pavaizduotas (26 pav.). Ličio jonų baterijos pasižymi didžiausiu DC/DC srovės perdavimo efektyvumu, palyginti su visomis kitomis sistemomis, siekiančiomis iki 98 %. Aukštos temperatūros baterijos ir „Redox Flow“ baterijų efektyvumas yra nuo 65 % iki beveik 90 %. Efektyvumas nėra pastovi reikšmė, o kinta priklausomai nuo C normos, aplinkos temperatūros ir kitų veiksnių [28].

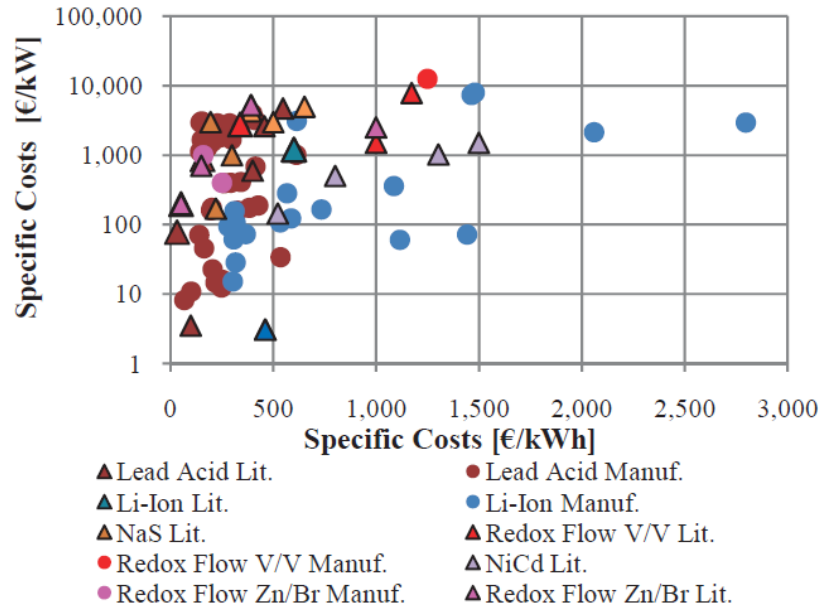


26 pav. Skirtingų baterijų didžiausias ir mažiausias DC-DC efektyvumas (medianos vertės) [28]

Literatūros ir gamintojų duomenų palyginimo kalendorinis gyvavimo laikas pavaizduotas (27 pav.). Raudonos juostos rodo literatūros duomenis, o juodos juostos – gamintojo medianas.

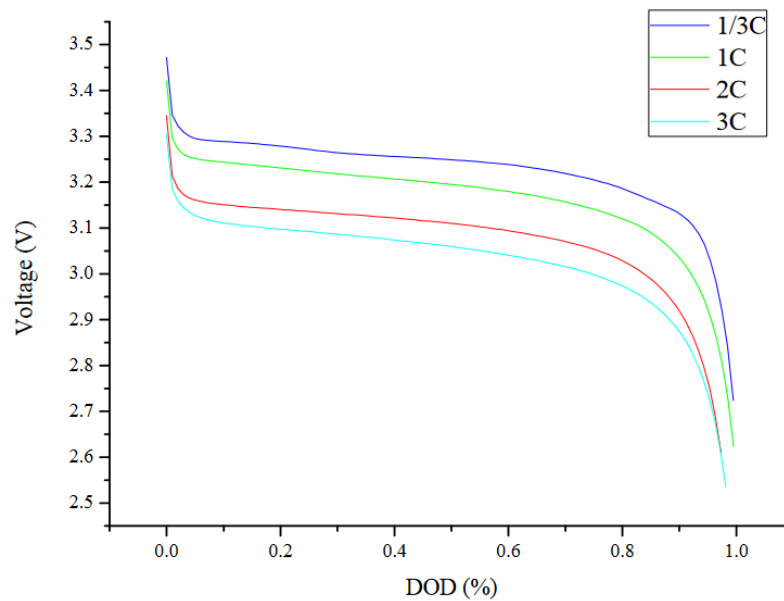


27 pav. Skirtingų baterijų didžiausia ir mažiausia kalendorinė tarnavimo trukmė (vidutinės reikšmės) [28]



28 pav. Konkretios skirtingų baterijų technologijų sąnaudos (gamintojo ir literatūros duomenys) [28]

Ličio geležies fosfato (*lithium iron phosphate LFP*) elementų įtampos ir DOD kreivių charakteristikos pavazduotos (29 pav.).



29 pav. Įtampos ir *DOD* priklausomybė esant skirtingam iškrovimo greičiui [29]

Ličio jonų akumuliatorių (*State of charge SOC*) būseną parodo likusią akumulatoriaus talpą. Ličio baterijos SOC būseną skaičiuojama pagal (11) lygtį [30].

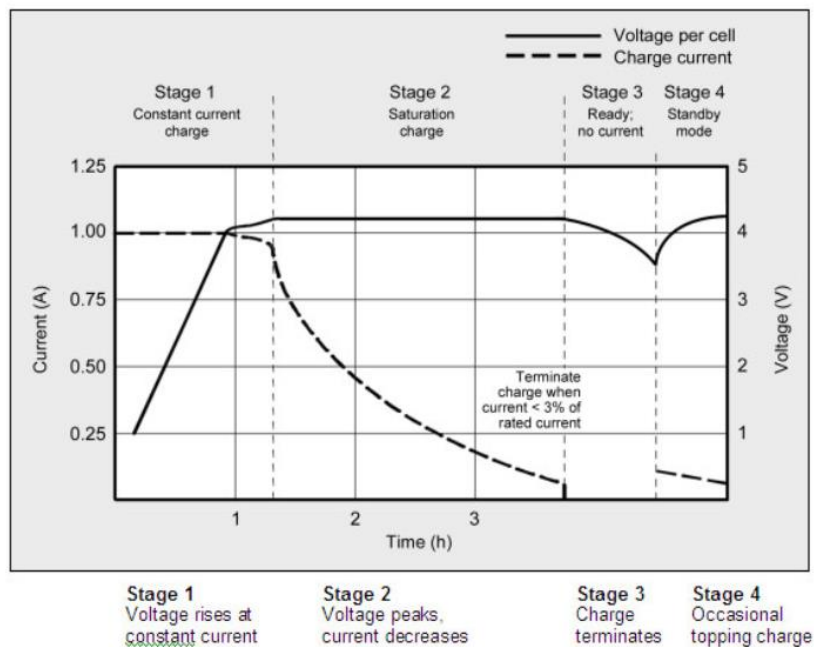
$$SOC = \frac{Q_{remain}}{Q_{rated}} \times 100 \% \quad (11)$$

čia:

Q_{remain} – likusi talpa (Ah);

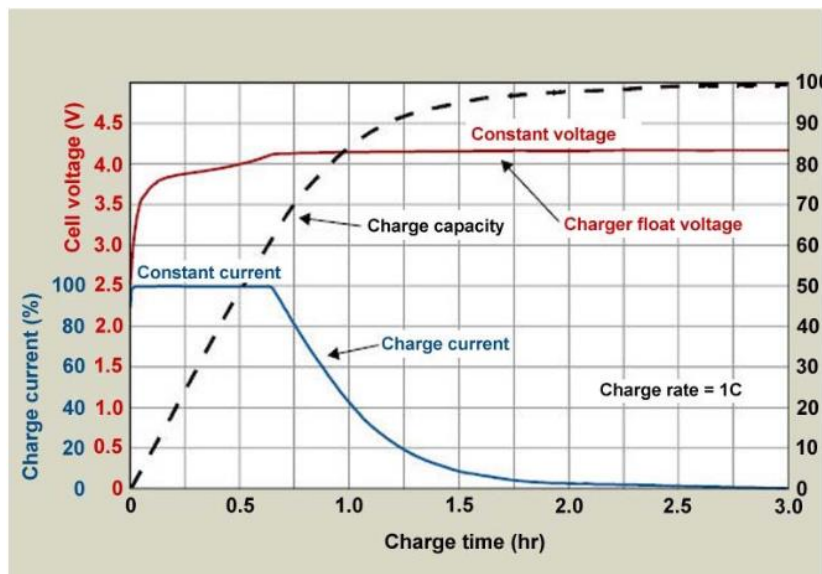
Q_{rated} – vardinė talpa (Ah).

Ličio jonai su tradicinėmis katodinėmis medžiagomis: kobaltu, nikeliu, manganu ir aliuminiu paprastai įkraunami iki 4,20 V elementui [31]. Leistinas nuokrypis yra ± 50 mV/elementui. Kai kurie nikelio pagrindu pagaminti akumuliatoriai įkraunami iki 4,10 V / elementui [31]. Didelės talpos ličio jonų akumuliatorių įtampa gali siekti 4,30 V elementui ir daugiau [31]. Padidinus įtampą, padidėja talpa, tačiau viršijant specifikacijas, akumuliatorius apkraunamas ir kyla pavojus saugai [31]. Ličio jonų akumuliatorių įkrovimo etapai pavaizduoti (30 pav.).



30 pav. Ličio akumuliatorių įkrovimo etapai [31]

Pirmą kartą įkrovus akumuliatorių, įtampa greitai padidėja. Talpa padidėja, kai akumuliatorius pasiekia pilną įkrovimą [31]. Ši krūvio charakteristika yra būdinga visiems akumuliatoriams. Ličio akumuliatorių talpos, įtampos palyginimas laiko atžvilgiu pavaizduota (31 pav.).



31 pav. Ličio baterijų talpos, įtampos palyginimas laiko atžvilgiu [30]

Akumuliatoriaus valdymo sistema (*Battery Management System*) – tai sistema, reguliuojanti visą akumuliatoriaus veiklą, kuri vyksta tarp akumuliatoriaus ir reikiamos apkrovos. Akumuliatoriaus valdymo sistema taip pat vykdo elementų apsaugą nuo perkrovimo, per didelės srovės, trumpojo jungimo ir panašiai. Per didelis akumuliatoriaus įkrovimas gali sukelti temperatūros padidėjimą ir netgi sukelti sprogimą ar liepsną. BMS vaidina svarbų vaidmenį užtikrinant saugumą ir padidina akumuliatoriaus energiją [32]. Balansavimas padeda nustatyti 4,2 V akumuliatoriaus elementų įtampos vertę [32]. Ličio akumuliatoriai nėra atsparūs visiškam ir (arba) vadinamajam „gilijam iškrovimui“. Ilgą laiką išlikę tokioje būsenoje, jie gali būti nepataisomai sugadinti. Įtampai nukritus žemiau leistinos minimalios reikšmės U_{min} yra pažeidžiama elemento kristalinė struktūra. Tolesnis įkrovimas tampa neįmanomas [32].

Mikrociklai. Mikrociklai tai SOC svyravimai $< 2 \%$, atsirandantys dėl srovės ženklo pasikeitimo akumuliatoriaus įkrovimo arba iškrovimo metu. Mikrociklai turi nereikšmingą ar net teigiamą poveikį ličio jonų ląstelių senėjimui, palyginti su senėjimu, kurį sukelia visi ciklai [33]. Jei akumuliatoriaus naudojimui matuoti naudojamas įkrovimo pralaidumas arba lygiaverčiai pilni ciklai, tada mikrociklų veikiamų elementų eksploatavimo laikas pailgėja 50 %, palyginti su elementais, kuriems taikomi tik pilni ciklai [33].

Lyginamoji energijos kaina (*Levelized cost of electricity LCOE*) yra išlaidų matas, kuriuo bandoma palyginti skirtingus elektros gamybos būdus lyginamuoju pagrindu. Tai ekonominis vidutinių bendrųjų elektros energijos gamybos, statybos ir eksploatavimo sąnaudų per jo eksploatavimo laiką įvertinimas, padalytas iš bendros energijos sumos per eksploatavimo laiką. LCOE taip pat gali būti laikomas mažiausiomis sąnaudomis, už kurias turi būti parduodama elektra, kad būtų pasiektas atsipirkimas per visą projekto gyvavimo laikotarpį. LCOE tikslas – palyginti skirtingas energijos gamybos technologijas. Bendroji LCOE lygtis (12) [34].

$$LCOE = \frac{\text{Life cycle cost (Eur.)}}{\text{Life time energy production (kWh)}} \quad (12)$$

Gyvavimo ciklo sąnaudų analizė (*Life Cycle Cost Analysis*). Gyvavimo ciklo sąnaudas (LCC) sudaro visos prekės įsigijimo ir eksploatavimo išlaidos per visą jo naudojimo laiką, išreikštos dabartine verte [35].

Atskiros fotovoltinės sistemos išlaidos apima: įsigijimo išlaidas, eksploatavimo išlaidas, priežiūros išlaidas ir pakeitimo išlaidas. Kitas fotovoltinės sistemos ekonominio matavimo parametras yra lūžio taškas (BEP) arba atsipirkimo laikas (PBT) metais [35]. BEP yra metų skaičius, per kurį atgaunama pradinė investicijos kaina, kuri apskaičiuojama pagal 13 lygtį.

$$BEP = \frac{LCC}{Q_{AP} \times UEC_{MC}} \quad (13)$$

čia:

Q_{AP} – metinė energijos gamyba kWh/metus;

UEC_{MC} – elektros tiekimas (Eur/kWh).

Paprastasis atsipirkimo laikas (*Simple payback time SPT*) – tai metai, kurių reikia, kad pinigų srautas prilygtų pradinei investicijai [36]. Apskaičiuojama pagal (14) lygtį:

$$SPT = \frac{TC - InG}{(E_{sav} + C_{sav}) - (OM_{cost} + F_{cost})} \quad (14)$$

čia:

TC – pradinės projekto kapitalo sąnaudos;

InG – subsidijos ir dotacijos;

E_{sav} – sutaupymas per metus;

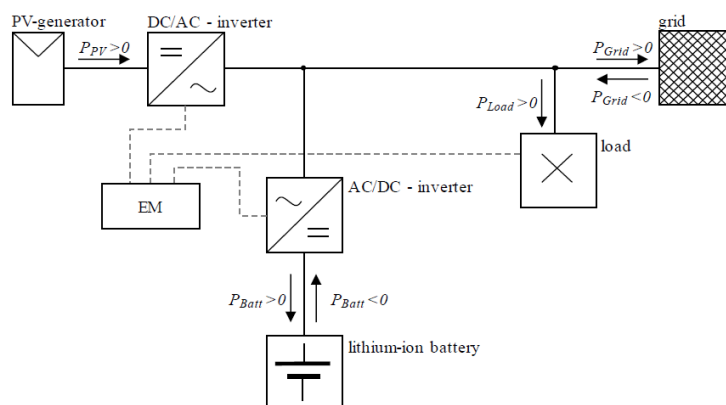
OM_{cost} – metinės išlaidos eksploatacijai;

F_{cost} – metinės elektros energijos sąnaudos.

Energijos atsipirkimo laikas (EPBT) gali būti apibrėžtas kaip laikas, kurio reikia, kad fotovoltinis modulis pagamintų lygiavertį energijos kiekį, sunaudojamą jam gaminti per savo gyvavimo ciklą [37]. Fotovoltinės sistemos energijos atsipirkimo laiką įtakoja daugelis veiksnių: gamybos technologija, komponentų montavimas, saulės spinduliuotės intensyvumas, sistemos montavimo kampas, komponentų efektyvumas ir panašiai. Apskaičiuota, kad ant stogo montuojamas plonasluoksnio modulis EPBT yra 2,5 metų, o ant stogo montuojamas daugiakristalinis silicio modulis - 3,1 metų [37].

1.9 PV ir akumulatoriaus įkrovimo valdymas pagal apšviestumo prognozę ir tinklo apkrovą

Pagrindiniai sistemos komponentai yra PV elektrinė, ličio jonų akumulatorius, keitikliai, vartotojų apkrova, sąsaja su tinklu ir elektros valdymo sistema (EV). Valdymo schema pavaizduota (32 pav.) [38].



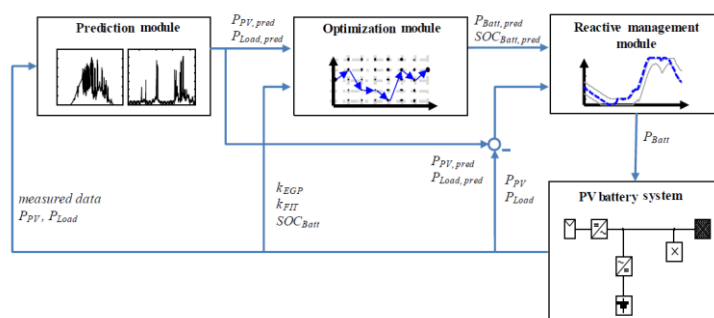
32 pav. PV ir akumulatoriaus valdymo schema [38]

Laikoma, kad akumulatoriaus galia P_{Batt} yra neigiama iškrovimo metu ir teigiama įkrovimo metu. Galios balanso lygtis (15).

$$P_{PV} - P_{Load} - P_{Batt} - P_{Grid} = 0. \quad (15)$$

Visi elektros grandinės elementai priklauso nuo SOC ir srovės krypties. Siekiant nustatyti SOC kaip akumulatoriaus srovės funkciją, buvo naudojamas metodas vadinamas „Coulomb skaičiavimu“. Keitiklių modeliai buvo sukurti naudojant efektyvumo kreives. Modeliavimo pagrindas yra istorinės laiko eilutės, susijusios su PV ir apkrovos galia [38].

Optimizavimo modelis pagrįstas EV modelio žvelgiant į tipišką galios poreikį gyvenamajame name, kuriame yra fotovoltinės energijos sistema, laikotarpiai su energijos pertekliumi, kuri turi būti tiekiami į tinklą ir laikotarpiai, kai yra energijos trūkumas turi būti tiekiamas iš tinklo. EV modulis yra atsakingas už sistemos būsenos stebėjimą, PV prognozes ir apkrovos, optimizuoti akumulatoriaus įkrovimo strategiją ir valdyti galios srautus [38]. Optimalaus valdymo modelio struktūrinė schema pavaizduota (33 pav.).



33 pav. Optimalaus valdymo modelio struktūrinė schema [38]

Optimalaus valdymo modulį galima suskirstyti į prognozavimo modulį, optimizavimo modulį ir reaktyvųjų valdymo modulį [38]. Prognozavimo modulis prognozuoja PV elektros gamybą ir apkrovą. Remiantis praėjusios dienos išmatuota PV galia, sudaromos kitos dienos prognozės vidutiniškai kas 15 min. [38]. Apkrovos prognozės generavimas vadovaujasi tuo pačiu principu [38]. Kai PV ir apkrovos galia yra suprognozuota, optimizavimo modulis sukuria SOC kreives kitai dienai atsižvelgiant į tikslus „elektros sąnaudos“, „balansavimas tinkle“ ir „pailgintas akumulatoriaus veikimo laikas“.

1.10 Optimalus akumulatoriaus talpos parinkimas ir valdymas.

Fotovoltinėse elektrinėse, akumulatorius yra naudojamas perteklinei elektros energijai kaupti, kai saulės energijos ištekliai maži arba jų nėra. Akumulatoriaus saugojimo dinamikos sistema, įkrovimo ir iškrovimo procesų metu, išreiškiama pagal (16) lygtį: [39]

$$E(t) = (t - 1) + \left[P_{Ch}(t) \times \eta_{Ch} - \frac{P_{Dis}(t)}{\eta_{Dis}} \right] \times \Delta t \quad (16)$$

čia:

$P_{Ch}(t)$ – įkrovimo galia laiko momentu t ;

$P_{Dis}(t)$ – iškrovimo galia laiko momentu t ;

η_{Ch} – įkrovimo efektyvumas;

η_{Dis} – iškrovimo efektyvumas;

Δt – laiko intervalas.

$$SOC(t) = (t - 1) + \left[P_{Ch}(t) \times \frac{\eta_{Ch}}{E_{Nom}} - \frac{P_{Dis}(t)}{\eta_{Dis}} \right] \times \Delta t \quad (17)$$

čia:

E_{Nom} – vardinė akumulatoriaus talpa;

$SOC(t - 1)$ – prieš tai buvusi SOC būsena.

Iškrovimo gyliu DOD siekiama apsaugoti akumulatoriaus tarnavimo laiką, neleidžiant per daug išsikrauti [39].

$$SOC^{Min} = (1 - DOD^{max}) \times SOC^{Max} \quad (18)$$

Bendras energijos kiekis, kurį galima sunaudoti iš akumulatoriaus, priklauso nuo didžiausio leistino dydžio DOD ir išreiškiamas pagal (19) lygtį. [38]

$$E^{Total} = E_{Nom} \times \frac{\% DOD^{Max}}{100} \quad (19)$$

Optimalus akumulatoriaus sistemos dydis skaičiuojams pagal (*time of use TOU*) kainodaros strategiją. Reikalingi šie parametrai : komponentų parametrai, apkrovos poreikis, saulės energijos išteklių duomenys, taip pat TOU tarifų kainos [39].

Kaštų funkcija naudojama tikslinėje funkcijoje valdant energijos srautą, nes pagrindinis tikslas yra sumažinti elektros tinklų vartojimo sąnaudas pagal TOU tarifus. Energija iš elektros tinklo sunaudojama pirminei apkrovai tiekti, kai nepakanka energijos iš saulės PV modulių sistemos arba kai tai padaryti pigiau pagal TOU tarifus [33]. Tikslas funkcija (F) bet kuriuo laiku (j) išreiškiama pagal (20) lygtį: [39]

$$F = \sum_{j=1}^N C_j \times P_{3(j)} \times \Delta t \quad (20)$$

čia:

C_j – TOU elektros energijos kainos tarifas laiko momentu j;

$$P_{Load} = P_{1j} + P_{2j} + P_{3j} (1 \leq j \leq N) \quad (21)$$

čia:

P_{1j} – PV galia tiekiamą į apkrovą, kW;

P_{2j} – Akumulatoriaus galia perduodama į apkrovą, kW.

Optimizavimo metodas kontroliuojamas taip, kad būtų panaudota visa sukaupta energija konkrečią dieną [34]. Pradinė akumulatoriaus SOC busena bus pasiekta modeliavimo pabaigoje, kaip parodyta (22) lygtyje :

$$\sum_{j=1}^N P_{4(j)} \times \Delta t - \sum_{j=1}^N P_{2(j)} \times \Delta t = 0 \quad (22)$$

$P_{4(j)}$ – PV aktyvi galia perduodama į akumuliatorių.

Visų valdymo kintamųjų išėjimo galia turi būti leistinose ribose, kad sistema būtų stabili. Pagal pateiktą (23) lygtį [39].

$$0 \leq P_{i(j)} \leq P_{PV(j)}^{Max} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (1 \leq j \leq N) \quad (23)$$

$$P_{1(j)} + P_{4(j)} \leq P_{PV(j)}^{Max} \quad (1 \leq j \leq N) \quad (24)$$

čia:

$P_{PV(j)}^{Max}$ – PV galia laiko momentu j (kW).

Elektros tarifas pagal naudojimo laiką (*Time of use TOU*). Šis elektros energijos tarifas yra viena žinomiausių būdų, galinčių sumažinti didžiausią paklausą, skatinant vartotojus perkelti savo energijos poreikį iš piko laikotarpio į ne piko laikotarpį [40].

2 Tiriamoji dalis

Projektuojamai saulės elektrinei su elektros energijos kaupimo sistema, yra surenkami šie duomenys:

- a) elektros energijos poreikis per metus - 3328 kWh;
- b) elektrinės intaliavimo vieta – Kauno regionas, Lietuva.
- c) fotovoltinių modulių instaliavimo kampas azimuto atžvilgiu – pietus (180°)
- d) fotovoltinių modulių instaliavimo kampas vertikalia ašimi – 39 °
- e) fotovoltinių modulių parametrai: efektyvumas - 22%, I_{mpp} -10,
- f) vidutinė saulės energija GHI per metus – 1039,2 kWh/m²
- g) autonomijos laikas – 24 valandos.

2.1 Energijos poreikio analizė

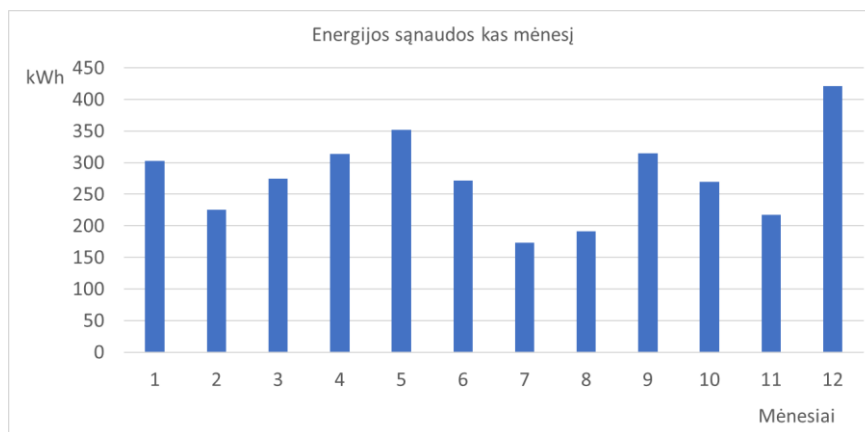
Metinis tiriamo gyvenamojo namo energijos poreikis - 3328 kWh.

4 lentelė. Elektros energijos poreikis per metus

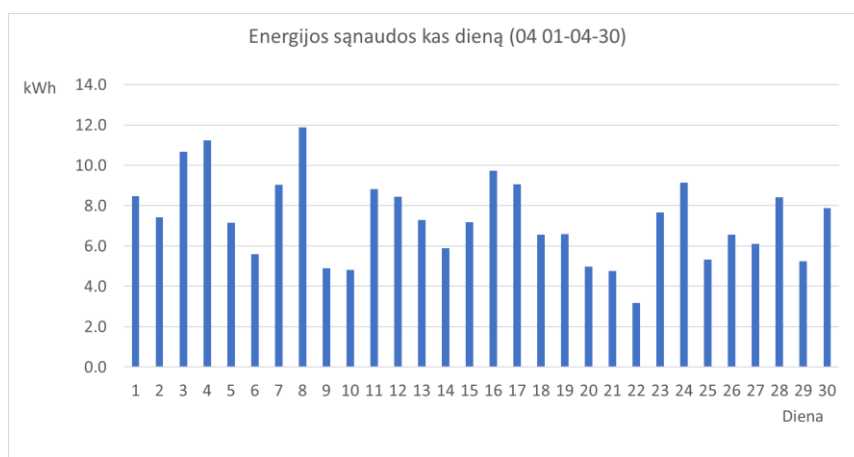
Mėnesiai	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Viso
kWh	303	225	275	314	352	272	173	191	315	270	217	421	3328

5 lentelė. Sunaudotos ir sugeneruotos elektros energijos rezultatai.

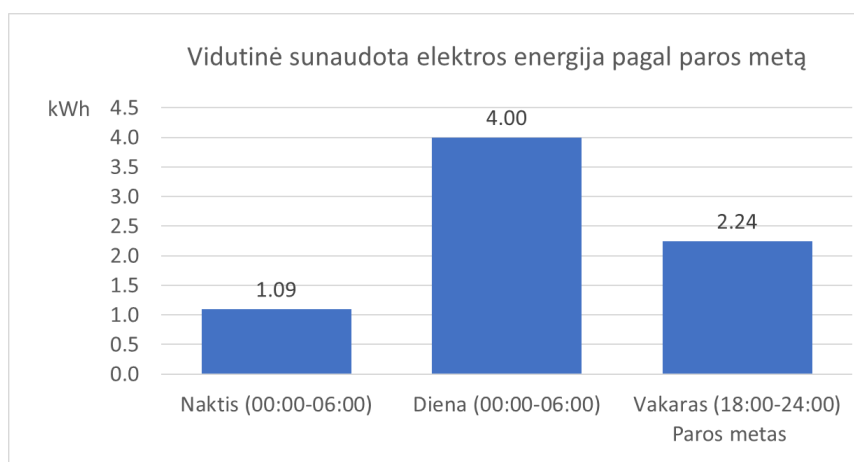
Parametras	Energija, kWh
Viso sunaudota energija per balandžio mėnesį	220.0
Viso sugeneruota energija per mėnesį	31.1
Vidutinis sunaudojimas per dieną	7.3
Vidutinis saulės generavimas per dieną	1.0
Dienos 12-18 val sunaudojimas	3.9
Vakaro 18-00 sunaudojimas	2.4
Per naktį 00-06 sunaudojimas	1.2
Sunaudota per metus	3328
Sunaudota vidutiniškai per mėnesį	277



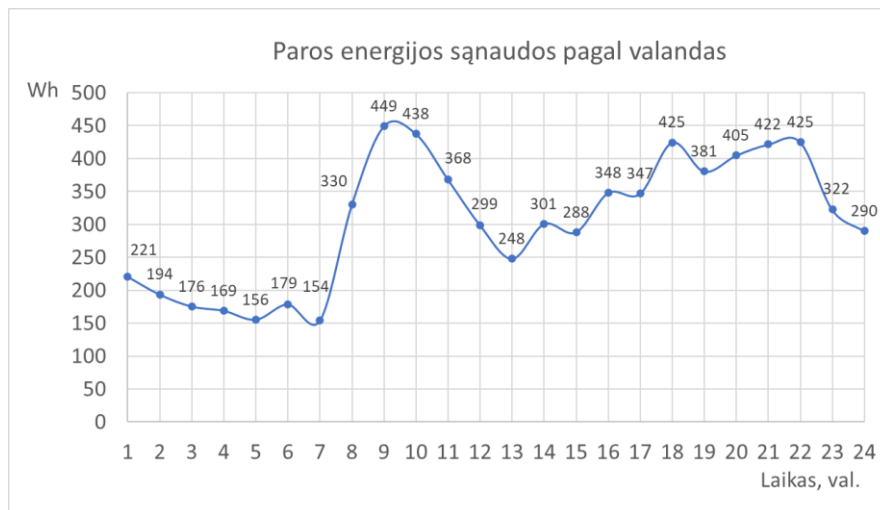
34 pav. Gyvenamojo namo energijos poreikis kas mėnesį



35 pav. Energijos sunaudojimo grafikas kas dieną 04.01-04.30.



36 pav. Vidutinė sunaudota energija pagl paros laiką.



37 pav. Paros energijos sąnaudos pagal valandas.

2.2 Saulės elektrinės instaliuotos galios skaičiavimas

Remiantis Global solar atlas duomenimis [9], Kauno regione horizontalioji saulės energija (GHI) per metus yra $1039,2 \text{ kWh/m}^2$.

Fotovoltinio modulio RSM40-8-390MB Titan S pagrindiniai parametrai:

- I_{mpp} – $11,52 \text{ A}$;
- V_{mpp} – $33,88 \text{ V}$;
- P_{max} – 390 W ;
- V_{oc} – $40,69 \text{ V}$;
- P_{Veff} – $20,3$.
- Fotovoltinio modulio elementų plotas – $1,92 \text{ m}^2$;
- PV_d – degradacija per metus – $0,55 \%$.

Fotovoltinių modulių plotas skaičiuojamas naudojant šią lygtį:

$$PV_{plotas} = \frac{E_L}{G_{in} \times \eta_{pv} \times \eta_{out}} \quad (25)$$

čia:

E_L – elektros energijos poreikis per metus, (kWh);

G_{in} – saulės energija per metus (kWh/m^2);

η_{pv} – fotovoltinio modulio efektyvumas;

η_{out} – keitiklio efektyvumas.

$$PV_{plotas} = \frac{3328}{1039,2 \times 0,203 \times 0,97} = 16,26 \text{ m}^2$$

Fotovoltinės elektrinės galia skaičiuojama naudojant šią lygtį:

$$PV_{galia} = PV_{plotas} \times \eta_{pv} \quad (26)$$

$$PV_{galia} = 16,26 \times 0,203 = 3,3 \text{ kWp}$$

Fotovoltinių modulių degradacija per 25 metus skaičiuojama naudojant šią lygtį:

$$\eta_d = PV_d \times n = 13,75 \% \quad (27)$$

čia:

n – metų skaičius.

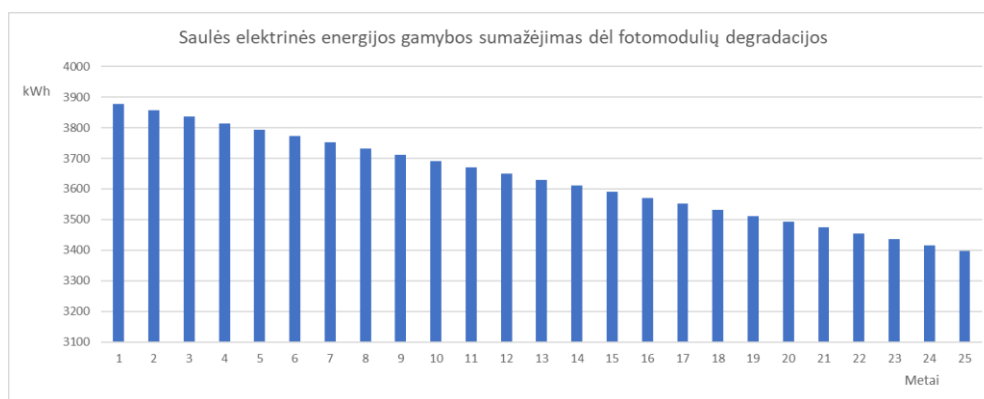
$$\eta_d = 0,55 \times 25 = 13,75 \%$$

PV galia įvertinus fotomodulių degradacija skaičiuojama naudojant šią lygtį:

$$PV_p = PV_{galia} + \frac{\eta_d \times PV_{galia}}{100} \quad (28)$$

$$PV_p = 3,3 + \frac{13,75 \times 3,3}{100} = 3,75 \text{ kWp};$$

Saulės elektrinės 3,9 kWp instaliuotos galios fotovoltinių modulių gaminamos energijos degradacija per 25 metus pavaizduota (38 pav.).



38 pav. Saulės elektrinės energijos gamybos mažėjimas dėl fotovoltinių modulių degradacijos

Fotovoltinių modulių kiekis skaičiuojamas naudojant šią lygtį:

$$PV_{kiekis} = \frac{PV_p}{P_{max}} \quad (29)$$

$$PV_{kiekis} = \frac{3,75}{0,39} = 9,62 \approx 10 \text{ vnt.}$$

Fotovoltinės elektrinės instaliuota galia skaičiuojama naudojant šią lygtį:

$$PV_{inst.} = PV_{max} \times PV_{kiekis} \quad (30)$$

$$PV_{inst.} = 0,39 \times 10 = 3,9 \text{ kWp}$$

2.3 Energijos kaupimo sistemos parametru skaičiavimas

Pasirinktas žemos įtampos (48 V) ličio geležies fostato akumulatorius (LiFePO₄), nes finansinė nauda yra didesnė. Skaičiavimuose naudoti šie duomenys: $E_d - 7,3$ kWh, $t_{ups} - 24$ val., DOD – 10 %, SOC – 90 % . Įkrovos lygis 90 % pasirinkta dėl to, kad padidėjus įtampai tinkle virš 250 V, saulės elektrinė neišsijungų, o pereitų į akumulatoriaus įkrovimo režimą.

Akumulatoriaus nominali įtampa skaičiuojama naudojant šią lygtį:

$$U_{akum.} = U_{el.nom.} \times S \quad (31)$$

čia:

$U_{akum.}$ – akumulatoriaus įtampa (V);

$U_{el.nom.}$ – nominali elemento įtampa, 3,2 (V);

S – elementų skaičius, 16 vnt..

$$U_{akum.} = 3,2 \times 16 = 51,2 V$$

Akumulatoriaus talpa skaičiuojama naudojant šią lygtį:

$$C_{akum.} = \frac{E_d \times (t_{ups}/24)}{SOC - DOD} \times 100 \quad (32)$$

čia:

$C_{akum.}$ – akumulatoriaus talpa (kWh);

E_d – vidutinis energijos poreikis per dieną (kWh);

t_{ups} – autonomijos laikas (val.);

$$C_{akum.} = \frac{7,3 \times (24/24)}{90 - 10} \times 100 = 9,12 \text{ kWh}$$

Akumulatoriaus talpa ampervalandėmis (Ah) skaičiuojama naudojant šią lygtį:

$$C_{akum.Ah} = \frac{1000 \times C_{akum.kWh}}{U_{akum.}} \quad (33)$$

$$C_{akum.Ah} = \frac{1000 \times 9,12}{51,2} = 178,12 \text{ Ah}$$

6 lentelė. Akumulatoriaus parametrai

Parametras	Parametras	
Pasirinktas akumulatoriaus tipas	LiFePo4	
Pasirinkta elementų skaičius	16	vnt
Autonomijos laikas	24	val
Akumulatoriaus talpa, kWh	9.12	kWh
Akumulatoriaus talpa, Ah	178.12	Ah
Akumulatoriaus nominali įtampa	51.2	V
Pilnai įkrauto elemento įtampa	3.65	V
Nominali elemento įtampa	3.2	V
Iškrauto elemento įtampa	2.5	V

2.4 Nuolatinės ir kintamosios srovės laidininkų įtampos kritimo ir nuostolių skaičiavimas

Skaičiuojama nuolatinės srovės (DC) laidininkų įtampos kritimas ir galios nuostoliai.

Skaičiavimuose naudojami šie duomenys: ρ vario $-0,017 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ prie 20°C , nuolatinės įtampos laido ilgis l_{dc} –40 m., nuolatinės įtampos laidininko skerspjūvis S – 4 mm^2 . I_{mpp} –11,52 A.

Laidininko varža (R_{LDC}) skaičiuojama naudojant šią lygtį:

$$R_{LDC} = \rho \times \frac{l_{dc}}{S} \quad (34)$$

čia:

R_{LDC} – laidininko varža, Ω ;

ρ – vario savitoji elektrinė varža $\Omega \cdot \text{m}$;

l_{dc} – laidininko ilgis, m.

$$R_{LDC} = 0,017 \times \frac{40}{4} = 0,17 \Omega$$

Įtampos kritimas (ΔU) skaičiuojamas naudojant šią lygtį:

$$\Delta U = I_{DC} \times R_{LDC} \quad (35)$$

$$I_{DC} = I_{mpp}$$

$$\Delta U = 11,52 \times 0,17 = 1,96 \text{ V}$$

Įtampos kritimas procentais ($\Delta U_{\%}$) naudojant šią lygtį:

$$\Delta U_{\%} = \frac{\Delta U}{U_m} \times 100 \quad (36)$$

čia:

U_m – visų sujungtų fotovoltinių modulių grandinės įtampa, V.

$$U_m = V_{mpp} \times PV_{kiekis} \quad (37)$$

$$U_m = 33,88 \times 10 = 338,8 \text{ V}$$

$$\Delta U_{\%} = \frac{1,96}{338,8} \times 100 = 0,579 \%$$

Galios nuostoliai laidinikuose ($P_{DC \text{ nuost.}}$) naudojant šią lygtį:

$$P_{DC \text{ nuost.}} = I_{DC}^2 \times R_{LDC} \quad (38)$$

$$P_{DC \text{ nuost.}} = 11,52^2 \times 0,017 = 22,56 \text{ W}$$

7 lentelė. Įtampos kritimas ir galios nuostoliai nuolatinės srovės laidinikuose

Parametras	vertė	matavimo vienetai
DC kabelio varža	0.17	ohmai
Įtampos kritimas	1.96	V
PV DC įtampa	338.8	V
Įtampos kritimas proc.	0.579	proc.
Galios nuostoliai DC kabeliuose	22.56	W

Skaičiuojama kintamos srovės (AC) tinklo laidininkų įtampos kritimas ir galios nuostoliai.

Skaičiavimuose naudojami šie duomenys: instaliuota saulės elektrinės fotovoltinių modulių galia - $P_{inst} = 3,9 \text{ kW}$, nominali kintamosios srovės tinklo įtampa $U_n = 400 \text{ V}$, galios faktorius $\cos\varphi \sim 0,97$, 0,4 kV kabelio ilgis 2 m., laidiniko skerspjūvis – 2,5 mm².

Laidininkų didžiausia srovė (I_{max}) skaičiuojama naudojant šią lygtį:

$$I_{max} = \frac{PV_{inst.}}{\sqrt{3} \times U_n \times \cos\varphi} \quad (39)$$

čia:

U_n – nominali kintamosios srovės (AC) tinklo įtampa, V;

$\cos\varphi$ – galios faktorius .

$$I_{max} = \frac{3,9}{\sqrt{3} \times 0,4 \times 0,97} = 7,11 \text{ A}$$

Laidiniko įtampos kritimas (ΔU_{AC}) skaičiuojama naudojant šią lygtį:

$$\Delta U_{AC} = \sqrt{3} \times I_{max} \times R_{LAC} \quad (40)$$

Laidininko (R_{LAC}) varža skaičiuojama naudojant šią lygtį:

$$R_{LAC} = 0,017 \times \frac{2}{2,5} = 0,014 \Omega$$

$$\Delta U_{AC} = 1.732 \times 7,11 \times 0.014 = 0.172 V$$

Laidininko procentinis įtampos kritimas ($\Delta U_{\%}$) skaičiuojama naudojant šią lygtį:

$$\Delta U_{\%} = \frac{\Delta U}{U_m} \times 100$$

$$\Delta U_{\%} = \frac{0.172}{400} \times 100 = 0.043 \%$$

Galios nuostoliai laidininkuose ($P_{AC \text{ nuost.}}$) skaičiuojama naudojant šią lygtį:

$$P_{AC \text{ nuost.}} = 3 \times I_{AC}^2 \times R_{LAC} \quad (41)$$

$$P_{AC \text{ nuost.}} = 3 \times 7,11_{AC}^2 \times 0,014 = 2,12 W$$

8 lentelė. Įtampos kritimas ir galios nuostoliai kintamosios srovės laidininkuose

Parametras	vertė	matavimo vienetai
AC kabelio varža	0.014	ohmai
AC kabelio įtampos kritimas	0.172	V
AC kabelio įtampos kritimas proc.	0.043	proc
Galios nuostoliai AC kabeliuose	2.12	W

Parinkti nuolatinės ir kintamosios srovės laidininkų parametrai atitinka „Elektros įrenginių įrengimo bendrąsias taisykles“.

9 lentelė. Elektros energijos poreikio, saulės elektrinės 3,9 kWp su elektros energijos kaupimo sistema LFP 9,6 kWh 48 V duomenys

Saulės elektrinės ir energijos kaupiklio parametrai	vertė	matavimo vienetai
Saulės elektrinės galia neįvertinus nuostolių	3.3	kW
Saulės elektrinės galia įvertinus nuostolius dėl PV degradacijos	3.75	kW
Saulės elektrinės bendra fotovoltinių modulių galia	3.9	kWp
Suskaičiuotas modulių kiekis	9.62	vnt
Fotovoltinių modulių kiekis	10	vnt
Galios nuostoliai DC kabeliuose	22.56	W
Galios nuostoliai AC kabeliuose	2.12	W
Galios nuostoliai dėl kabelių	0.02	kW
Pasirinktas akumuliatoriaus tipas	LiFePo4	
Pasirinkta elementų skaičius	16	vnt
Autonomijos laikas	24	val
Akumuliatoriaus talpa, kWh	9.12	kWh
Akumuliatoriaus talpa, Ah	178.12	Ah
Nominali akumuliatoriaus įtampa	51.2	V
Viso sunaudota energija per balandžio mėnesį	220.0	kWh
Vidutinis sunaudojimas per dieną	7.3	kWh
Vidutinis saulės generavimas per dieną	10.92	kWh
Sunaudota per metus	3328	kWh
Pagaminta energija per metus	4052	kWh

2.5 Ekonominė dalis

Šioje dalyje skaičiuojama saulės elektrinės ir dviejų energijos kaupimo sistemų finansinė nauda.

2.5.1 Saulės elektrinės 3,9 kWp ir energijos kaupimo sistemos žemos įtampos (48 V) 9,6 kWh finansinė nauda

Pasirinkta įranga:

Fotovoltiniai moduliai – RISEN RSM40-8-390MB TITAN S, 10 vnt.;

Keitiklis – Deye SUN-5K-SG04LP3, Hybrid, ON-Grid, OFF-Grid ;

Elektros energijos kaupimo sistema – Pylontech US5000x2 , žemos įtampos - 48 V, akumuliatoriuas talpa - 9,6 kWh.

10 lentelė. Saulės elektrinės 3.9 kWp ir energijos kaupimo sistemos LFP 9.6 kWh 48 V įrengimo kaštai

Įrenginio pavadinimas	Modelis	Kaina, Eur	Vnt	Suma su PVM
Fotovoltiniai moduliai	RISEN RSM40-8-390MB TITAN S	199	10	1990
Inverteris ON-Grid, OFF-Grid 5 kW, 3 fazių	Deye SUN-5K-SG04LP3-EU	2,260.48	1	2260.48
Energijos kaupimo sistema 48 V, 9.6 kWh	Pylontech US5000x2	3600	1	3600
Tvirtinimo konstrukcija, šiferio stogo dangai		36	8	288
Kabelis	1 kV Cu 1x4 mm ²	0.8	40	32
Įrengimo darbai, tvirtinimo konstrukcijos		170	3.3	561
APVA kompensuojama išmoka už saulės elektrinę				1292.04
Viso suma:				7439.44

Skaičiuojamas saulės elektrinė ir energijos kaupimo sistemos atsipirkimo laikas.

2022-2023 m. vidutinė 0.4 kV vidutinė elektros energijos kaina su persiuntimo paslauga – 0,31 Eur.

Iš saulės elektrinės įrengimo sąmatos yra išminusuota APVA parama saulės elektrinei 1292 Eur.

Tiriamam individualiam gyvenamajam namui per metus reikalinga 3328 kWh energijos kiekis.

Elektros energijos kaina per metus :

$$3328 \times 0,31 = 1031,68 \text{ Eur.}$$

Investicijos kaina :

Saulės elektrinės ir žemos įtampos (48 V) energijos kaupimo sistemos įrengimo kaina – 7439,44 Eur.

Atsipirkimo laikas:

$$7439,44 / 1031,68 = 7,2 \text{ metai.}$$

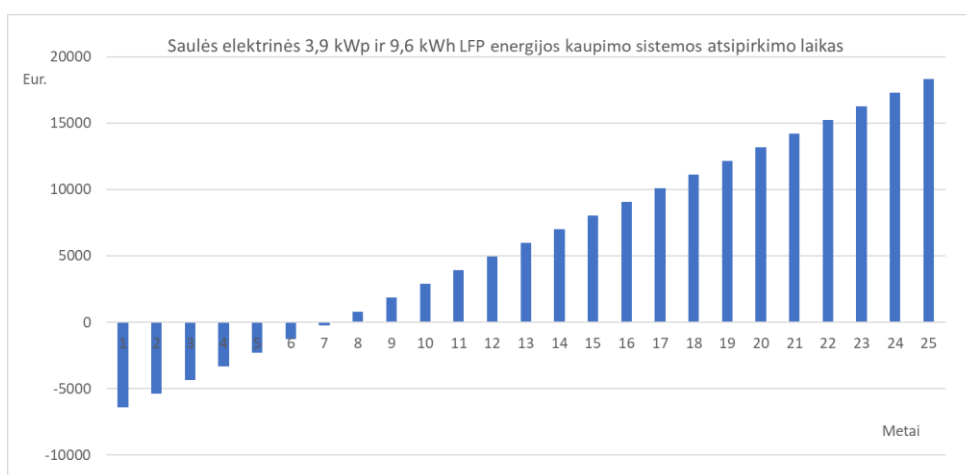
Skaičiuojama kilovatvalandės savikaina (LCOE).

Saulės elektrinė per 25 gyvavimo metus planuojama pagamins 91328 kWh elektros energijos.

$$LCOE = \frac{\text{Life cycle cost (Eur.)}}{\text{Life time energy production (kWh)}}$$

$$LCOE = 7439,44 / 91328 = 0.081 \text{ Eur./kWh}$$

Saulės elektrinės 3,9 kWp ir energijos kaupimo sistemos 9,6 kWh LFP žemos įtampos (48 V) atsipirkimo laikas pavaizduotas (39 pav.).



39 pav. Saulės elektrinės 3,9 kWp ir energijos kaupimo sistemos 9,6 kWh LFP žemos įtampos (48 V) atsipirkimo laikas

Skaičiuojamas žemos įtampos (48 V) elektros energijos kaupimo sistemos atsipirkimo laikas.

Elektros energijos pasaugojimo kaina 0,05929 Eur./kWh.

Apytiksliai 80 % saulės elektrinės pagamintos energijos per metus reikalinga pasaugoti.

Tiriamam individualiam namui per metus reikalinga 3328 kWh energijos kiekis. Pasaugojimo poreikis – 2662,4 kWh. Energijos skirstymo operatoriaus pasaugojimo mokestis– 0,05929 Eur/kwh. Pasaugojimo kaina per metus:

$$2662,4 \times 0,05929 = 157,85 \text{ Eur.}$$

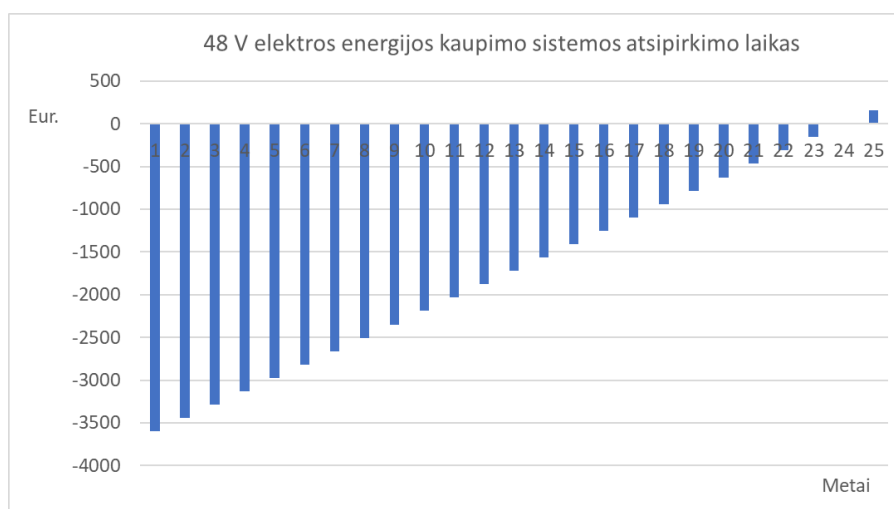
Investicijos kaina :

Žemos įtampos (48 V) energijos kaupimo sistemos investicija – 3600 Eur.

Atsipirkimo laikas:

$$3600 / 157,85 = 22,8 \text{ metai.}$$

Elektros energijos kaupimo sistemos (48 V) atsipirkimo laikas pavaizduotas (40 pav.).



40 pav. 48 V elektros energijos kaupimo sistemos atsipirkimo laikas

2.5.2 Saulės elektrinės 3,9 kWp ir elektros energijos kaupimo sistemos aukštos įtampos (288 V) 10,66 kWh finansinė nauda

Pasirinkta įranga:

Fotovoltiniai moduliai – RISEN RSM40-8-390MB TITAN S, 10 vnt.;

Keitiklis – Deye 5 kW SUN-5K-SG01HP3-EU-AM2, Hybrid, ON-Grid, OFF-Grid ;

Elektros energijos kaupimo sistema – Pylontech Force H2 288V, aukštos įtampos akumuliatorių sistema - 288 V, akumuliatorių talpa – 10,66 kWh.

11 lentelė. Saulės elektrinės 3,9 kWp ir energijos kaupimo sistemos LFP 10,66 kWh , 288 V įrengimo kaštai

Įrenginio pavadinimas	Modelis	Kaina, Eur	Vnt	Suma su PVM
Fotovoltiniai moduliai	RISEN RSM40-8-390MB TITAN S	199	10	1990
Inverteris ON-Grid, OFF-Grid 5 kW, 3 fazių	Deye 5 kW SUN-5K-SG01HP3-EU-AM2	2,260.48	1	2260.48
Energijos kaupimo sistema 288 V, 10.66 kWh	10,66 kWh Pylontech Force H2 288V	5990	1	5990
Tvirtinimo konstrukcija, šiferio stogo dangai		36	8	288
Kabelis	1 kV Cu 1x4 mm ²	0.8	40	32
Įrengimo darbai, tvirtinimo konstrukcijos		170	3.3	561
APVA kompensuojama išmoka už saulės elektrinę				1292.04
Viso suma:				9829.44

Skaičiuojamas saulės elektrinė ir energijos kaupimo sistemos atsipirkimo laikas.

2022-2023 m. vidutinė 0.4 kV vidutinė elektros energijos kaina su persiuntimo paslauga – 0,31 Eur.

Iš saulės elektrinės įrengimo sąmatos yra išminusuota APVA parama saulės elektrinei 1292 Eur.

Tiriamam individualiam namui per metus reikalinga 3328 kWh energijos kiekis.

Elektros energijos kaina per metus:

$$3328 \times 0,31 = 1031,68 \text{ Eur.}$$

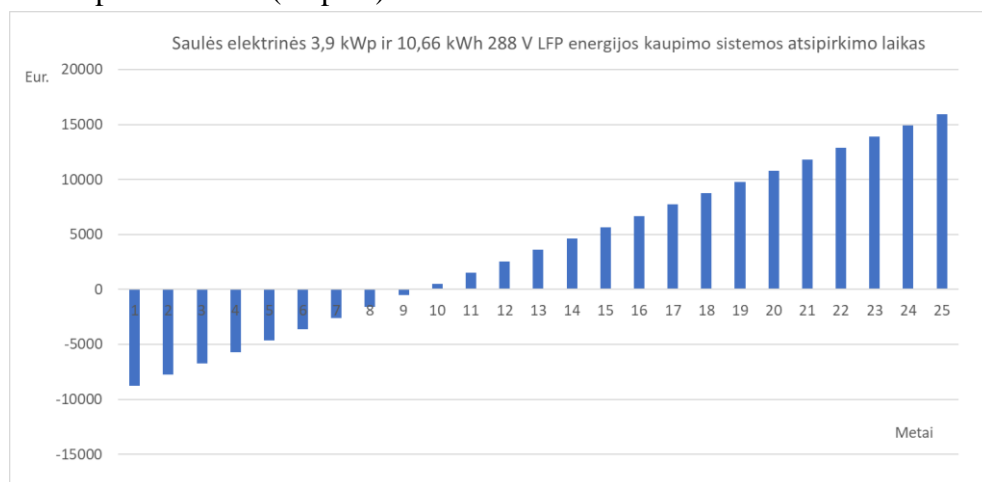
Investicijos kaina :

Saulės elektrinės ir aukštos įtampos (288 V) energijos kaupimo sistemos įrengimo kaina – 9630,44 Eur.

Atsipirkimo laikas:

$$9829,44/1031,68 = 9,5 \text{ metai.}$$

Saulės elektrinės 3,9 kWp ir energijos kaupimo sistemos 10,66 kWh LFP aukštos įtampos (288V) atsipirkimo laikas pavaizduotas (41 pav.).



41 pav. Saulės elektrinės 3,9 kWp ir energijos kaupimo sistemos 10,66 kWh LFP aukštos įtampos (288V) atsipirkimo laikas

Skaičiuojama elektros energijos kilovatvalandės savikaina (*LCOE*).

Saulės elektrinė per 25 gyvavimo metus planuojama pagamins 91328 kWh elektros energijos.

$$LCOE = \frac{\text{Life cycle cost (Eur.)}}{\text{Life time energy production (kWh)}}$$

$$LCOE = 9630,44/91328 = 0,105 \text{ Eur./kWh}$$

Skaičiuojamas aukštos įtampos (288 V) elektros energijos kaupimo sistemos atsipirkimo laikas.

Elektros energijos pasauginimo kaina 0,05929 Eur./kWh.

Apytiksliai 80 % saulės elektrinės pagamintos energijos per metus reikalinga pasaugoti.

Tiriamam individualiam namui per metus reikalinga 3328 kWh energijos kiekis. Pasauginimo poreikis – 2662,4 kWh. Energijos skirstymo operatoriaus pasauginimo mokestis– 0,05929 Eur/kWh.

Pasauginimo kaina per metus:

$$2662,4 \times 0,05929 = 157,85 \text{ Eur.}$$

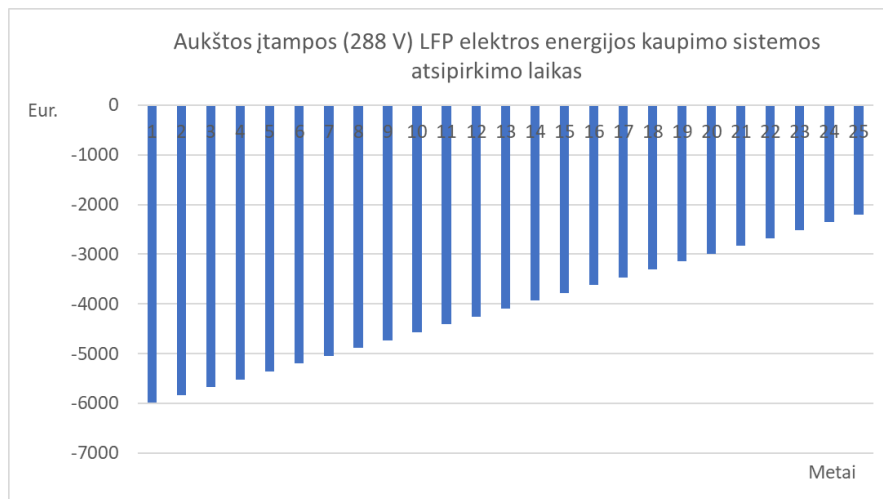
Investicijos kaina :

Aukštos įtampos (288 V) energijos kaupimo sistemos investicija – 5990 Eur.

Atsipirkimo laikas:

$$5990/157,85 = 38 \text{ metai.}$$

Elektros energijos kaupimo sistemos LFP aukštos įtampos (288 V) sistemos atsipirkimo laikas pavaizduotas (42 pav.).

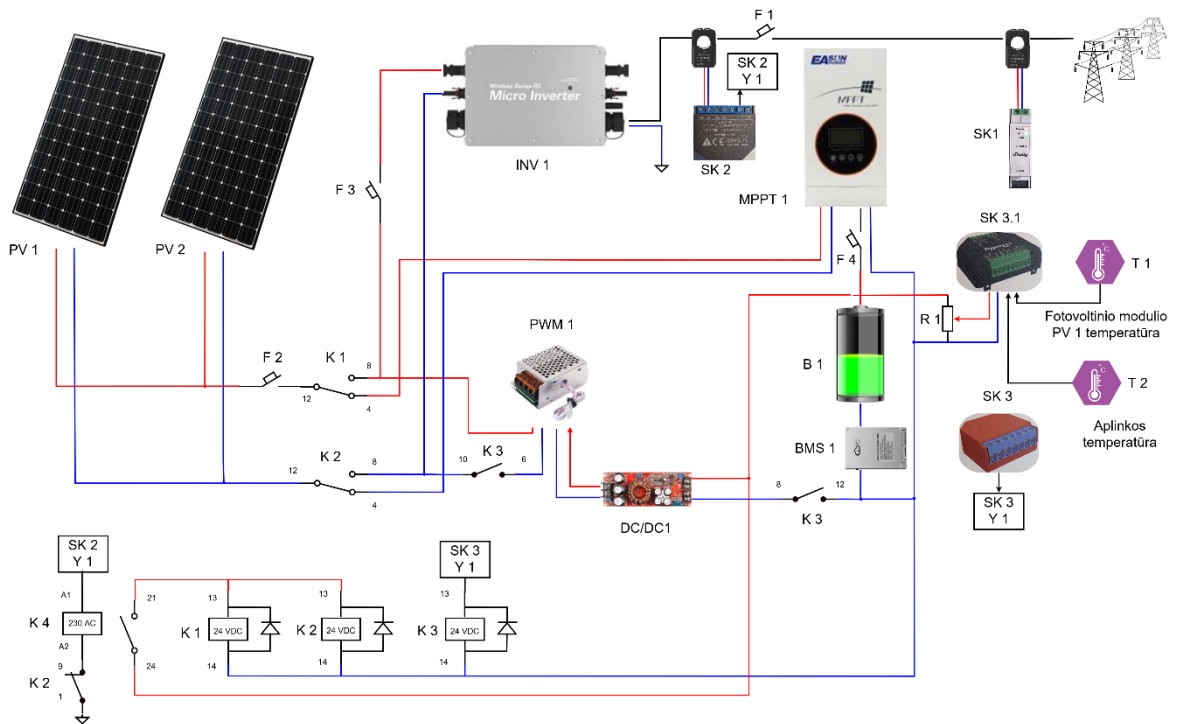


42 pav. Aukštos įtampos (288 V) LFP elektros energijos kaupimo sistemos atsipirkimo laikas

2.6 Eksperimentas

Eksperimentas buvo atliekamas norint ištirti individualaus gyvenamojo namo elektros valandines energijos sąnaudas, pritaikyti gautus duomenis parenkant saulės elektrinės ir energijos kaupimo sistemos komponentų parametrus. Fotovoltinės saulės elektrinės ir energijos kaupimo sistemos principinė valdymo schema pavaizduota (43 pav.).

Fotovoltinės saulės elektrinės ir energijos kaupimo sistemos principinė valdymo schema



Darbo režimai				
Sąlyga, rėlių būseną	Akumuliatoriaus įkrovimas	Elektros generavimas į tinklą	Elektros generavimas iš baterijos	Akumuliatoriaus įkrovimas dėl padidėjusios tinklo įtampos
Sąlyga	Akumuliatoriaus elemento įtampa < 4,1V = < 90% SOC	Akumuliatoriaus elemento įtampa: > 4,1 V => 90% SOC	Akumuliatoriaus elemento įtampa: > 3.6 V ir laikas 22:00-6:00	Tinklo įtampa > 250 V
SK ir K BUSENA	SK2 Y1 - 0 = K1=0, K2=0 SK3 Y1 - 0 =K3=0	SK2 Y1 - 1 = K1=1, K2 =1 SK3 Y1 - 0 =K3=0	SK3 Y1 - 1= K1=1, K2 =1	SK2 Y1 - 0 = K1=0, K2=0 SK3 Y1 - 0 =K3=0

43 pav. Fotovoltinės saulės elektrinės ir energijos kaupimo sistemos principinė valdymo schema

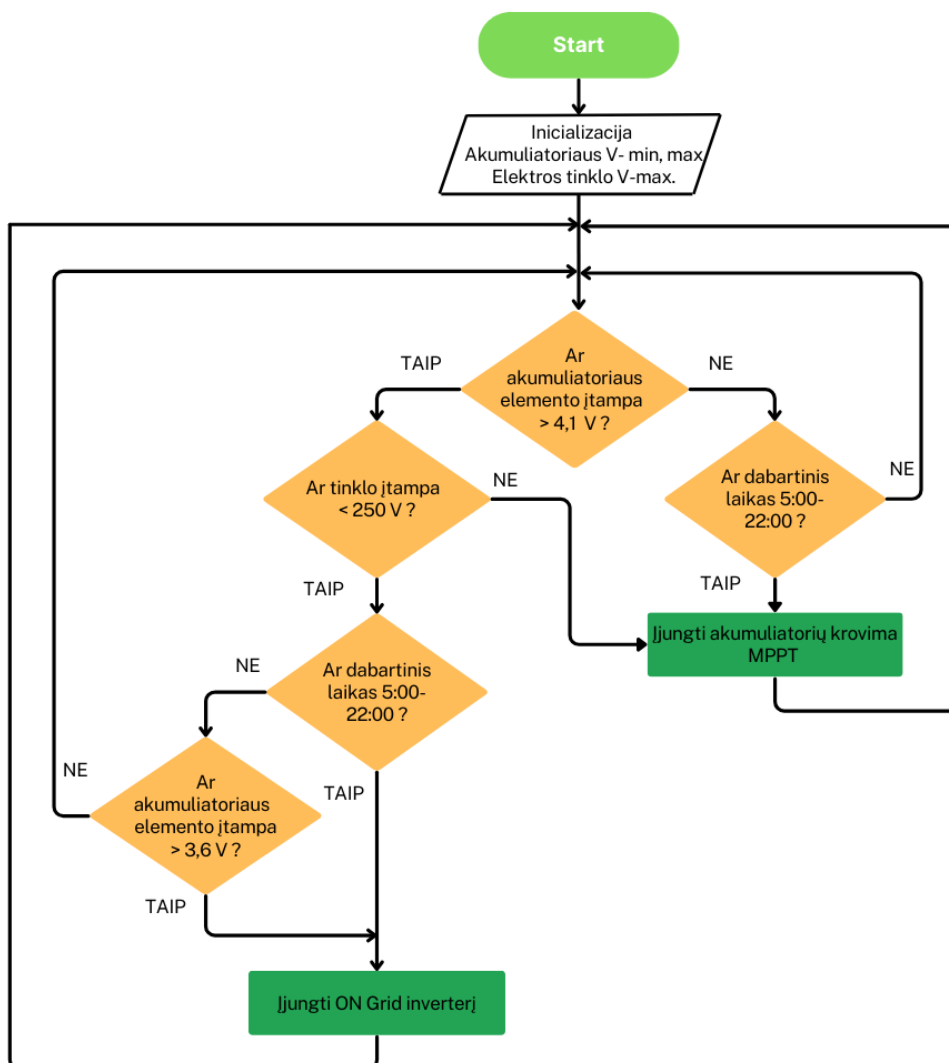
Akumuliatoriaus įkrovimo darbo režimas. MPPT valdiklis įjungiamas 5:00 valandą ryto. Įkraunamas akumuliatorius iki vienam elementui pasiekiami 4,1 V įtampa, MPPT valdiklis išjungiamas ir įjungiamas *On-grid* keitiklis.

On-grid darbo režimas. Naudojama perduoti elektros energiją į kintamosios įtampos elektros tinklą. Akumuliatoriaus elementui pasiekus 4,1 V įtampą įjungiamas *On-grid* keitiklis iki 22:00 valandos.

On-grid-akumuliatorius darbo režimas. Naudojama perduoti elektros energiją iš akumuliatoriaus į 0,4 kV tinklą. Šis darbo režimas įjungiamas jeigu akumuliatoriaus vieno elemento įtampa yra didesnė už 3,6 V ir laikas daugiau nei 22:00 valanda.

Elektros tinklo įtampai padidėjus daugiau kaip 250 V yra įjungiamas akumuliatoriaus įkrovimo režimas ir įkraunama akumuliatorius iki tinklo įtampa tampa mažesnė už 250 V.

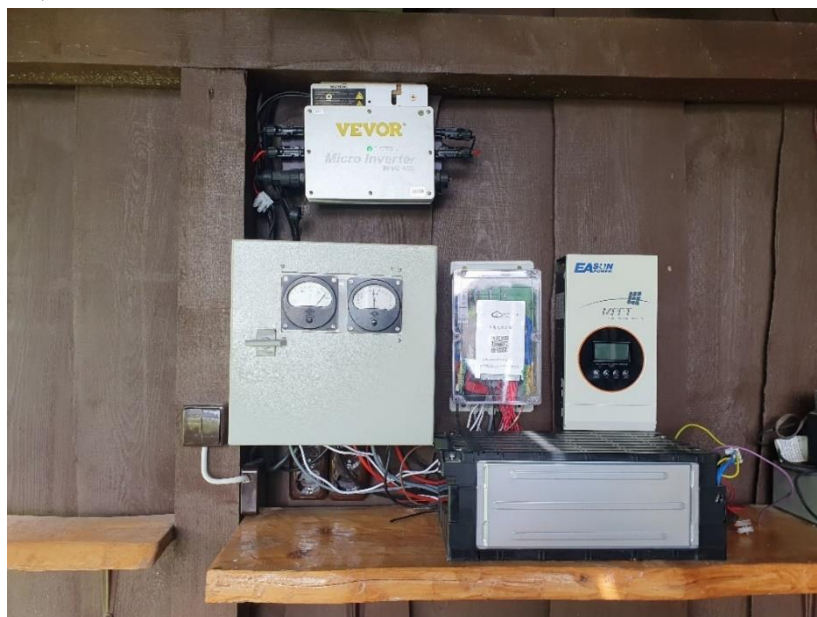
Fotovoltinės saulės elektrinės ir energijos kaupimos sistemos valdymo algoritmas pavaizduotas (44 pav.).



44 pav. Fotovoltinės saulės elektrinės ir energijos kaupiklio valdymo algoritmas

2.6.1 Eksperimento metu naudoti komponentai.

Saulės elektrinė 0,7 kWp instaliuotos galios ir 2,16 kWh talpos energijos kaupimo sistema pavaizduota (45 pav.).



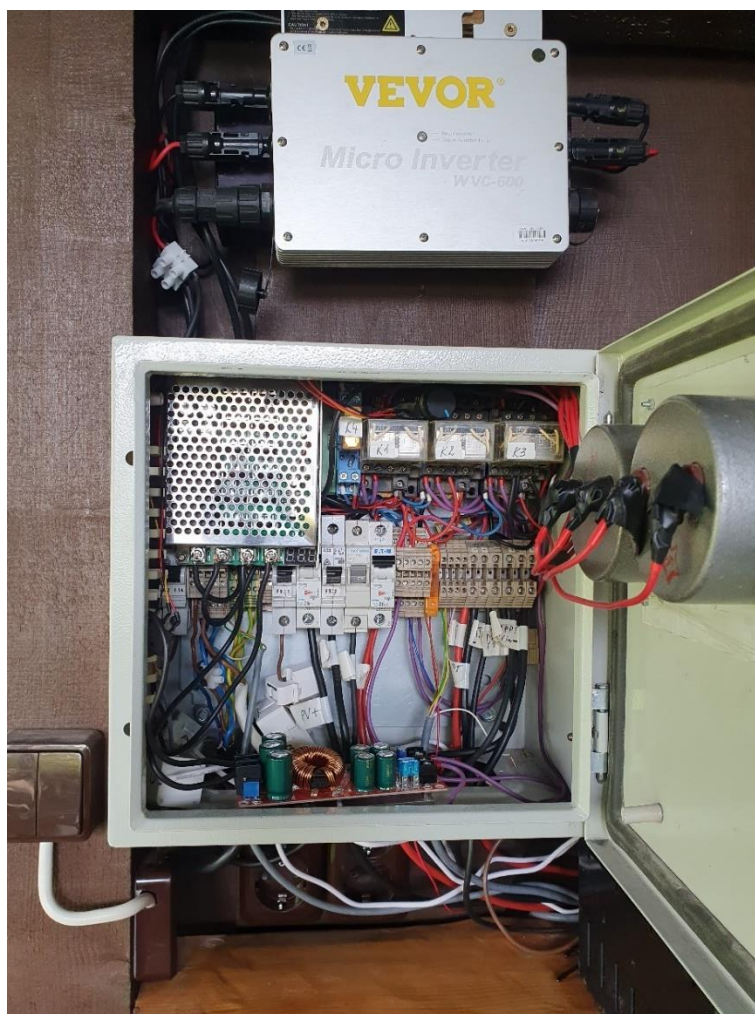
45pav. On-grid darbo režimas

Fotovoltainiai moduliai Canadian Solar CS3L, 2 vnt. pavaizduoti (47 pav.).



46pav. Fotovoltainiai moduliai

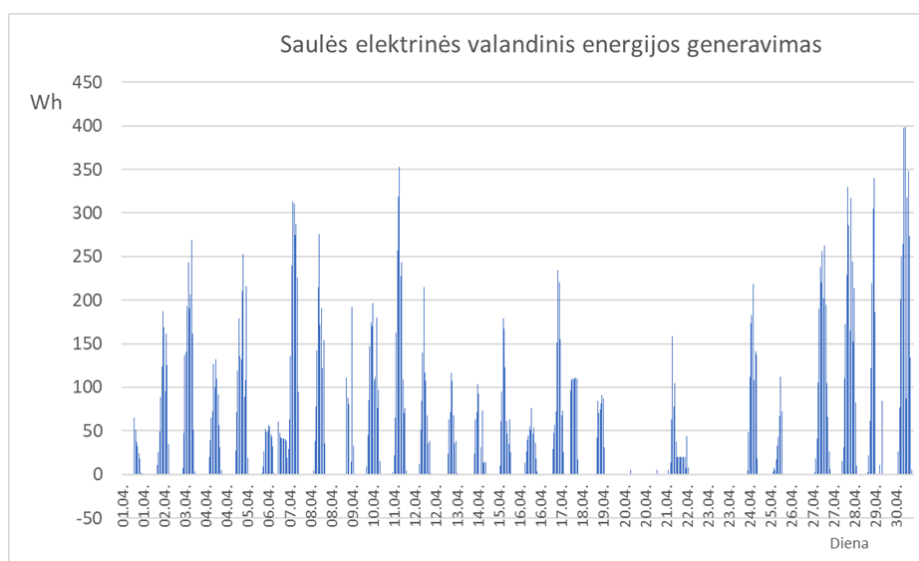
Eksperimentinės elektrinės ir energijos kaupimo sistemos valdymo skydas pavaizduotas (48 pav.).



47 pav. Valdymo skydas

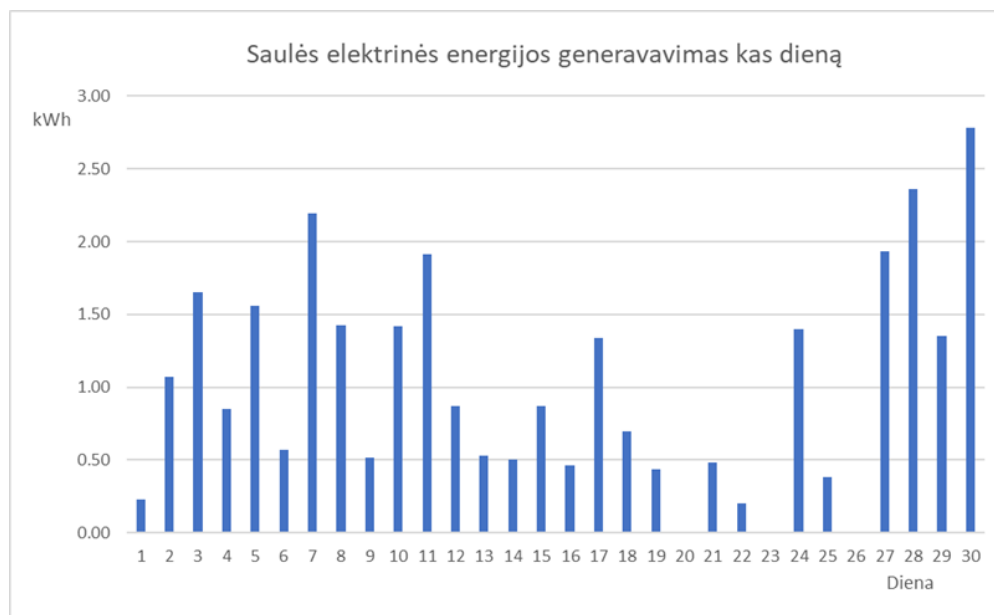
2.6.2 Eksperimento metu gauti rezultatai

Saulės elektrinės valandinis energijos generavimas 2023.04.01-2023.04.30 pavaizduotas (49 pav.).



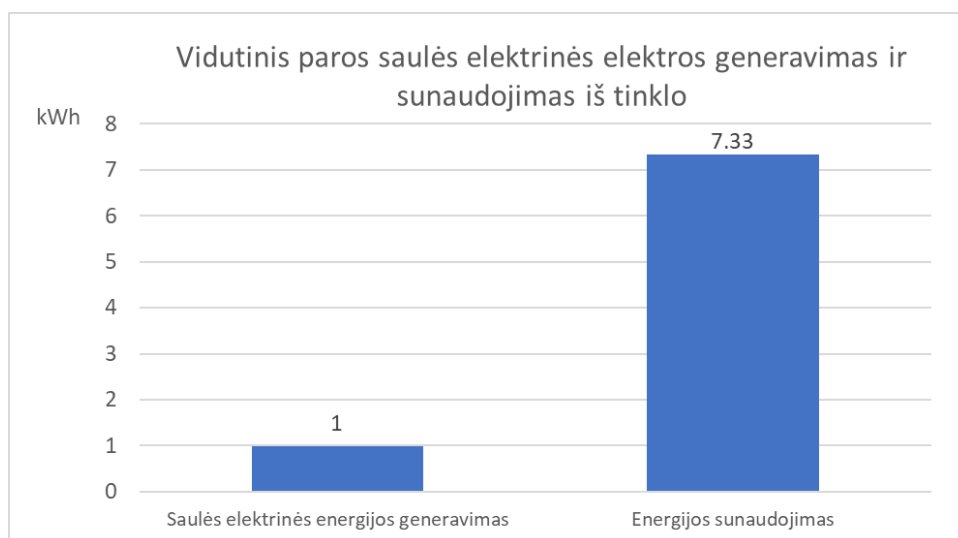
48 pav. Saulės elektrinės valandinis energijos generavimas

Saulės elektrinės energijos generavimas kas dieną pavaizduotas (50 pav.).



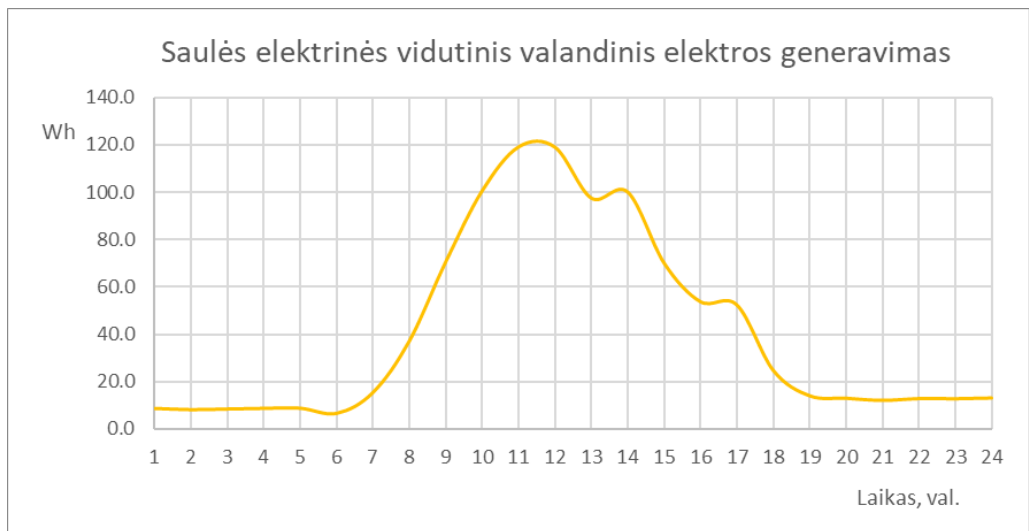
49 pav. Saulės elektrinės energijos generavimas kas dieną

Vidutinis paros saulės elektrinės elektros generavimas ir sunaudojimas iš tinklo pavaizduotas (51 pav.).



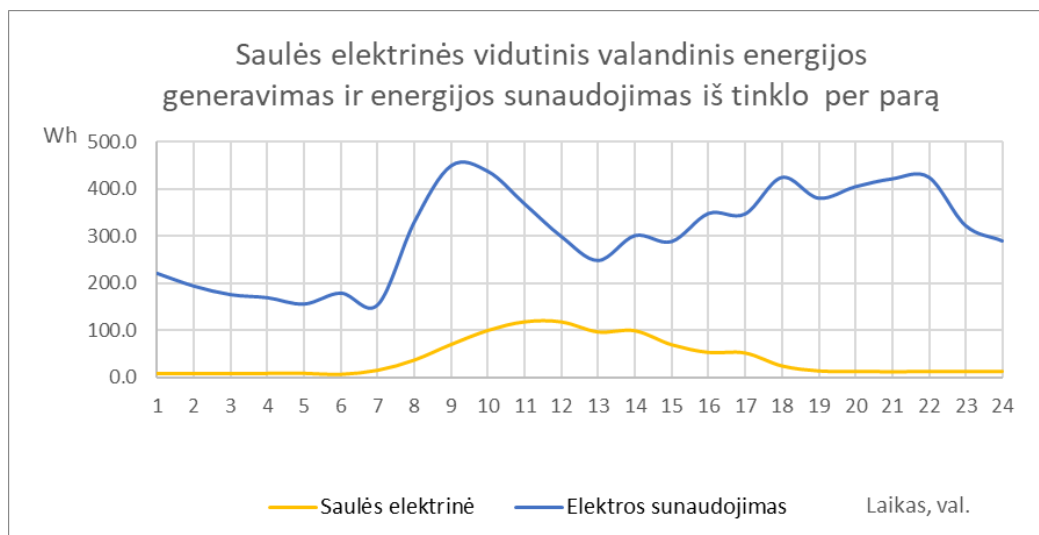
50 pav. Vidutinis paros saulės elektrinės elektros generavimas ir sunaudojimas iš tinklo

Saulės elektrinės 0,7 kWp vidutinis valandinis elektros generavimas balandžio mėnesį pavaizduotas (52 pav.).



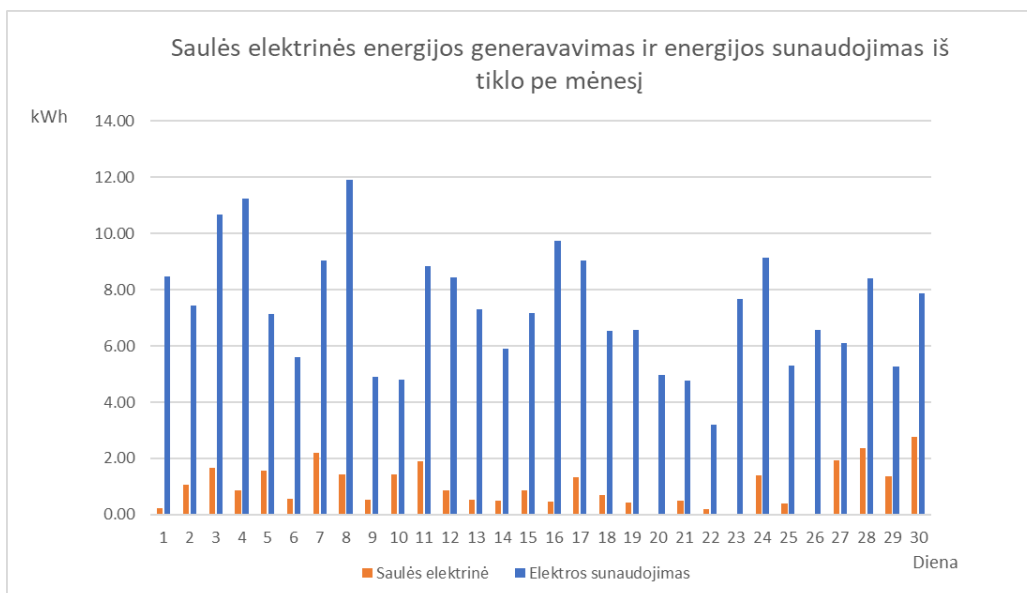
51 pav. Saulės elektrinės vidutinis valandinis elektros generavimas

Vidutinis valandinis balandžio mėnesio energijos generavimas ir energijos sunaudojimas pavaizduotas (53 pav.).



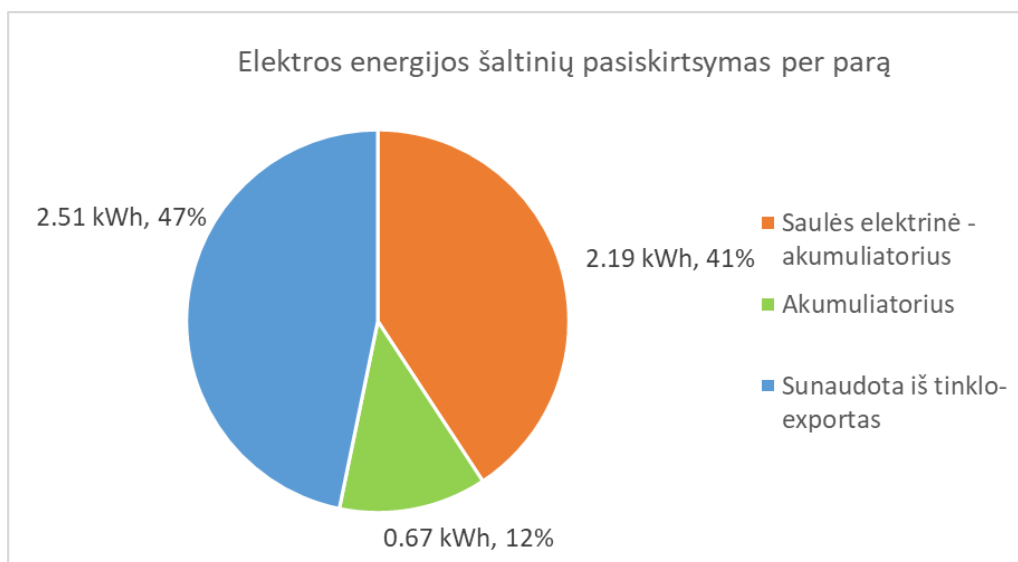
52 pav. Vidutinis valandinis energijos generavimas ir energijos sunaudojimas

Saulės elektrinės 0,7 kWp energijos generavimas ir individualaus namo energijos sunaudojimas iš tinklo per mėnesį pavaizduotas (54 pav.).



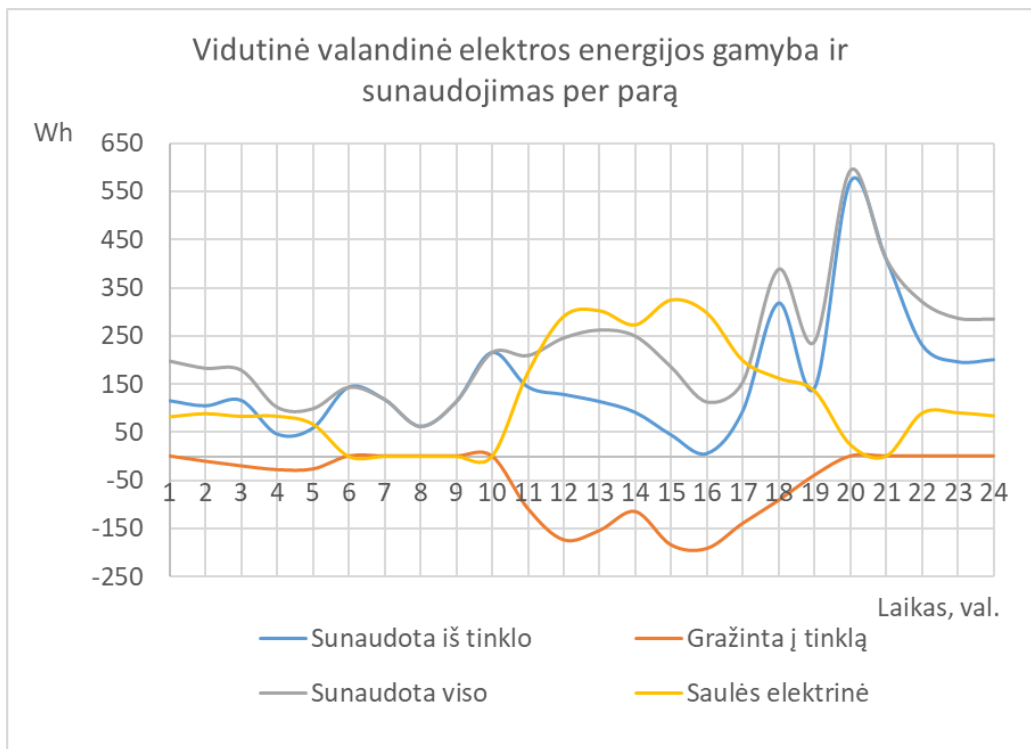
53 pav. Saulės elektrinės energijos generavimas ir energijos sunaudojimas iš tinklo per mėnesį

Elektros energijos vidutinis energijos šaltinių pasiskirstymas per parą pavaizduota (55 pav.). 4 parų elektros energijos duomenys surinkti gegužės mėnesį. Vidutinis sunaudojimas - 5,4 kWh, saulės elektrinės energijos gamyba – 2,86 kWh, 53 % individualiam namui reikalingos elektros energijos. Sunaudota elektros energija iš tinklo - 2,51 kWh – 47 % individualiam namui reikalingos elektros energijos.



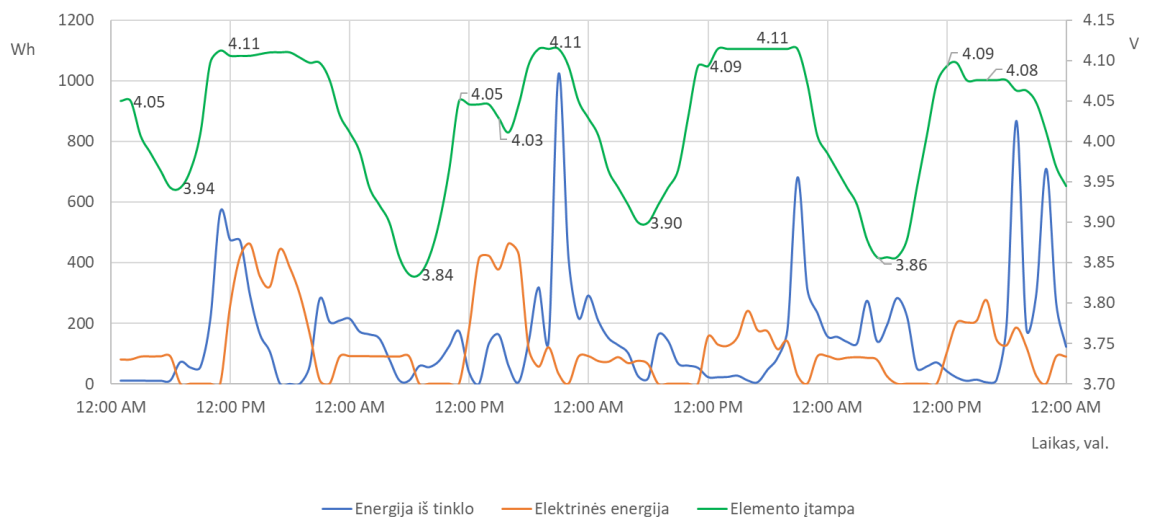
54 pav. Elektros energijos šaltinių pasiskirstymas per parą

Vidutinė valandinė elektros energijos gamyba ir sunaudojimas per parą pavaizduotas (56 pav.).



55 pav. Vidutinė valandinė elektros energijos gamyba ir sunaudojimas per parą

Akumuliatoriaus vieno elemento įtampos kitimas esant skirtingai apkrovai pavaizduotas (57 pav.). Akumuliatorių apkrovus vidutine 90 W galia, per 8 valandas į vidinį tinklą atiduota 704 Wh energijos. Akumuliatoriaus elemento įtampos lygis sumažėjo nuo 4,11 V iki 3,84 V, tai sudaro apie 30 % (648 Wh) akumuliatoriaus energijos. 56 Wh skirtumo paklaida galėjo atsirasti dėl įtampos matavimo daliklio ir tikrosios akumuliatoriaus elemento vertės.



56 pav. Baterijos įtampos kitimas esant skirtingai apkrovai

Išvados

1. Elektros skaitiklių pagalba buvo surinkti individualaus gyvenamojo namo valandiniai elektros energijos duomenys. Paros valandinis vidutinis didžiausias energijos poreikis - 0,45 kWh. Paros vidutinės sąnaudos 7,3 kWh. Nuo 12:00 iki 18:00 val. - 3,9 kWh, nuo 18:00 iki 00:00 val.- 2,4 kWh ir nuo 24:00 iki 6:00 - 1,2 kWh. Pagal gautus rezultatus buvo apskaičiuota optimali saulės elektrinės instaliuota galia – 3,9 kWp ir akumuliatoriaus talpa 24 val. Autonomijai – 9,12 kWh.
2. Parašyta programa palengvinanti saulės elektrinės ir elektros energijos kaupimo sistemos parametrų skaičiavimams atlikti.
3. Saulės elektrinės 3,9 kWp instaliuotos galios su elektros energijos kaupimo sistema 9.6 kWh talpos LFP žemos įtampos (48 V) atsipirkimo laikas yra po 7,2 metai. Elektros energijos savikaina – 0,081 Eur./kWh. Vertinat tik elektros energijos kaupimo sistemą, atsipirkimo laikas po 22,8 metų.
4. Saulės elektrinės 3,9 kWp instaliuotos galios su elektros energijos kaupimo sistema 10,66 kWh talpos LFP aukštos įtampos (288 V) atsipirkimo laikas yra po 9,5 metų. Elektros energijos savikaina– 0,105 Eur./kWh. Vertinat tik elektros energijos kaupimo sistemą, atsipirkimas po 35 metų.
5. Atlikus eksperimentą buvo išsiaiškinta, kad 2160 Wh akumuliatoriaus energijos užtektų namo poreikiams naudoti (1740 Wh) nuo 22:00 iki 5:00. Akumuliatorių apkrovus vidutine 90 W galia, per 8 valandas į vidinį tinklą atiduota 704 Wh energijos . Akumuliatoriaus elemento įtampos lygis sumažėjo nuo 4,11 V iki 3,84 V, tai sudaro apie 30 % (648 Wh) akumuliatoriaus energijos. 56 Wh skirtumo paklaida galėjo atsirasti dėl įtampos matavimo daliklio ir tikrosios akumuliatoriaus elemento vertės.

Literatūros sąrašas

1. CUBAS, Javier, Santiago PINDADO ir Carlos DE MANUEL. Explicit Expressions for Solar Panel Equivalent Circuit Parameters Based on Analytical Formulation and the Lambert W-Function. *Interaktyvus*, 2014. Prieiga per: doi:10.3390/en7074098 [žiūrėta 2023 m. balandžio 20 d.].
2. Al-Ezzi, ATHIL S. ir Mohamed NAINAR M. ANSARI . Photovoltaic Solar Cells: A Review. *Interaktyvus*, 2022. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.3390/asi5040067> [žiūrėta 2023 m. kovo 10 d.].
3. RANA RASHEL, Masud. MODELING PHOTOVOLTAIC PANELS UNDER VARIABLE INTERNAL AND ENVIRONMENTAL CONDITIONS WITH NON-CONSTANT LOAD. *Interaktyvus*, 2018. Prieiga per internetą: <https://core.ac.uk/download/pdf/161640393.pdf> [žiūrėta 2023 m. kovo 12 d.].
4. EL OUIQARY, Ahmed., El Mkaddem KHEDDIOUI ir Mohamed FAOUZI. SMIEJ. Estimation of the global horizontal solar irradiation GHI for the Moroccan national territory from meteorological satellite images of the Second Generation Meteosat series MSG. *Interaktyvus*, 2021, ISSN 2515-8260. Prieiga per internetą: https://ejmcm.com/article_11528.html [žiūrėta 2023 gegužės 2 d.].
5. CHALKIAS, Christos, Antigoni FAKA ir Kleomenis KALOGEROPOULOS. Assessment of the Direct Sun-Light on Rural Road Network through Solar Radiation Analysis Using GIS. *Interaktyvus*, 2013. Prieiga per: doi:10.4236/ojapps.2013.32030 [žiūrėta 2023 m. gegužės 2 d.].
6. KHALIFA BOUTAHIR, Mohamed, Yousef FARHAOUI, Mourade AZROUR, Imad ZEROUAL ir Ahmad EL ALLAOUI. Effect of Feature Selection on the Prediction of Direct Normal Irradiance. *Interaktyvus*, 2022, ISSN: 2096-0654. Prieiga per: DOI:10.26599/BDMA.2022.9020003 [žiūrėta 2023 m. gegužės 3 d.].
7. MEGANTORO, Prisma, Muhammad AKBAR SYAHBANI ir Irfan HELMI SUKMAWAN. Effect of peak sun hour on energy productivity of solar photovoltaic power system. *Interaktyvus*, 2022, ISSN:2302-9285. Prieiga per: DOI:10.11591/eei.v11i5.3962 [žiūrėta 2023 gegužės 3 d.].
8. Solar resource maps of Lithuania. *Interaktyvus*, 2019. Prieiga per internetą : <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/lithuania> [žiūrėta 2023 balandžio 10 d.]
9. Global solar atlas. *Interaktyvus*. Prieiga per internetą: <https://globalsolaratlas.info> [žiūrėta 2023 balandžio 11 d.].
10. NAYAN, Md Faysal, S.M.Safayet ULLAH ir S. N. SAIF. Comparative Analysis of PV Module Efficiency for Different Types of Silicon Materials Considering the Effects of Environmental Parameters. *Interaktyvus*, 2016. Prieiga per: DOI:10.1109/CEEICT.2016.7873089 [žiūrėta 2023 m. gegužės 2 d.].
11. KHALIFA ABOJELA, Zuher R., Mohd Khairunaz Mat DESA ir Ahmad H. SABRY. Current prospects of building-integrated solar PV systems and the application of bifacial PVs. *Interaktyvus*, 2023. Prieiga per: DOI 10.3389/fenrg.2023.1164494 [žiūrėta 2023 m. gegužės 3 d.].
12. TEKLEMICHAEL BAHTA, Solomon. Design and Analyzing of an Off-Grid Hybrid Renewable Energy System to Supply Electricity for Rural Areas. *Interaktyvus*, 2013. Prieiga per internetą: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:653049/FULLTEXT01.pdf> [žiūrėta 2023 vasario 20 d.].

13. DE B. MESQUITA, Daniel, João Lucas de S. SILVA, Hugo S. MOREIRA ir Michelle KITAYAMA. A review and analysis of technologies applied in PV modules. *Interaktyvus*, 2019. Prieiga per: DOI: 10.1109/ISGT LA.2019.8895369 [žiūrėta 2023 gegužės 2 d.].
14. MOLDOVAN, Macedon, Bogdan Gabriel BURDUHOS ir Ion VISA. Efficiency Assessment of Five Types of Photovoltaic Modules Installed on a Fixed and on a Dual-Axis Solar-Tracked Platform. *Interaktyvus*, 2023. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.3390/en16031229> [žiūrėta 2023 m. balandžio 11 d.].
15. JACOBSON, Mark Z. X ir Vijaysinh JADHAV. World Estimates of PV Optimal Tilt Angles and Ratios of Sunlight Incident Upon Tilted and Tracked PV Panels Relative to Horizontal Panels. *Interaktyvus*, 2017. Prieiga per internetą: <https://web.stanford.edu/group/efmh/jacobson/Articles/I/TiltAngles.pdf> [žiūrėta 2023 m. balandžio 20 d.].
16. ALHMOUD, Lina. Why Does the PV Solar Power Plant Operate Ineffectively?. *Interaktyvus*, 2023. Prieiga per: doi.org/10.3390/en16104074 [žiūrėta 2023 gegužės 15 d.].
17. N.ABED, Alaa, Kasim NASEER K. ir Hazim H. HUSSAIN. YEARLY IMPROVEMENT OF GRID-CONNECTED SOLAR PV SYSTEM PARAMETERS BY PLANAR CONCENTRATORS. *Interaktyvus*, 2023. Prieiga per: DOI:10.53540/tjer.vol19iss2pp140-151 [žiūrėta 2023 m. gegužės 6 d.].
18. DR. MOANES E., Ali Mohammed ir Sameer K. SALIH. A Visual Basic-Based Tool for Design of Stand-alone Solar Power Systems. *Inetraktyvus*, 2013. Prieiga per: DOI:10.1016/j.egypro.2013.07.142 [žiūrėta 2023 m. kovo 10 d.].
19. BATAINEH, Khaled ir Doraid DALALAH. Optimal Configuration for Design of Stand-Alone PV System. *Interaktyvus*, 2012. Prieiga per: DOI:10.4236/sgre.2012.32020 [žiūrėta 2023 m. balandžio 27 d.].
20. HARI, M. Deepak, S. MURALIDHARAN. SIMULATION OF PERTURB & OBSERVE MPPT TECHNIQUE USING SEPIC CONVERTER. *Interaktyvus*, 2017, ISSN: 2455-5797. Prieiga per internetą: [https://ijiwet.com/article/ijiwet-vol\(3\)-no\(2\)4.pdf](https://ijiwet.com/article/ijiwet-vol(3)-no(2)4.pdf) [žiūrėta 2023 balandžio 21 d.].
21. DEMOULIAS, Charis. A new simple analytical method for calculating the optimum inverter size in grid-connected PV plants. *Interaktyvus*, 2010. Prieiga per: DOI:10.1016/j.epr.2010.04.005 [žiūrėta 2023 balandžio 22 d.].
22. SANDELIC, Monika, Ariya SANGWONGWANICH ir Frede BLAABJERG. Reliability Evaluation of PV Systems with Integrated Battery Energy Storage Systems: DC-Coupled and AC-Coupled Configurations. *Interaktyvus*, 2019. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.3390/electronics8091059> [žiūrėta 2023 balandžio 24 d.].
23. UMAIR ALI, Muhammad, Amad ZAFAR, Sarvar HUSSAIN NENGROO, Sadam HUSSAIN, Muhammad JUNAID ALVI ir Hee-JE KIM. Towards a Smarter Battery Management System for Electric Vehicle Applications: A Critical Review of Lithium-Ion Battery State of Charge Estimation. *Interaktyvus*, 2019. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.3390/en12030446> [žiūrėta 2023 balandžio 23 d.].
24. CHAWLA Neha, Neelam BHARTI ir Sheilendra SINGH. Recent Advances in Non-Flammable Electrolytes for Safer Lithium-Ion Batteries. *Interaktyvus*, 2019. Prieiga per: DOI:10.3390/batteries5010019 [žiūrėta 2023 m. balandžio 24 d.].
25. RAO RIKKA, Vallabha, Sumit RANJAN SAHU, Mrinalini GURUMURTHY ir Abhijit CHATTERJEE. Temperature-Derived Fe Dissolution of a LiFePO₄/Graphite Cell at Fast

- Charging and High State-of-Charge Condition. Interaktyvus, 2023. Prieiga per: DOI:10.1002/ente.202201388 [žiūrėta 2023 m. balandžio 25 d.].
26. RUBENBAUER, Hubert ir Stefan HENNINGER. Definitions and reference values for battery systems in electrical power grids. Interaktyvus, n.d.. Prieiga per internetą: https://www.ees.tf.fau.de/files/2017/10/20170509Battery_Henninger.pdf [žiūrėta 2023 m. balandžio 25 d.].
 27. E. KOSMADAKIS, Ioannis ir Costas ELMASIDES. A Sizing Method for PV–Battery–Generator Systems for Off-Grid Applications Based on the LCOE. Interaktyvus, 2023. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.3390/en14071988> [žiūrėta 2023 m. gegužės 12 d.].
 28. STENZEL, Peter, Manuel BAUMANN, Johannes FLEER, Benedikt ZIMMERMANN ir Marcel WEIL. Database development and evaluation for techno-economic assessments of electrochemical energy storage systems. Interaktyvus, 2014. Prieiga per: DOI:10.1109/ENERGYCON.2014.6850596 [žiūrėta 2023 m. kovo 25 d.].
 29. ZHANG, Chi, Fuwu YAN, Changqing DU, Jianqiang KANG ir Richard Fiifi TURKSON. Evaluating the Degradation Mechanism and State of Health of LiFePO₄ Lithium-Ion Batteries in Real-World Plug-in Hybrid Electric Vehicles Application for Different Ageing Paths. Interaktyvus, 2017. Prieiga per: DOI: 10.3390/en10010110 [žiūrėta 2023 balandžio 26 d.].
 30. Li, WENYUN, Siqi RUAN, Ardah BAHITBEK, Zihuan GAO, Nuramina TURAK ir Heng LI. Exploring the Hysteresis Effect in SOC Estimation of Li-ion Batteries. Interaktyvus, 2023. Prieiga per: doi:10.1088/1742-6596/2456/1/012023 [žiūrėta 2023 balandžio 27 d.]
 31. Lithium battery charging. Interaktyvus, n.d.. Prieiga per internetą: <https://www.itechate.com/uploadfiles/2019/01/20190128145701571.pdf> [žiūrėta 2023 balandžio 28 d.].
 32. Kurpiel, WOJCIECH, Bartosz POLNIK, Piotr HYLLA, Bogdan MIEDZINSKI, Marcin HABRYCH ir Grzegorz DEBITA. Lithium-Iron-Phosphate Battery Performance Controlled by an Active BMS Based on the Battery-to-Cell Method. Interaktyvus, 2022, ISSN 1392-1215. Prieiga per internetą: <http://dx.doi.org/10.5755/j02.eie.31420> [žiūrėta 2023 m. balandžio 30 d.].
 33. SOTO, Adrian, Alberto BERRUETA, Miren MATEOS, Pablo SANCHIS ir Alfredo URSÚA. Impact of micro-cycles on the lifetime of lithium-ion batteries: An experimental study. Interaktyvus, 2022. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105343> [žiūrėta 2023 m. balandžio 28 d.].
 34. SING LAI, Chun ir Malcolm D. MCCULLOCH. Levelized Cost of Electricity for Solar Photovoltaic and Electrical Energy Storage. Interaktyvus, 2017. Prieiga per: DOI:10.1016/j.apenergy.2016.12.153 [žiūrėta 2023 m. gegužės 12 d.].
 35. OKO, C.O.C., E.O. DIEMUODEKE, N.F. OMUNAKWE ir E. NNAMDI. Design and Economic Analysis of a Photovoltaic System: A Case Study. Interaktyvus, 2012. Prieiga per: DOI:10.14710/ijred.1.3.65-73 [žiūrėta 2023 m. balandžio 22 d.].
 36. AKPAHOU, Romain, Flavio ODOI-YORKE ir Louis KWASI OSE. Techno-economic analysis of a utility-scale grid-tied solar photovoltaic system in Benin republic. Interaktyvus, 2023. Prieiga per: DOI: 10.1016/j.clet.2023.100633 [žiūrėta 2023 m. gegužės 2 d.].
 37. Huang, DIKAI ir Tai YU. Study on Energy Payback Time of Building Integrated Photovoltaic System. Interaktyvus, 2022. Prieiga per: DOI:10.1016/j.proeng.2017.10.174 [žiūrėta 2023 m. gegužės 12 d.].
 38. BÖTTIGER, Michael, Martin PAULITSCHKE ir Bocklisch THILO. Innovative Reactive Energy Management for a Photovoltaic BatterySystem. Interaktyvus, 2016.

- Priega per: DOI: 10.1016/j.egypro.2016.10.124 [žiūrēta 2022 balandžio 10 d.].
39. KOKO, Sandile Phillip. Optimal battery sizing for a grid-tied solar photovoltaic system supplying a residential load: A case study under South African solar irradiance. Interaktyvus, 2021. Priega per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.02.183> [žiūrēta 2023 m. gegužės 12 d.].
40. CUI, Weiwei ir Yujie YANG. Optimization of TOU Pricing for the Utility with the Consumers in the Manufacturing Sector. Interaktyvus, 2020. Priega per: DOI:10.1016/j.promfg.2020.01.344 [žiūrēta 2023 m. gegužės 12 d.].

3 Priedai

3.1 Saulės elektrinės ir elektros energijos kaupimo sistemos skaičiavimo programos kodas

```
from tabulate import tabulate

data = [

    ["Parametras", "Energija, kWh"],

    ["Viso sunaudota energija per balandžio mėnesį", total_consumption_kWh],

    ["Viso sugeneruota energija per mėnesį", total_generation_kWh],

    ["Vidutinis sunaudojimas per dieną", daily_mean_load],

    ["Vidutinis saulės generavimas per dieną", daily_mean_generation],

    ["Dienos 12-18 val sunaudojimas", day12_consumption_kWh_mean],

    ["Vakaro 18-00 sunaudojimas", evening_consumption_kWh_mean],

    ["Per naktį 00-06 sunaudojimas", night_consumption_kWh_mean],

    ["Sunaudota per metus", total_year_load],

    ["Sunaudota vidutiniškai per mėnesį", average_year_load],

]

table = tabulate(data, tablefmt='fancy_grid')

print(table)
```

```
#Fotovoltinio modulio parametrai RSM40-8-390MB Titan S

Impp=11.52      # Fotovoltinio darbine srove
Vmpp=33.88      # Fotovoltinio darbinė įtampa
PVmax_STC=0.39 # Fotovoltinio galia , kW 1000 w/m2 25 C
PVmax_NTC=0.2956 # Fotovoltinio galia , kW Irradiance 800W/m2, 20C
Voc=40.69      # Fotovoltinio atviros grandines įtampa
PV_eff=0.203

t_pmax= -0.34   # (Pmax) % /°C temperatūros koeficientas
t_voc = -0.25   # (Voc) % /°C temperatūros koeficientas
t_isc = 0.04    # (Isc) % /°C temperatūros koeficientas
t_nom = 44      # ± 3°C darbinė modulio temperatūra
PV_plotas=1.92 # modulio plotas
```

```
Em=3328 # Metinis poreikis kWh
Saulės_energija=1039 #kWh/m2
INV_eff=0.97
PV_bendras_plotas=round(Em/(Saulės_energija*PV_eff*INV_eff), 2)
PV_kWp_sk = round((PV_bendras_plotas*PV_eff),2) # Reikalinga instaliuota PV galia, kW
PV_kWp=round((PV_kWp_sk*1.1375),2) # dėl fotovoltinių modulių degradacijos 6 proc.
PV_kiekis_sk = round((PV_kWp / PVmax_STC),2) # PV modulių kiekis
PV_kiekis = round(PV_kWp / PVmax_STC) # PV modulių kiekis
PV_inst=round((PV_kiekis*PVmax_STC),2)
```



```

print("Reikalinga instaliuota PV galia", PV_kWp)
print("Reikalingas modulių kiekis", PV_kiekis)

data = [
    ["Parametras", "Parametras"],
    ["Susikauptas PV plotas ", PV_bendras_plotas, 'm2'],
    ["Susikaupta instaliuota PV galia", PV_kWp_sk, 'kW'],
    ["Įvertinus PV degradaciją reikalinga PV galia ", PV_kWp, 'kW'],
    ["PV instaliuota galia ", PV_inst, 'kW'],
    ["Susikauptas modulių kiekis ", PV_kiekis_sk, 'vnt'],
    ["Susikauptas modulių kiekis ", PV_kiekis, 'vnt'],
]

table = tabulate(data, tablefmt='fancy_grid')
print(table)
PV_bendras_plotas

```

```

#Akumuliatoriaus parametrų skaičiavimas
t_ups=24 #autonomijos laikas valandomis
DOD=10 # Baterijos minimalus iškrovimo lygis proc.
SOC=90 #Baterijos didžiausias įkrovimo lygis proc.
S=16 #celių skaičius
batt_select = 2 # 1-Li-ion; 2-LifePO4
if batt_select == 1: # 1-Li-ion; 2-LifePO4
    Batt_type = 'Li-ion'
    Charged = 4.2 # V
    Nominal = 3.6 # V
    Discharged = 3 # V
elif batt_select == 2:
    Batt_type = 'LiFePo4'
    Charged = 3.65 # V
    Nominal = 3.2 # V
    Discharged = 2.5 # V
else:
    print("neteisingai parinktas tipas")

Vbat_nom=round(Nominal*S, 2)
Cbat=round(((daily_mean_load*(t_ups/24))/(SOC-DOD))*100,2)
BattAh=round(1000*Cbat/Vbat_nom, 2)

data = [
    ["Parametras", "Parametras"],
    ["Pasirinktas akumuliatoriaus tipas", Batt_type],
    ["Pasirinkta elementų skaičius", S, 'vnt'],
    ["Autonomijos laikas", t_ups, 'val'],

```

```

["Akumuliatoriaus talpa, kWh", Cbat, 'kWh'],
["Akumuliatoriaus talpa, Ah", BattAh, 'Ah'],
["Akumuliatoriaus nominali įtampa", Vbat_nom , 'V'],
["Pilnai įkrauto elemento įtampa", Charged, 'V'],
["Nominali elemento įtampa ", Nominal, 'V'],
["Iškrauto elemento įtampa ", Discharged, 'V'],
]
table = tabulate(data, tablefmt='fancy_grid')
print(table)

```

```

#DC kabelių nuostolių skaičiavimai
PV_vnt = 10 # Fotomodulių skaičius
Psum=PVmax_STC*PV_vnt # elektrinės galia
P_elektrine=Psum #elektrines galia
Sq=4 #kabelio skerspjūvis
L=40 # kabelio ilgis
Rkabelio=0.017 #varinio kabelio varža
RL=Rkabelio*L/Sq
Udelta=round((Imp*RL),2)
print("DC kabelio varža", RL, "omai")
print("Įtampos kritimas", Udelta, "V")

```

```

PV_voltage=PV_vnt*Vmpp

Udelta_proc=round((Udelta/PV_voltage)*100,3)
print("PV DC įtampa", PV_voltage, "V")
print("Įtampos kritimas", Udelta_proc, "proc.")

```

```

#Galios nuostoliai kabeliuose
Pdcloss=round((Imp*Imp)*RL, 2)
print("Galios nuostoliai DC kabeliuose", Pdcloss, "W")
data = [
    ["Parametras", "vertė", "matavimo vienetai"],
    ["DC kabelio varža", RL, "omai"],
    ["Įtampos kritimas", Udelta, "V"],
    ["PV DC įtampa", PV_voltage, "V"],
    ["Įtampos kritimas proc.",Udelta_proc, "proc."],
    ["Galios nuostoliai DC kabeliuose", Pdcloss, "W"],
]
table = tabulate(data, tablefmt='fancy_grid')

```

```

print(table)

# AC kabelių nuostolių skaičiavimai
Unom = 400 # Nominal tinklo įtampa kV
cosf = 0.97 # galios faktorius
sqrt2 = math.sqrt(2) # kvadratinė šaknis
Imaxac =Psum / (sqrt2 * Unom * cosf/1000) # Maximum AC current
Imaxac=round(Imaxac, 2)
Psum=round((Psum),2)
print("Elektrinės galia:", Psum, "kW")
print("Didžiausia AC srovė:", Imaxac, "A")

```

```

Sq=2.5 #kabelio skerspjūvis
L=2 # kabelio ilgis
Rkabelio=0.017 #varinio kabelio varža
RLac=Rkabelio*L/Sq
UdeltaAC=round((math.sqrt(3)*Imaxac*RLac),2)
UdeltaAC_proc=round(((UdeltaAC/Unom)*100),3)
P_ac_loss=round((3*Imaxac*Imaxac*RLac), 2)
print("AC kabelio varža", RLac, "omai")
print("AC kabelio įtampos kritimas ", UdeltaAC, "V")
print("AC kabelio įtampos kritimas ", UdeltaAC_proc, "proc")
print("Galios nuostoliai AC kabeliuse ", P_ac_loss, "W")
data = [
    ["Parametras", "vertė", "matavimo vienetai"],
    ["AC kabelio varža", RLac, "omai"],
    ["AC kabelio įtampos kritimas ",UdeltaAC, "V"],
    ["AC kabelio įtampos kritimas proc. ",UdeltaAC_proc, "proc"],
    ["Galios nuostoliai AC kabeliuse ", P_ac_loss, "W"],
]
table = tabulate(data, tablefmt='fancy_grid')
print(table)

```

```

Ploss=round(((Pdcloss+P_ac_loss)/1000),2)
PV_kWp = round(PV_kWp, 3)
PV nuost kW=round((PV kWp),2)
Psum_metinis=round(Psum*Saulės_energija)
Psum_dienos=Psum*2.8
data = [
    ["Saulės elektrinės ir energijos kaupiklio parametrai", "vertė", "matavimo vienetai"],
    ["Saulės elektrinės galia neįvertinus nuostolių",PV_kWp_sk , "kW"],

```

```

["Saulės elektrinės galia įvertinus nuostolius dėl PV degradacijos", PV_kWp , "kW"],
["Saulės elektrinės bendra fotovoltinių modulių galia ", Psum , 'kWp'],
["Suskaičiuotas modulių kiekis ", PV_kiekis_sk, 'vnt'],
["Fotovoltinių modulių kiekis ", PV_vnt, 'vnt'],
["Galios nuostoliai DC kabeliuose", Pdcloss, "W"],
["Galios nuostoliai AC kabeliuose ", P_ac_loss, "W"],
["Galios nuostoliai dėl kabelių", Ploss, "kW"],
["Pasirinktas akumuliatoriaus tipas", Batt_type],
["Pasirinkta elementų skaičius", S, 'vnt'],
["Autonomijos laikas", t_ups, 'val'],
["Akumuliatoriaus talpa, kWh", Cbat, 'kWh'],
["Akumuliatoriaus talpa, Ah", BattAh, 'Ah'],
["Nominali akumuliatoriaus įtampa", Vbat_nom , 'V'],
["Viso sunaudota energija per balandžio mėnesį", total_consumption_kWh, 'kWh'],
["Vidutinis sunaudojimas per dieną", daily_mean_load, 'kWh'],
["Vidutinis saulės generavimas per dieną", Psum_dienos, 'kWh'],
["Sunaudota per metus", total_year_load, 'kWh'],
["Pagaminta energija per metus", Psum_metinis, 'kWh'],
]
table = tabulate(data, tablefmt='fancy_grid')
print(table)

```

3.2 Eksperimento metu naudoti komponentai

1. Fotovoltiniai saulės moduliai

gamintojas, modelis – Canadian Solar CS3L-350P – 2 vnt
didžiausia galia P_{\max} – 350 W;
darbinė įtampa V_{mpp} – 33 V;
darbinė srovė I_{mpp} – 10,61 A;
atviros grandinės įtampa V_{OC} – 40,2 V
trumpojo jungimo srovė I_{SC} – 11,24 A
didžiausia sistemos įtampa – 1000 V

2. *On Grid* mikro inverteris – VWC-600

gamintojas, modelis – VWC-600
įvesties parametrai:
didžiausia galia P_{\max} – 600 W;
išėjimo įtampa – 120/230 V (auto perjungimas);
atviros grandinės įtampa V_{OC} – 30-60 V
darbinė įtampa V_{mpp} – 22-60 V;
įsijungimo įtampa V – 22-60 V;
trumpojo jungimo srovė I_{SC} – 30 A;
didžiausia srovė – 24 A
išvesties parametrai:
didžiausiai pikinė galia – 600 W
nominali galia – 580 W
išėjimo srovė – 2,6 A
kintamos įtampos diapazonas – 180-280 VAC
kintamos įtampos dažnis 48 – 51;
Efektyvumas:
MPPT-efektyvumas – 99.5 %
Perdavimo efektyvumas – 95 %
Budintis režimas < 0,5 W
THD – < 5%

3. Baterijų įkrovimo valdiklis

gamintojas, modelis – EASUN MPPT 4880
Nominali sistemos įtampa – 12,24,36,48 V
Didžiausia įkrovimo srovė – 80 A;
Didžiausia PV modulių įtampa – 145 V
 V_{mpp} – 30 – 130 V
Didžiausia įėjimo galia 12V-1250W, 24V-2500W, 36V-3750W, 48V-5000 W
baterijų įkrovimo algoritmas – 3 pakopų
baterijų įkrovimo pakopos – *Bulk*, *Absorbition*, *Float*

4. Baterija

Gamintojas - LG Chem
Baterijos talpa 2160 Wh
Baterijos tipas – Ličio polimerai
Nominali celės talpa – 65,6 Ah
Celių skaičius - 8 (perjunta į 7 celes dėl įtampos sumažinimo)
Celės nominali įtampa – 3,6 V
Didžiausia krovimo srovė – 21,6A
Standartinė iškrovimo srovė – 32,5A



5. Baterijos elementų balansavimo įrenginys (*Smart BMS*)

gamintojas, modelis JK-BD6A17S8P
darbinė įtampa 20-100V
baterijos tipas – Li-ion
elementų skaičius – 7-17
balansavimo būdas – aktyvus
balansavimo srovė-0,6 A
pastovi Iškrovimo srovė –80A
pikinė iškrovimo srovė –150 A



6. Elektros sąnaudų skaitiklis Shelly PRO 3EM

įtampos matavimo diapazonas – 100–260
įtampos matavimo paklaida $\pm 1\%$
srovės matavimas -0-120A
srovės matavimo paklaida – $\pm 1\%$ (2 - 120 A), $\pm 2\%$ (1 - 2 A), $\pm 5\%$ (0 - 1 A)
galios ir energijos matavimas : aktyvi, suminė galia ir energija, galios faktorius
duomenų saugojimas - 60d.

7. Baterijos įtampos matavimams

gamintojas modelis -Shelly Plus add on
įtampos matavimas 0-10V
analoginio voltmetro tikslumas <5 %

8. PWM galios reguliatorius

įėjimo įtampa: DC10-55V

darbinė srovė: 60A

išėjimo srovė: 0-100A

didžiausia galia: 3000 W

Darbinis dažnis: 15KHZ

9. Step-up impulsinis maitinimo šaltinis

maitinimo įtampa : 8-60 V

dažnis : 150 kHz

didžiausia srovė : 20A

išėjimo įtampa : 12-83V

budėjimo režimu naudojama srovė : ~15mA

galia : 1200W

3.3 Elektros energijos 2023.04.01-2023.04.30 sunaudojimo ir elektros energijos gamybos duomenys

12 lentelė Individualaus namo elektros energijos sunaudojimo duomenys 2023.04.01-2023.04.30

Namo skaitiklio energijos sunaudojimo duomenys, (W) 2023 04 01 - 2023 04 30

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	116	303	144	931	262	39	77	409	233	134	99	750	88	164	283	156	136	298	115	135	112	132	101	101	403	134	170	341	156	102
2	104	230	127	883	119	41	77	96	100	146	101	641	90	98	172	155	129	414	112	199	85	106	99	97	407	146	144	475	121	98
3	96	114	117	835	121	40	75	90	77	127	97	797	86	104	135	154	135	459	111	148	104	125	111	104	384	129	100	110	91	93
4	104	116	114	958	108	59	93	91	104	145	115	663	95	103	136	164	134	407	109	121	102	123	121	108	103	143	112	96	118	114
5	99	119	114	738	100	43	77	88	83	152	101	789	100	86	121	152	125	326	109	110	89	110	122	102	89	136	102	96	99	95
6	110	127	139	633	139	302	320	84	83	164	118	234	86	140	117	149	158	291	140	163	135	150	225	134	239	153	339	103	104	94
7	105	110	175	133	123	58	84	102	85	276	96	103	56	182	139	249	165	228	174	172	113	133	171	111	429	306	125	226	114	79
8	197	103	1594	104	133	221	275	230	342	302	92	97	409	867	182	150	591	707	168	236	293	300	412	817	330	111	147	131	111	259
9	250	208	249	106	349	359	438	304	1148	592	129	92	182	335	231	852	473	646	964	550	130	174	755	646	-20	739	327	1552	356	369
10	139	649	103	1094	712	474	566	1059	602	164	524	97	75	783	362	446	222	150	568	118	98	106	637	193	46	393	99	993	151	1503
11	317	281	106	991	303	41	136	519	243	106	596	98	120	176	822	432	820	265	317	836	836	87	425	113	-87	784	108	646	166	446
12	120	235	192	274	277	145	211	541	240	93	741	41	111	441	311	499	369	101	528	133	133	101	531	126	-115	569	82	1099	671	176
13	272	310	177	183	343	49	85	526	120	90	287	343	71	166	349	465	929	91	135	114	114	110	569	91	-19	195	122	350	551	259
14	851	819	647	651	423	142	184	477	135	94	382	732	39	202	233	245	387	90	377	224	224	119	222	86	-322	603	167	165	212	219
15	935	465	366	362	323	249	311	742	110	93	384	874	112	151	232	398	211	97	653	145	145	118	261	84	-46	202	87	157	370	64
16	1345	585	115	197	234	212	250	1255	119	91	393	204	125	327	511	418	360	265	550	122	128	120	724	377	93	260	171	171	563	156
17	298	530	111	100	491	414	253	617	122	111	451	103	499	233	655	422	257	134	970	138	138	108	343	653	132	132	406	118	308	1160
18	236	327	839	371	1305	1288	669	586	137	97	254	190	1387	153	314	227	138	179	203	291	305	113	273	221	1522	260	415	162	108	168
19	340	464	797	159	372	372	770	1105	128	98	235	194	1049	184	187	464	167	187	190	227	290	108	402	943	479	188	406	273	78	564
20	504	290	834	298	352	352	603	1238	115	95	378	635	768	183	160	271	417	390	19	316	475	115	371	1078	291	206	494	211	76	603
21	495	309	932	361	242	242	613	765	119	728	948	226	835	197	319	1021	744	254	19	188	266	141	228	538	231	308	567	235	79	496
22	551	247	838	294	137	196	657	576	121	680	871	321	570	214	803	853	852	240	19	102	206	258	176	828	336	166	559	242	352	488
23	358	238	915	264	123	166	1116	243	171	138	810	137	171	189	251	719	630	181	19	111	148	124	197	973	272	112	338	252	175	133
24	540	245	938	318	60	100	1097	147	162	97	625	80	164	218	151	685	502	149	19	83	104	109	178	617	176	191	510	212	126	133
Sum	8.5	7.4	10.7	11.2	7.2	5.6	9.0	11.9	4.9	4.8	8.8	8.4	7.3	5.9	7.2	9.7	9.1	6.5	6.6	5.0	4.8	3.2	7.7	9.1	5.3	6.6	6.1	8.4	5.3	7.9

13 lentelė Saulės elektrinės 0,75 kWp elektros gamybos duomenys 2023.04.01-2023.04.30

Saulės elektrinės 0.7 kWp elektros gamybos duomenys, (W) 2023 04 01 - 2023 04 30

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	0	0	0	0	0	0	42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	110	71	0	0	20	0	0	18	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	110	74	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	111	81	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	111	91	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	110	87	0	0	20	0	0	0	0	0	3	1	3	0
6	0	0	1	1	1	0	19	5	0	9	2	11	0	0	1	13	1	17	31	5	5	20	0	0	0	0	18	15	21	0
7	0	1	7	20	27	1	29	39	0	45	22	51	1	1	10	27	30	0	0	0	0	20	0	0	0	0	41	31	61	0
8	0	11	47	39	71	9	63	78	0	86	65	84	24	24	61	39	48	0	0	0	0	7	0	0	0	105	110	122	27	
9	0	26	137	65	119	26	136	142	0	147	163	140	63	63	95	45	57	0	0	0	0	44	0	0	0	190	173	219	77	
10	0	49	141	73	179	52	240	215	0	174	257	215	72	72	179	55	72	0	0	0	0	8	0	0	0	238	229	305	201	
11	65	89	193	126	136	49	314	275	0	170	319	117	117	104	167	51	152	0	0	0	0	0	0	0	0	221	330	340	249	
12	51	124	244	100	132	49	311	172	111	197	353	108	108	93	123	76	234	0	0	0	0	0	0	0	0	256	286	186	265	
13	37	188	190	132	210	57	275	191	88	108	228	68	68	0	61	47	220	0	0	0	0	0	0	0	0	202	165	0	398	
14	33	169	207	110	253	55	287	122	81	112	243	36	36	31	47	54	155	0	0	0	0	0	0	0	0	263	317	0	399	
15	25	95	269	92	89	46	226	154	0	180	110	39	39	73	35	36	68	0	0	0	0	0	0	0	4	195	244	0	87	
16	18	161	161	57	108	43	94	36	15	76	71	1	1	13	63	18	74	0	0	0	6	0	0	5	8	105	152	10	318	
17	2	126	51	31	215	32	1	0	192	98	76	1	1	13	26	3	26	0	0	0	0	0	0	48	6	66	214	0	349	
18	1	34	4	5	19	2	0	0	33	15	4	0	0	14	0	0	0	0	0	0	13	0	0	112	18	26	82	84	274	
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	63	0	0	173	33	6	9	1	134	
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	159	0	0	183	43	0	0	0	5	
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	78	0	0	219	67	0	0	0	0	
22	0	0	0	0	0	61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	105	0	0	108	112	0	0	0	0	
23	0	0	0	0	0	48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	97	42	0	0	37	0	0	412	72	0	0	0	0	
24	0	0	0	0	0	42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	108	84	0	0	20	0	0	138	0	0	0	0	0	0
Sum	0.23	1.07	1.65	0.85	1.56	0.57	2.20	1.43	0.52	1.42	1.91	0.87	0.53	0.50	0.87	0.46	1.34	0.69	0.43	0.01	0.49	0.20	0.00	1.40	0.38	0.00	1.93	2.36	1.35	2.78

3.4 Elektros energijos 4 parų energijos srautų duomenys

14 lentelė. Sunaudotos ir gražintos į tinklą energijos duomenys

Laikas	Namo įvado skaitiklis sunaudota				Sunaudota iš tinklo vid.	Gražinta į tinklą	Sunaudota viso
01:00	10.85	163.54	151.84	138.74	116	0.0	198.54
02:00	10.85	149.79	127.96	134.09	106	-10.9	183.62
03:00	10.59	81.21	101.33	274.5	117	-20.4	179.81
04:00	10.81	12.13	25.28	141.06	47	-28.3	102.73
05:00	12	11.73	19.39	194.01	59	-27.0	99.39
06:00	72.38	59.16	161.47	283.3	144	0.0	144.07
07:00	54.47	55.62	142.3	223.64	119	0.0	119.01
08:00	55.25	76.34	68.13	52.23	63	0.0	62.99
09:00	212.25	124.37	60.7	57.8	114	0.0	113.78
10:00	566.51	173.97	53.46	70.92	216	0.0	216.22
11:00	474.97	39.06	23.12	42.6	145	-108.9	209.87
12:00	472.37	0.54	22.27	21.29	129	-174.0	246.46
13:00	291.58	133.1	23.39	10.38	115	-154.6	263.04
14:00	163.36	162.38	27.44	14.53	92	-115.3	250.30
15:00	105.95	57.48	11.79	5.59	45	-184.5	186.10
16:00	1.47	6.67	5.96	13.23	7	-191.8	113.52
17:00	0.29	140.6	47.24	191.7	95	-139.5	155.07
18:00	0.98	318.65	86.47	867.61	318	-91.9	389.23
19:00	60.71	143.72	179.59	184.04	142	-39.6	238.76
20:00	280.91	1021.7	680.52	296.54	570	0.0	594.45
21:00	204.88	414.53	311.88	709.45	410	0.0	410.74
22:00	209.05	217.09	234.93	267.82	232	0.0	322.14
23:00	215.58	291.62	157.51	122.85	197	0.0	287.71
00:00	173	207.64	155.51	269.38	201	0.0	285.84
Viso	3660.21	3899.1	2727.64	4448.56	3800	-1287	5373

15 lentelė. Gražintos į tinklą energijos duomenys

	Gražinta į tinklą				Vidurkis
01:00	0	0	0	0	0.0
02:00	-43.48	0	0	0	-10.9
03:00	-43.38	-33.06	-5.3	0	-20.4
04:00	-43.37	-40.32	-29.42	0	-28.3
05:00	-41.25	-40.65	-26.29	0	-27.0
06:00	-0.03	-0.02	-0.01	0	0.0
07:00	0	0	0	0	0.0
08:00	0	0	0	0	0.0
09:00	0	0	0	0	0.0
10:00	0	0	0	0	0.0
11:00	-67.1	-160.63	-123.5	-84.46	-108.9
12:00	-145.97	-286.65	-96.33	-166.99	-174.0
13:00	-230.05	-160.59	-82.42	-145.51	-154.6
14:00	-121.54	-95.79	-96.1	-147.96	-115.3
15:00	-182.47	-157.69	-187.84	-210.19	-184.5
16:00	-331.18	-205.92	-125.82	-104.09	-191.8
17:00	-315.88	-57.31	-135.81	-48.87	-139.5
18:00	-211.39	-22.22	-45.32	-88.53	-91.9
19:00	-62.04	-26.95	-24.69	-44.82	-39.6
20:00	0	0	0	0	0.0
21:00	0	0	0	0	0.0
22:00	0	0	0	0	0.0
23:00	0	0	0	0	0.0
00:00	0	0	0	0	0.0

16 lentelė. Saulės elektrinės 0,7 kWp ir 2 kWh akumulatoriaus energijos srautų duomenys

	Saulės elektrinė 0.75 kWp				Energija iš akumulatoriaus	Saulės sugeneruota energija perduodama į vidinį tinklą
01:00	80	90.69	72.46	86.02	82	82
02:00	89.52	90.49	87.66	87.59	89	89
03:00	90.08	89.82	68.01	85.42	83	83
04:00	90.33	89.9	75.59	78.94	84	84
05:00	89.85	89.76	64.18	24.81	67	67
06:00	0	0.01	0.02	0	0	
07:00	0	0	0	0	0	
08:00	0	0	0	0	0	
09:00	0	0	0	0	0	
10:00	0	0	0	0	0	
11:00	258.25	180.17	154.61	102.37	174	174
12:00	420.26	414.2	129.52	201.32	291	291
13:00	461.93	422.52	125.45	202.38	303	303
14:00	353.63	378.13	155.26	207.87	274	274
15:00	321.31	463.93	240.7	275.84	325	325
16:00	444.55	426.36	176.77	146.09	298	298
17:00	383.25	115.29	173.15	126.62	200	200
18:00	294.95	56.04	113.95	185.71	163	163
19:00	164.1	120.18	139.72	121.46	136	136
20:00	11.97	32.63	27.68	25.86	25	25
21:00	0.37	0.73	0.8	0.31	1	1
22:00	89.75	89.45	90.26	90.2	90	90
23:00	91.21	91.08	91.2	89.79	91	91
00:00	90.87	74.64	81	91.3	84	84
Suma	3826.18	3316.02	2067.99	2229.9	2860	671
						2189

17 lentelė. Paros energijos srautų duomenys

Parametras	Kwh
Sunaudota iš tinklo vid.	3.8
Gražinta į tinklą	-1.3
Saulės elektrinė	2.19
Akumulatorius	0.67
Sunaudota iš tinklo = importas - exportas	2.51
Sunaudota viso	5.37