

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

Rolandas Geistas

**OPTIMALAUS SAULĖS ELEKTRINĖS KEITIKLIO LYGIO
TYRIMAS ĮVERTINANT ĮVAIRIUS PARAMETRUS**

Baigiamasis magistro darbas

Vadovas

Lekt. dr. B. Linkevičiūtė

KAUNAS, 2018

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

OPTIMALAUS SAULĖS ELEKTRINĖS KEITIKLIO LYGIO
TYRIMAS ĮVERTINANT ĮVAIRIUS PARAMETRUS

Baigiamasis magistro darbas
Energijos technologijos ir ekonomika
(621E30004)

Vadovas

(parašas) Lekt. dr. B. Linkevičiūtė
(data)

Recenzentas

(parašas) Doc. dr. M. Vaitkūnas
(data)

Projektą atliko

(parašas) Rolandas Geistaras
2018-05-22



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Rolandas Geistasaras

(Studento vardas, pavardė)

Energijos technologijos ir ekonomika (621E30004)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto

„Optimalaus saulės elektrinės keitiklio lygio tyrimas įvertinant įvairius parametrus“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 18 m. gegužės 22 d.

Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Rolando Geistaro**, baigiamasis darbas tema „Optimalaus saulės elektrinės keitiklio lygio tyrimas įvertinant įvairius parametrus“, yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Rolandas Geistas. Optimalaus saulės elektrinės keitiklio lygio tyrimas įvertinant įvairius parametrus. *Magistro tiriamasis darbas / vadovė lekt. dr. B. Linkevičiūtė; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.*

Studijų kryptis ir sritis: Inžinerija, Energijos inžinerija

Reikšminiai žodžiai: *tinklo keitiklis, optimalus apkrovimo lygis, saulės elektrinė, ekonominis atsiperkamumas*

Vilnius, 2018. 83 p.

SANTRAUKA

Tiriamajame magistro darbe atliekamas optimalaus fotovoltinės saulės elektrinės keitiklio lygio tyrimas. Tyrimas atliekamas įvertinant fotovoltinių saulės modulių technologiją, fotovoltinių saulės modulių posvyrio kampą nuo horizonto ir fotovoltinių saulės modulių orientaciją erdvėje.

Apžvalginėje tiriamojo darbo dalyje pateikiama bendroji informacija apie saulės energiją, fotovoltinių saulės elementų veikimo principą, fotovoltinių saulės elementų tipus bei aprašomos fotoelementuose atsiradusių nuostolių susidarymo priežastys. Pateikiama informacija apie fotovoltinių saulės modulių susidarymą, pagrindinius jų parametrus ir jungimo būdus. Aprašomas fotovoltinės saulės elektrinės keitiklio veikimo principas, keitiklių tipai ir jų pagrindinės savybės. Išanalizavus literatūrą, pristatomi pagrindiniai parametrai, darantys įtaką saulės elektrinės keitiklio apkrovimo lygio dydžiui.

Tyrimui atlikti sudarytas fotovoltinės saulės elektrinės matematinis modelis, imituojantis fotovoltinių saulės modulių bei keitiklio darbą. Saulės elektrinės matematinis modelis sudarytas matematinėmis lygtimis aprašius saulės poziciją, apšvitą į pakreiptą plokštumą, fotovoltinių saulės modulių veikimo imitaciją ir saulės elektrinės keitiklio veikimo imitaciją. Aplinkos parametrų vertės pagrįstos realių ilgamečių matavimų duomenimis, išmatuotais konkrečioje vietovėje.

Optimalaus fotovoltinės saulės elektrinės keitiklio tyrimas yra atliktas 10 kWp galios keitiklį apkraunant įvairių dydžių apkrovomis. Tyrimui pasirinkti dviejų gamybos technologijų saulės moduliai (polikristaliniai ir monokristaliniai), kurių posvyrio kampas ir orientacija yra keičiama. Optimalus keitiklio apkrovimo lygis nustatomas atskirai pagal didžiausią elektros generacijos našumą iš instaliuotosios galios ir pagal greičiausią ekonominį atsipirkimą diskontuojant pinigų srautus laike.

Rolandas Geistaras. *Analysis of Optimal Level of Solar Inverter for Various Parameters: Master's thesis in research* / supervisor lect. dr. Birutė Linkevičiūtė. The Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area: Engineering, Energy Engineering

Key words: grid-tie inverter, optimum load level, photovoltaic solar plant, economical payback
Vilnius, 2018. 83 p.

SUMMARY

Master's thesis research is analyzing optimal level of solar inverter. Optimal level of solar power plant is carry out by evaluating photovoltaic solar modules technology, photovoltaic solar modules inclination and solar modules orientation.

In master's thesis the review section common knowledge about solar energy is presented, also solar photoelement operating principle, solar photoelement types and also causes of loss. Information about photovoltaic solar modules structure, main parameters and the way modules connection is could be done. Also described solar power plant inverter operating principle, types of solar plat inverters and they main differences. Literature analysis presented main parameter's causing solar power plant inverter load level size.

Research is made by computing photovoltaic solar power plant mathematical model imitating solar modules and inverter operation. Solar power plant mathematical model is done in mathematical formulas describing: solar position, irradiation on tilted plane, photovoltaic solar modules operation, photovoltaic inverter operation. The environment parameters values are taken from actual long-term measurements of the area.

Optimal solar power plant inverter size is analyzed using 10 kWp power inverter by changing load size. In research are used two types of photovoltaic solar modules (polycrystalline and monocrystalline) whose inclination angle and orientation are changing. Optimal inverter load level determined in two cases, according to maximum generation of electricity from installed capacity and according to minimum payback term by economical discounting cash flows in time.

TURINYS

SANTRUMPŲ SĄRAŠAS	11
ĮVADAS	15
1. LITERATŪROS APŽVALGA	16
1.1. Bendros žinios apie saulės energetiką.....	16
1.2. Fotovoltinio saulės elemento veikimo principas	17
1.3. Fotovoltinių elementų tipai	18
1.3.1. Monokristaliniai silicio fotovoltiniai elementai	18
1.3.2. Polikristaliniai silicio fotovoltiniai elementai	19
1.4. Nuostoliai fotovoltiniuose elementuose.....	19
1.5. Fotovoltinių saulės modulių jungimo būdai	20
1.5.1. Nuoseklus fotovoltinių saulės modulių jungimas	20
1.5.2. Lygiagretus fotovoltinių saulės modulių jungimas	21
1.6. Fotovoltinės saulės elektrinės keitiklis	22
1.6.1. Fotovoltinės saulės elektrinės keitiklio veikimo principas	22
1.7. Fotovoltinių saulės keitiklių tipai	24
1.7.1. Autonominiu režimu veikiančys keitikliai.....	24
1.7.2. Tinklo keitikliai	25
1.8. Optimalus fotovoltinių saulės elektrinių keitiklių apkrovimo lygis	27
1.8.1. Fotovoltinės saulės elektrinės geografinė padėtis	28
1.8.2. Fotovoltinių saulės modulių posvyrio kampas.....	31
1.8.3. Fotovoltinių saulės modulių orientacija	32
1.8.4. Fotovoltinių saulės modulių technologija	33
1.8.5. Optimalaus keitiklio apkrovimo lygio nustatymas įvertinant įvairius parametrus	34
2. TYRIMO METODIKA	36
2.1. Apšvitos į pakreiptą plokštumą matematinis saulės modelis.....	36

2.1.1.	Saulės pozicija.....	37
1.1.1.	Suminės apšvitos į pakreiptą plokštumą skaičiavimas.....	42
2.2.	Fotovoltinio saulės modulio matematinis modelis	45
2.3.	Saulės elektrinės keitiklio matematinis modelis	54
3.	TIRIAMOJI DALIS	55
3.1.	Tyrimo specifika ir priemonės.....	55
3.1.1.	Meteorologinių matavimų duomenys.....	57
3.1.2.	Fotovoltiniai saulės moduliai	58
3.1.3.	Fotovoltinės saulės elektrinės keitiklis.....	58
3.2.	Optimalaus keitiklio apkrovimo lygio nustatymas įvertinant modulių posvyrio kampą.....	60
3.3.	Optimalaus keitiklio apkrovimo lygio nustatymas įvertinant modulių orientaciją.....	62
3.4.	Ekonominis keitiklio lygio apkrovimo pagrindumas ir atsiperkamumas	65
	IŠVADOS	78
	LITERATŪROS SĄRAŠAS	80

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.6.1.1. lentelė. Viso tiltelio topologijos įtampos šaltinio keitiklio raktų būsenos. [13].....	23
2.2.1. lentelė. Fotovoltinių saulės modulių P270 ir M300 techninės specifikacijos.	48
3.1.1.1. lentelė. Keitiklio K10 apkrovimo lygio tyrimo režiai, tiriant P270 modulius.....	56
3.1.1.2. lentelė. Keitiklio K10 apkrovimo lygio tyrimo režiai, tiriant M300 modulius.	57
3.1.3.1. lentelė. Fotovoltinės saulės elektrinės keitiklio techninės specifikacijos.....	59
3.3.1. lentelė. Procentinės vidutinės metinės apšvitos išraiškos priklausomai nuo modulių posvyrio kampo ir orientacijos	62
3.3.2. lentelė. Optimalus fotovoltinės saulės elektrinės (su polikristaliniais saulės moduliais) keitiklio apkrovimo lygis priklausomai nuo modulių posvyrio kampo ir orientacijos.....	63
3.3.3. lentelė. Optimalus fotovoltinės saulės elektrinės su monokristaliniais saulės moduliais keitiklio apkrovimo lygis priklausomai nuo modulių posvyrio kampo ir orientacijos.....	64
3.4.1 lentelė. Saulės elektrinės (9,99 kWp) su polikristaliniais saulės moduliais įrengimo sąmata ..	66
3.4.2. lentelė. Saulės elektrinės (9,9 kWp) su monokristaliniais saulės moduliais įrengimo sąmata.	66
3.4.3. lentelė. Fotovoltinės saulės elektrinės (su polikristaliniais saulės moduliais) atsipirkimo laikotarpis esant vardiniam keitiklio apkrovimo lygiui, priklausomai nuo modulių posvyrio kampo ir orientacijos	69
3.4.4. lentelė. Fotovoltinės saulės elektrinės (su monokristaliniais saulės moduliais) atsipirkimo laikotarpis esant vardiniam keitiklio apkrovimo lygiui, priklausomai nuo modulių posvyrio kampo ir orientacijos	70
3.4.5. lentelė. Fotovoltinės saulės elektrinės (su polikristaliniais saulės moduliais) atsipirkimo laikotarpis lygis esant ekonomiškai optimaliam apkrovimo lygiui, priklausomai nuo modulių posvyrio kampo ir orientacijos	72
3.4.6. lentelė. Fotovoltinės saulės elektrinės (su polikristaliniais saulės moduliais) atsipirkimo laikotarpis esant ekonomiškai optimaliam apkrovimo lygiui, priklausomai nuo modulių posvyrio kampo ir orientacijos	73

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.2.1. pav. Puslaidininkinių medžiagų draudžiamosios juostos dydžiai [1].....	17
1.2.2. pav. Tipinio fotovoltinio saulės elemento pjūvis.....	18
1.5.1.1. pav. Nuosekliai sujungtų fotovoltinių modulių schema ir voltamperinės charakteristikos [1]	21
1.5.1.2. pav. Lygiagrečiai sujungtų fotovoltinių modulių schema ir voltamperinės charakteristikos [1]	21
1.6.1.2. pav. Konvertuotos (nefiltruotos) (a) įtampos ir (b) srovės kreivės.....	24
1.7.1.1. pav. Autonominės fotovoltinės sistemos struktūrinė schema	25
1.7.2.1. pav. a) centrinių keitiklių topologijos schema; b) serijų keitiklių topologijos schema	26
1.7.2.2. pav. a) mikro-keitiklių topologijos schema; b) multi-serijų keitiklių topologijos schema....	26
1.8.1 pav. Vidutinio keitiklio efektyvumo priklausomybė nuo keitiklio perkrovos lygio ir apšvitos [6]	28
1.8.1.1. pav. Vidutinė metinė saulės apšvita Lietuvoje W/m^2 [9].....	29
1.8.1.2. pav. Vidutinė metinė oro temperatūra Lietuvoje (pagal 1981–2010 m. atliktų matavimų duomenis) [14].....	30
1.8.1.3. pav. Vidutinis metinis vėjo greitis Lietuvoje (pagal 1981–2010 m. atliktų matavimų duomenis) [15].....	30
1.8.2.2. pav. Vienos tipinės vasaros paros apšvitos priklausomybė nuo modulių orientacijos.....	33
1.8.4.1. pav. Fotovoltinių saulės elementų efektyvumo kreivės, kai kinta jų temperatūra ir krentantis tiesioginis apšvitos kiekis [8]	34
1.8.5.1. pav. Vienos tipinės paros keitiklio generacijos priklausomybė nuo paros laiko, kai yra kintamas apkrovimo lygis.....	35
2.2.1. pav. Idealaus fotovoltinio elemento ekvivalentinė schema	46
2.2.2. pav. Fotovoltinio saulės elemento voltamperinė ir galios-įtampos charakteristikos.....	46
2.2.3. pav. Fotovoltinio saulės modulio modelio blokinė schema	49
2.2.4. pav. Fotovoltinio saulės modulio P270 voltamperinė charakteristika.....	49

2.2.5. pav. Fotovoltinio modulio P270 galios charakteristika	50
3.1.1. pav. Fotovoltinio saulės keitiklio tyrimo schema.....	55
3.1.2.1. pav. Saulės moduliai – (a) polikristalinis ir (b) monokristalinis	58
3.1.3.1. pav. Keitiklio K10 efektyvumo priklausomybės nuo apkrovimo lygio ir įtampos	59
3.2.2. pav. Metinės elektros energijos generacijos iš fotovoltinės saulės elektrinės (su polikristaliniais saulės moduliais) priklausomybė nuo modulių montavimo kampo ir keitiklio apkrovimo galios	60
3.2.3. pav. Metinės elektros energijos generacijos iš fotovoltinės saulės elektrinės (su monokristaliniais saulės moduliais) priklausomybė nuo modulių montavimo kampo ir keitiklio apkrovimo galios	61
3.2.4. pav. Fotovoltinės saulės elektrinės keitiklio optimalaus apkrovimo lygio priklausomybė nuo fotovoltinių saulės modulių montavimo kampo	62
3.4.1. pav. Saulės elektrinės įrengimo investicinių kaštų priklausomybė nuo apkrovimo lygio.....	67
3.4.2. pav. Fotovoltinės saulės elektrinės su polikristaliniais moduliais, pinigų srautai diskontuojant pinigų srautus dabartine verte.....	75
3.4.3. pav. Fotovoltinės saulės elektrinės su monokristaliniais moduliais, pinigų srautai diskontuojant pinigų srautus dabartine verte.....	76
3.4.4. pav. Ekonomiškai optimalus keitiklio apkrovimo lygis priklausomai nuo polikristalinių fotovoltinių saulės modulių orientacijos ir posvyrio kampo	77
3.4.5. pav. Ekonomiškai optimalus keitiklio apkrovimo lygis priklausomai nuo monokristalinių fotovoltinių saulės modulių orientacijos ir posvyrio kampo	77

SANTRUMPŲ SĄRAŠAS

AC	- Kintamoji srovė (angl. <i>alternating current</i>)
a-Si	- Amorfinis silicis
D	- Diena
DC	- Nuolatinė srovė (angl. <i>direct current</i>)
EJ	- Eksadžiaulis ($J \cdot 10^{18}$)
GaAS	- Galio arsenidas
Ge	- Germanis
Y	- Metai
JC	- Julijaus šimtmetis
JD	- Julijaus diena
JEC	- Julijaus Efemerido šimtmetis
JED	- Julijaus Efemerido diena
JME	- Julijaus Efemerido tūkstantmetis
M	- Mėnesis
MPPT	- Didžiausio galios taško sekiklis (angl. <i>maximum power point tracker</i>)
NPV	- Dabartinė grynoji vertė (angl. <i>net present value</i>)
Si	- Silicis
SPA	- Saulės pozicijos algoritmas
VL	- Visuotinis laikas

SIMBOLIŲ SĄRAŠAS

A	- Azintropijos indeksas
C₀	- Koeficientas, apibūdinantis AC išėjimo ir DC įėjimo galios priklausomybės išlinkį [$1/W$]
C_a	- Amortizacijos ir nusidėvėjimo išlaidos [€]
CF	- Metinis pinigų srautas [€]
C_{FF}	- Fotovoltinio saulės modulio šiluminės talpos koeficientas - 1,22 [$K \cdot m^2$]
CF_t	- Metinis pinigų srautas laiko momentu t [€]
C_m	- Medžiagos savitoji šiluminė talpa
C_{mod}	- Fotovoltinio saulės modulio šiluminė talpa
C_{tp}	- Techninės priežiūros išlaidos [€]
d_g	- Fotovoltinių saulės modulių degradacijos lygis
E	- Momentinė apšvita [W/m^2]
e	- Topocentrinis aukštumos kampas
E	- Spinduliuojamas saulės galios srautas [W/m^2]
E₀	- Apšvitos srautas standartinėmis sąlygomis 1000 [W/m^2]

E_{dan}	- Saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų, atspindėjusių nuo dangaus skliauto, galios srautas
E_{mod}	- Saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų, atspindėjusių nuo fotovoltinio saulės modulio paviršiaus, galios srautas
E_{zem}	- Saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų, atspindėjusių nuo žemės paviršiaus, galios srautas
E_{Σ}	- Visas saulės galios srautas, patenkantis į fotovoltinio modulio paviršių
F_{ab}	- Sklaidos koeficientas, apibūdinantis saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų perdavimą iš a paviršiaus į b paviršių
F_{ba}	- Sklaidos koeficientas, apibūdinantis saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų perdavimą iš b paviršiaus į a paviršių
H	- Stebėtojo vietinis valandos laikas
H'	- Topocentrinis stebėtojo vietinis valandos laikas
h_k	- Šilumos konvekcijos koeficientas
$h_{k, laisv}$	- Laisvasis konvekcijos koeficientas [$W/m^2 \cdot K$].
$h_{k, pad}$	- Padidėjusios konvekcijos koeficientas [$W/m^2 \cdot K$]
I_0	- Saulės insoliacija [W/m^2]
I_B	- Tiesioginės-normalinės apšvitos dalis ant horizontalaus paviršiaus [W/m^2]
I_D	- Bendroji išskaidytoji apšvita ant horizontalaus paviršiaus [W/m^2]
I_{FVM}	- Fotovoltinio saulės modulio srovė [A]
I_H	- Bendroji apšvita ant horizontalaus paviršiaus [W/m^2]
I_m	- Fotovoltinio modulio srovė didžiausios galios taške [A]
I_{sc}	- Saulės konstanta – 1 367 [W/m^2]
I_{SE}	- Saulės elektrinės modulio masyvo srovė [A]
I_T	- Apšvita į pakreiptą plokštumą [W/m^2]
$I_{t,j}$	- Fotovoltinio modulio trumpojo jungimo srovė [A]
I_{TB}	- Tiesioginė apšvita į pakreiptą plokštumą [W/m^2]
I_{TD}	- Išskaidytoji apšvita į pakreiptą plokštumą [W/m^2]
$I_{TD, hb}$	- Horizontalo apšvita [W/m^2]
$I_{TD, cs}$	- Išskaidytoji papildoma apšvita [W/m^2]
$I_{TD, iso}$	- Išskaidytoji izotropinė apšvita [W/m^2]
I_{TR}	- Atspindėjusi apšvita į pakreiptą plokštumą [W/m^2]
k	- Santykinis fotovoltinio saulės modulio naudingo darbo paviršiaus sugeriančio saulės srautą koeficientas
k	- Diskonto norma
k_t	- Giedrumo indeksas
L	- Heliocentrinė platumas
L_a	- Nuo a paviršiaus atspindėjęs saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų galios srautas
L_b	- Nuo b paviršiaus atspindėjęs saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų galios srautas
l_m	- Medžiagos storis [m]
P	- Metinis vidutinis vietinis slėgis
p	- Metinės gaunamos pajamos [€]

P_{AC}	- Keitiklio pagaminta kintamosios srovės elektros energija [W]
P_{AC0}	- Maksimali leidžiama keitiklio išėjimo AC galia [W]
P_{DC0}	- DC galios lygis, kai AC galios reikšmė pasiekta nustatytai veikimo sąlygai [W];
P_{ib}	- Saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų galia fotovoltinio modulio paviršiuje
$P_{ib,ab}$	- Saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų mainų srautų tarp a b paviršių galia
P_{is}	- Modulyje sukuriama elektros momentinė galia jo išėjime [W]
P_{konv}	- Šilumos konvekcijos kitimo greitis fotovoltiniame saulės modulyje
P_{s0}	- Pradinė keitiklio įėjimo DC galia [W]
P_{tb}	- Saulės galios sraute esančių trumpųjų bangų galia fotovoltinio modulio paviršiuje
R	- Tikrasis atstumas tarp saulės ir žemės, priklausantis nuo metų dienos
R_A	- Apkrovos varža [Ω]
R_{av}	- Vidutinis saulės atstumas nuo saulės
r_b	- Kintamas geometrinis koeficientas
s	- Elektros energijos kaina [€/kWh]
S_p	- Fotovoltinio saulės modulio paviršiaus plotas [m^2]
T	- Metinė vidutinė vietinė temperatūra
T_0	- Standartinė bandymų temperatūra 25 [$^{\circ}C$]
T_a	- Momentinė aplinkos temperatūra [$^{\circ}C$]
t_a	- Investicijų atsipirkimo laikotarpis
T_{dan}	- Dangaus skliauto temperatūra
T_{mod}	- Fotovoltinio saulės modulio temperatūra
T_{zem}	- Žemės paviršiaus temperatūra
U_0	- Fotovoltinio modulio tuščios veikos įtampa [V]
U_{DC}	- Keitiklio įėjimo įtampa [V]
U_{DC0}	- DC įtampos lygis, kai AC galios reikšmė pasiekta nustatytai veikimo sąlygai [V]
U_{FVM}	- Fotovoltinio saulės modulio įtampa [V]
U_m	- Fotovoltinio modulio įtampa didžiausios galios taške [V]
U_{SE}	- Saulės elektrinės modulių masyvo įtampa [V]
v	- Tikrasis kosminis laikas, perskaičiuotas iš Grinvičo laiko
α	- Geocentrinis saulės pakilimas
α'	- Topocentrinis saulės pakilimas
$\alpha_{t,j}$	- Temperatūrinis trumpojo jungimo koeficientas [$mA/^{\circ}C$]
β	- Geocentrinė ilguma
β_0	- Temperatūrinis tuščios veikos koeficientas [$mV/^{\circ}C$]
Γ	- Topocentrinis astronominis azimuto kampas
γ	- Paviršiaus azimuto pasisukimo kampas
δ	- Geocentrinė saulės deklinacija
δ'	- Topocentrinė saulės deklinacija
Δe	- Atmosferinė refrakcija
$\Delta \varepsilon$	- Žemės ašies nutacija
$\Delta \tau$	- Aberacijos korekcija

$\Delta\psi$	- Ilgumos nutacija
ε	- Žemės ekliptika
θ	- Geocentrinė platuma
θ	- Spinduliavimo kampas
θ_0	- Posvyrio kampas nuo statmens, lygiagretaus ekvatoriui
θ_z	- Topocentrinis zenito kampas
λ	- Tikroji saulės ilguma
ξ	- Ekvatorinis horizontalus saulės paralaksas
ρ	- Atspindžio nuo montuojamos plokštumos koeficientas
σ	- Stebėtojo geografinė ilgumos padėtis
σ	- Stefano-Bolcmano konstanta $5,6705 \cdot 10^{-8} \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K}^4]$
φ	- Stebėtojo geografinė padėtis
Φ	- Topocentrinis azimuto kampas
ϕ	- Santykinė oro drėgmė
ω	- Posvyrio kampas matuojant nuo horizontalios plokštumos
ϑ	- Stebėtojo platuma

IVADAS

Darbo aktualumas

Žemės atmosferoje šiltnamio dujų kiekiui pasiekus kritinį lygį, energetika privalo sumažinti iškastinio kuro sunaudojimą ir plėtoti tik atsinaujinančių energijos šaltinių naudojimą. Didžiausias neišnaudotas energijos potencialas Žemėje yra saulės šviesos energija, kuri nuolatos pasiekia žemės paviršių didžiuliais kiekiais. Saulės šviesos energija gali būti panaudojama tiesiogiai kaip šilumos energija arba iš šviesos energijos konvertuojant į elektros energiją, bendruoju atveju panaudojant fotoelementus naudojama kaip elektros energija. Elektros energija yra labai lanksti energijos rūšis – jeigu pagaminta elektros energija nėra suvartojama iš karto, ji gali būti akumuliuojama arba perduodama elektros tinklais iki artimiausio apkrovos taško.

Atsinaujinančiųjų šaltinių energetikos šaka, kai iš saulės šviesos energijos išgaunama elektros energija, vadinama fotovoltinės saulės energetika. Fotovoltinėje saulės energetikoje išgaunant elektros energiją naudojamos fotovoltinės saulės elektrinės. Fotovoltinė saulės elektrinė – tai elektros įrenginių sistema, kurios pagrindą sudaro fotovoltiniai saulės moduliai ir saulės elektrinės keitiklis.

Fotovoltinės saulės elektrinės keitiklis yra esminis saulės elektrinės sistemos komponentas, nuo kurio priklauso bendras sistemos našumas. Fotovoltinis saulės keitiklis konvertuoja saulės modulių sukurtą DC (nuolatinę srovę) į AC (kintamąją srovę), kuri yra tinkama buitiniam naudojimui. Fotovoltinės saulės elektrinės našumas išauga ir investicijų atsiperkamumo laikotarpis sutrumpėja, kai saulės elektrinės keitiklio apkrovimo lygis yra parenkamas įvertinant geografinės vietos aplinkos parametrus, fotovoltinių saulės modulių orientaciją, fotovoltinių saulės modulių posvyrio kampą, fotovoltinių saulės modulių technologiją.

Tiriamąo darbo tikslas

Nustatyti optimalų fotovoltinės saulės elektrinės keitiklio apkrovimo lygį įvertinant geografinę padėtį, posvyrio kampą, modulių orientaciją ir modulių technologiją.

Tiriamąo darbo uždaviniai

1. Atlikti fotovoltinių saulės elektrinių literatūros analizės apžvalgą;
2. Sudaryti fotovoltinės saulės elektrinės matematinį modelį, imituojantį tikros fotovoltinės saulės elektrinės darbą ir generaciją;
3. Atlikti saulės elektrinės keitiklio apkrovimo tyrimą, nustatant optimalų lygį pagal maksimalią generaciją iš instaliuotos galios;
4. Atlikti fotovoltinės saulės elektrinės ekonominę analizę ir nustatyti optimalų keitiklio apkrovimo lygį pagal trumpiausią investicijų atsipirkimo laikotarpį.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Bendros žinios apie saulės energetiką

Tiesiogine ir netiesiogine forma atsinaujinantys išteklių – tai tam tikru būdu transformuota saulės energija. Atsinaujinančių išteklių rūšys yra skirstomos pagal gautą saulės energijos kiekį. Vidutiniškai per metus žemę pasiekia 5,4 mln. EJ (eksadžaulių). Trečdalis visos energijos pasklinda į kosmosą, o kita dalis, t. y. 3,8 mln. EJ, tenka žemės paviršiui. Žemei tenkanti saulės energija pasiskirsto taip: 2,55 mln. EJ – tiesioginiam oro, vandens ir žemės šildymui, 1,26 mln. EJ – išgarinimo / kondensacijos ciklui, 11 700 EJ – vėjo ir bangų atsiradimui, 1 260 EJ – fotosintezei, likusi dalis t. y. 1 100 EJ – vandenynų potvyniams, konvekcijai ugnikalniuose (Boyle ir kt., 2003).

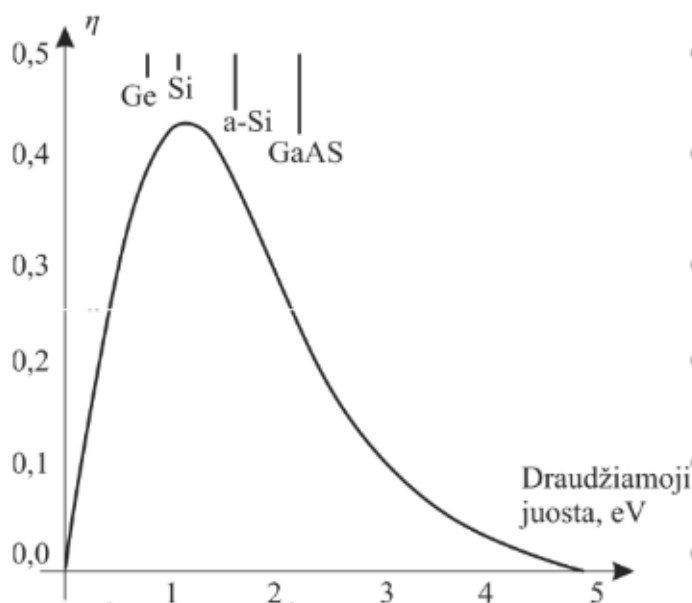
Saulės energijos išteklių gali būti skaidomi į dvi pagrindines dalis - tiesioginius ir netiesioginius išteklius. Tiesioginiai išteklių, saulės šiluma ir šviesa, gali būti naudojami elektros energijai gaminti. Netiesioginiai išteklių (biologiniai, fiziniai, atmosferiniai) susidaro veikiant saulės energijai.

Saulės spinduliuotė – elektromagnetinės bangos, turinčios platų spektrą. Bangos, kurių ilgis yra nuo 0,3 μm iki 0,4 μm , yra ultravioletinės bangos. Bangos, kurių ilgis – nuo 0,4 μm iki 0,7 μm , yra regimosios bangos, o infraraudonųjų spindulių bangų ilgis yra daugiau kaip 0,7 μm . Didžiausia galia yra sutelkta ties regimuoju ir infraraudonųjų bangų dažnio diapazonu. Pagrindiniai spinduliuotės matavimo vienetai yra vatai kvadratiniam metrui (W/m^2). Saulės spinduliuotė yra skirstoma į tiesioginę ir išsisklaidančiąją pagal savo prigimtį. Tiesioginė spinduliuotė – tai spinduliuotė, krintanti tiesiogiai į žemės paviršių (nekeičianti krypties). Išsisklaidančioji spinduliuotė – tai spinduliuotė, pasiekianti žemės paviršių iš dangaus. Bendroji spinduliuotė – tai matematiškai apskaičiuota tiesioginės ir išsklaidytosios spinduliuotės suma.

Galima matematinėmis lygtimis apskaičiuoti saulės spinduliuotės energiją už atmosferos ribų, tačiau žemės paviršių pasiekianti spinduliuotė priklauso nuo įvairių klimato savybių. Saulės spinduliuotės prognozavimui tikslingiausia naudoti ilgalaikių stebėjimų (10 metų ir daugiau) vertes, išmatuotas tam tikrose regionuose. Žemės vidutinė apšvita ties viršutine atmosferos riba pagal NASA duomenis yra 1 353 W/m^2 .

1.2. Fotovoltinio saulės elemento veikimo principas

Fotovoltinis saulės elementas – puslaidininkinė medžiaga, kuri šviesos energija paverčia elektros energija. Reiškiny apibūdinantis šį virsmą, vadinamas - fotoelektriniu efektu. Fotoelektrinis efektas paprasčiausiai paaiškinamas silicio pavyzdžiu. Silicio atomas, sudarytas iš 14 protonų ir 14 elektronų. Išoriniame (valentiniame) sluoksnyje yra 4 elektronai. Formuojantis silicio fotokristalui atomai susitapatina, sudarydami kovalentines jungtis su 4 gretimais atomais, t. y. silicio atomas dalijasi 1 iš 4 turimų valentinių elektronų su gretimo atomo 1 iš 4 elektronų kiekvienoje jungtyje. Visų silicio elemento atomų išorinis sluoksnis yra visiškai užpildytas, atomas – stabilios būsenos. Elektronai gali judėti tarp atomų ir peršokti į laidumo juostą tik gavę energijos. Kiekviena medžiaga turi skirtingo pločio draudžiamąją juostą, kuri yra laidumo ir valentinės juostų energijos skirtumas. Draudžiamosios juostos dydis yra tiesiogiai proporcingas fotovoltinio saulės elemento tuščios veikos įtampai.

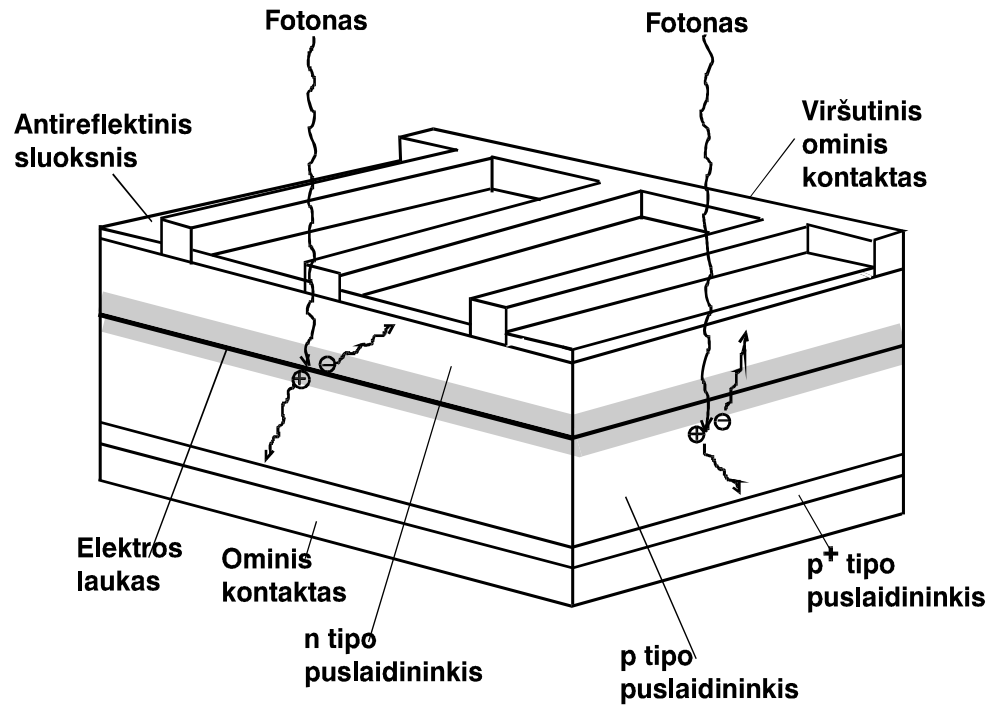


1.2.1. pav. Puslaidininkinių medžiagų draudžiamosios juostos dydžiai [1]

Fotoelektros elemento efektyvumas priklauso nuo draudžiamosios juostos dydžio: kuo didesnė draudžiamoji juosta, tuo daugiau energijos reikia suteikti medžiagai (trumpesnė šviesos banga). Kiekvienas išspinduliuotas fotonas turi savo savitąją energiją, todėl, jeigu fotono energija mažesnė už draudžiamosios juostos dydį, jis negali permesti elektrono iš valentinės juostos į laidumo juostą. Fotonas, kurio energija lygi puslaidininkinės medžiagos draudžiamosios juostos dydžiui, gali išmušti

elektroną iš valentinės juostos bei permesti jį į laidumo juostą ir elektrono vietoje palikti fizikoje taip vadinamą *skylę*.

Saulės energetikoje dažniausiai naudojamas legiruotas silicis, kuris gaunamas į vieną plokštelės pusę įterpiant boro priemaišų, o į kitą – fosforo priemaišų. Naujas darinys turi suformuotą p-n sandūrą, kuri užtikrina pastovų elektrinį lauką. P-n sandūroje esantis elektrinis laukas nukreipia elektronus ir skylės kryptimis, kurias sujungus grandine, elementu teka nuolatinė elektros srovė. Grandinė sudaroma suformavus kontaktus: viršutinį (tinklelio pavidalo) ir apatinį (metalo sluoksnio).



1.2.2. pav. Tipinio fotovoltinio saulės elemento pjūvis

1.3. Fotovoltinių elementų tipai

1.3.1. Monokristaliniai silicio fotovoltiniai elementai

Monokristaliniai silicio fotovoltiniai elementai sudaro beveik trečdalį visų pagaminamų saulės elementų. Yra daug įvairių silicio auginimo būdų, tačiau vienas populiariausių yra *Czochralski*. Naudojant šį metodą, monokristalas lėtai (1 mm/min) traukiamas iš silicio lydinio. Traukiamas kristalas yra legiruojamas boru. Monolitinio kristalo skersmuo dažniausiai siekia iki 30 cm. Ištraukus monokristalą, jis supjaustomas 0.3 mm pločio plokštelėmis. Monokristalo plokštelės nušlifuojamos ir difuzijos būdu legiruojamos fosforu. Tokiu būdu išgauto elemento efektyvumas siekia iki 15 procentų.

Monokristalinius fotovoltinius elementus taip pat galima išgauti ir kitu būdu – zoniniu lydimu. Zoninio lydimo metodo metu aukštesnės už lydymosi temperatūros zonos ruožas slenka (3 mm/min) per monokristalinį silicį. Tokiu būdu išgauto elemento efektyvumas gali siekti net iki 20 procentų.

1.3.2. Polikristaliniai silicio fotovoltiniai elementai

Polikristaliniai silicio saulės elementai yra labiausiai paplitę, jie sudaro daugiau nei pusę visų pagaminamų elementų rinkos. Kristalai yra auginami iš daugelio įvairaus dydžio ir formos kristalų mišinio, tokiu būdu išauginamų kristalų skersmuo dažniausiai siekia iki 10 cm. Iš polikristalinio mišinio išauginti monolitiniai kristalai pjaustomi 0,3 mm plokštelėmis. Plokštelės yra legiruojamos fosforu siekiant sudaryti p-n sandūrą. Šiuolaikinių polikristalinių fotoelementų efektyvumas siekia iki 18 procentų.

1.4. Nuostoliai fotovoltiniuose elementuose

Fotovoltinių elementų efektyvumą lemia net tik jų gamybos technologija, bet ir nuostoliai pačiuose elementuose. Pagal prigimtį nuostoliai fotoelementuose yra skirstomi į optinius, rekombinacijos ir nuostolius dėl varžos.

Optiniai nuostoliai atsiranda, kai elektromagnetinės bangos susiduria su fotovoltinio elemento paviršiumi. Fotovoltinis elementas, kuris atspindi elektromagnetinę bangą, praranda šviesos energiją, kurią būtų galėjęs konvertuoti į elektros energiją. Siekiant sumažinti optinius nuostolius, fotovoltinių elementų paviršius yra daromas su nelygumais, mažinamas kontaktų plotas, saulės modulis padengiamas šviesą absorbuojančia plėvele ir ilginamas optinis kelias.

Rekombinacijos nuostoliai atsiranda dėl fotovoltinių elementų paviršiuje arba dėl vykstančių rekombinacijos procesų. Sritis, kurioje įvyksta rekombinacija, vadinama nuskurdintuoju sluoksniu. Įvykę rekombinacijos procesai turi tiesioginę įtaką trumpojo jungimo srovei ir atviros srovės įtampai. Siekiant sumažinti rekombinacijos nuostolius, silicio plokštelėje atsiradę krūvininkai turi būti per difuzijos nuotolį atitolę nuo sandūros. Krūvininkai privalo būti generuojami arčiau p-n, o ne prie vietinės rekombinacijos srities. Vienas pagrindinių rekombinacijos mažinimo būdų yra fotovoltinių paviršių legiravimas. Legiruotame paviršiuje sumažėja nepagrindinių krūvininkų kiekis pusiausvyros sąlygomis, tačiau didinant legiruoto paviršiaus storį proporcingai didėja difuzijos nuostoliai.

Nuostoliai dėl varžos yra galios nuostoliai. Jie atsiranda dėl fotovoltiniame elemente esančios

nuosekliosios ir lygiagrečiosios varžų. Emiterio ir kontaktų tinklo varžos labiausiai lemia nuoseklią varžą. Emiterio varža atsiranda dėl per plačiai išdėstytų elektrodų, tačiau, juos išdėsčius per siaurai, atsiranda atspindžiai. Kontaktinė varža atsiranda srityje, kurioje metalas jungiasi su puslaidininkiu. Kontaktinės varžos srityje papildomai sudaromas n+ sluoksnis, kuris sumažina rekombinacijos ir kontaktinę varžas. Lygiagrečioji varža atsiranda dėl gamyklinių defektų ir nepriklauso nuo elemento struktūros. Lygiagrečioji varža sukelia galios nuostolius, nes defekto vietoje negali tekėti srovė t. y. ji pasirenka šalutinį kelią.

1.5. Fotovoltinių saulės modulių jungimo būdai

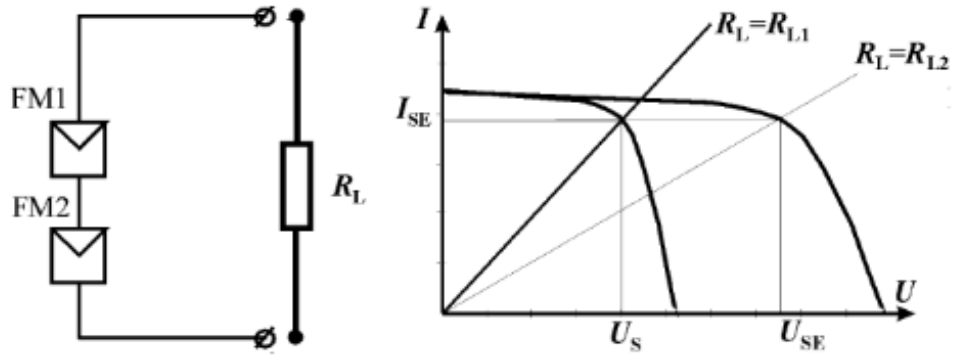
Elektros energijos gamybai praktinėms reikmėms nėra naudojamos fotovoltinės elektrinės, kuriose yra tiesiogiai sujungiami atskiri fotovoltiniai elementai. Dažniausiai yra naudojami pramoniniu būdu pagaminti fotovoltiniai saulės moduliai, sudaryti iš atskirų saulės elementų, kurie yra mechaniškai sujungti į vieną sistemą. Saulės modulio įtampa priklauso nuo nuosekliai sujungtų fotovoltinių elementų kiekio, o srovė – nuo fotovoltinių saulės elementų sujungtų lygiagrečiai. Vardiniai modulių parametrai nustatomi esant standartinėms aplinkos sąlygoms: apšvita ant fotovoltinio saulės modulio paviršiaus – 1000 (W/m²); saulės spinduliuotės spektras, kuris susidaro saulės spinduliams pereinant 1,5 (AM) žemės atmosferos storio oro masę; modulio temperatūra +25°C. Nominalioji galia žymima vatais su indeksu p - W_p (pikine galia). Didesnę negu nominaliąją modulio galią galima gauti sujungiant saulės modulius į masyvą. Modulių masyvai yra jungiami nuosekliai ir lygiagrečiai priklausomai nuo siekiamų parametrų (įtampos ir srovės).

1.5.1. Nuoseklus fotovoltinių saulės modulių jungimas

Įprastai stengiamasi modulius jungti nuosekliai (žr. 1.5.1.1. pav.). Nuosekliai sujungus modulius gaunama didesnė įtampa, taip patiriami mažesni galios nuostoliai kabeliuose dėl varžos. Modulius galima jungti kartu į nuoseklią kilpą tik tuo atveju, jeigu jie veikia vienodomis sąlygomis (apšvita ir temperatūra). Vienodų modulių, sujungtų nuosekliai, įtampa ir srovė apskaičiuojamos:

$$U_{SE} = U_{FVM1} + U_{FVM2} , \quad (1.1)$$

$$I_{SE} = I_{FVM1} = I_{FVM2} \quad (1.2)$$



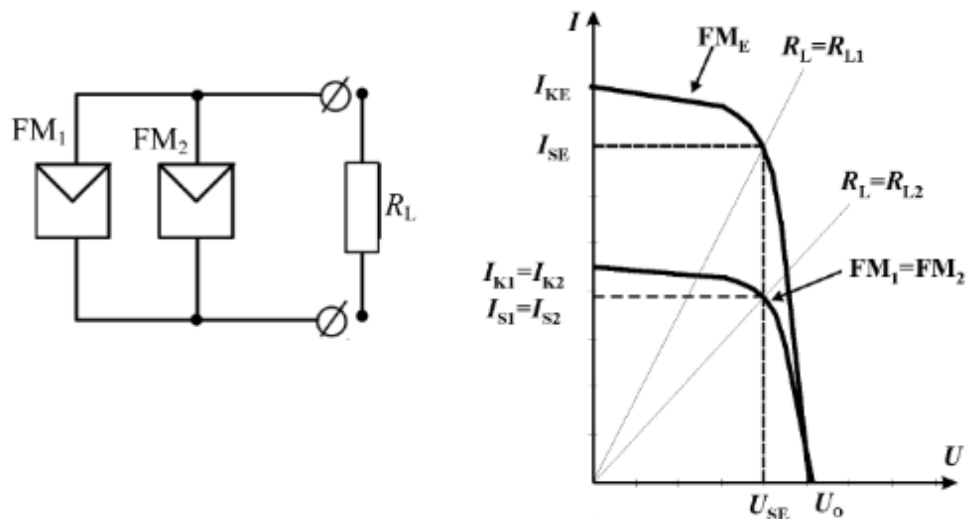
1.5.1.1. pav. Nuosekliai sujungtų fotovoltinių modulių schema ir voltamperinės charakteristikos [1]

1.5.2. Lygiagretus fotovoltinių saulės modulių jungimas

Didelio galingumo saulės moduliai jungiami lygiagrečiai (žr. 1.5.1.2. pav.). Didelio galingumo masyvuose dalis modulių pirmiausia sujungiami nuosekliai, sudarant tam tikras kilpas, kurios vėliau tarpusavyje jungiamos lygiagrečiai, priklausomai nuo norimų įtampos ir srovės parametru. Idealių modulių, sujungtų lygiagrečiai, įtampa ir srovė apskaičiuojama:

$$U_{SE} = U_{FVM1} = U_{FVM2} , \quad (1.3)$$

$$I_{SE} = I_{FVM1} + I_{FVM2} \quad (1.4)$$



1.5.1.2. pav. Lygiagrečiai sujungtų fotovoltinių modulių schema ir voltamperinės charakteristikos

[1]

1.6. Fotovoltinės saulės elektrinės keitiklis

Norint panaudoti fotovoltinę elektros energiją, reikia ją integruoti į bendrą elektros energetikos sistemos tinklą. Sklandžiam integravimui užtikrinti reikalingas tarpinis elementas – fotovoltinės saulės elektrinės keitiklis, arba dar kitaip vadinamas tinklo keitiklis. Pagrindinės tinklo keitiklio funkcijos:

- konvertuoti nuolatinę (DC) fotovoltinių modulių generuojamą srovę ir įtampą į tinklo dažnio kintamąją (AC) srovę ir įtampą;
- keitiklio išėjimo įtampų amplitudes suderinti su tinko įtampų amplitudėmis;
- keitiklio išėjimo įtampos fazes suderinti su tinklo įtampos fazėmis;
- nuolat maksimizuoti fotovoltinės modulių galią priklausomai nuo apšvitos ir temperatūros.

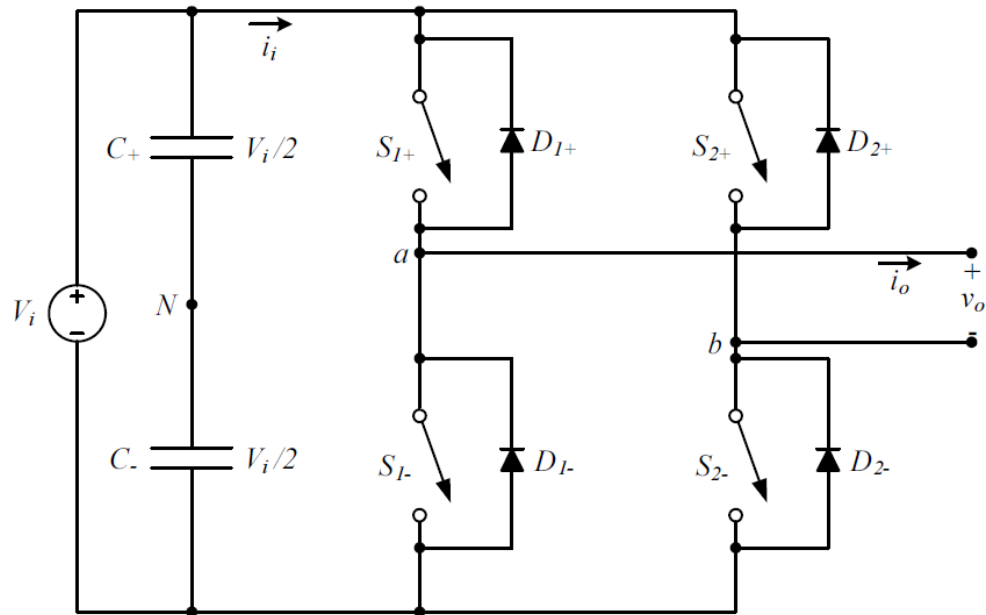
1.6.1. Fotovoltinės saulės elektrinės keitiklio veikimo principas

Pagrindiniai fotovoltinės saulės elektrinės keitiklio komponentai yra: DC/AC srovės konversijos blokas, maksimalaus galios taško sekiklis ir viską kontroliuojantis valdymo blokas. DC/AC keitiklio transformacijos komponentas užtikrina tinkamą nuolatinės srovės transformaciją į kintamąją. Fotovoltinės saulės keitiklio veikimo principas yra labai panašus į kitų galios elektronikos keitiklių (dažnio keitiklių, nepertraukiamo maitinimo šaltinių ir kt.) veikimo principus. Galios elektronikoje keitiklis tiekia kintamą srovę ir įtampą, kurių išėjimo parametrų dydžius (amplitudę, dažnį ir fazę) geba valdyti. Išėjimo parametrams valdyti keitiklyje yra naudojami vadinamieji *raktai*. Galios keitikliai pagal išėjimo įtampos pobūdžio topologiją dar yra skirstomi į įtampos šaltinio keitiklius (valdomos išėjimo įtampos formos) ir srovės šaltinio keitiklius (valdomos išėjimo srovės formos). Nagrinėjamų fotovoltinės saulės elektrinės keitiklių elektros tinklas yra įtampos šaltinis, todėl šie keitikliai veikia kaip įtampos šaltinio keitikliai.

DC/AC konversijos dalį sudaro lygiagrečiai ir nuosekliai tarpusavyje sujungti galios *raktai*, kurie nulemia impulsinę išėjimo įtampą. Įtampa formuojama naudojant tam tikro dydžio moduliaciją. Taip išėjimo normalią įtampos harmoniką papildo ir aukštesnio dažnio harmonikos. Harmonikos kitimą nulemia į raktus teikiamų valdymo impulsų pločio moduliacijos būdas. Fotovoltinių sistemų keitikliuose yra naudojami nešlio dažniu grįšti ir selektyvaus harmonikų šalinimo moduliacijos būdai (Holtz, 1992).

Keitiklio išėjimo signalas yra impulsinio pobūdžio, todėl, norit užtikrinti tolydžiai sinuso dėsnio kintančią išėjimo srovę, apkrova turi būti induktyviojo pobūdžio. Jei apkrova būtų talpinio

pobūdžio, įtampos šaltinio keitiklyje atsirastų srovės šuoliai. Dėl šios priežasties keitiklyje tarp išėjimo ir apkrovos yra sumontuojamas induktyvinis filtras.



1.6.1.1. pav. Vienfazio srovės keitiklio vieno tiltelio schema

Vienfaziuose fotovoltinės saulės elektrinės keitikliuose yra dažniausiai naudojami viso tiltelio įtampos keitikliai. Vienfazio pilno tiltelio topologija/tipologija pateikta 1.6.1.1. paveiksle. Vienas iš pagrindinių reikalavimų šių keitiklių veikimui yra tas, kad abu vieno peties raktai negali būti įjungti vienu metu, nes priešingu atveju įvyktų nuolatinės įtampos šaltinio trumpasis jungimas. Keitiklio veikimas turi būti sudarytas taip, kad to paties peties raktai visuomet dirbtų priešfazėje. Siekiant užtikrinti sklandų keitiklio veikimą yra sudarytos keturios apibrėžtos ir viena neapibrėžta raktų būsenos, kurios pateiktos 1.6.1.1. lentelėje.

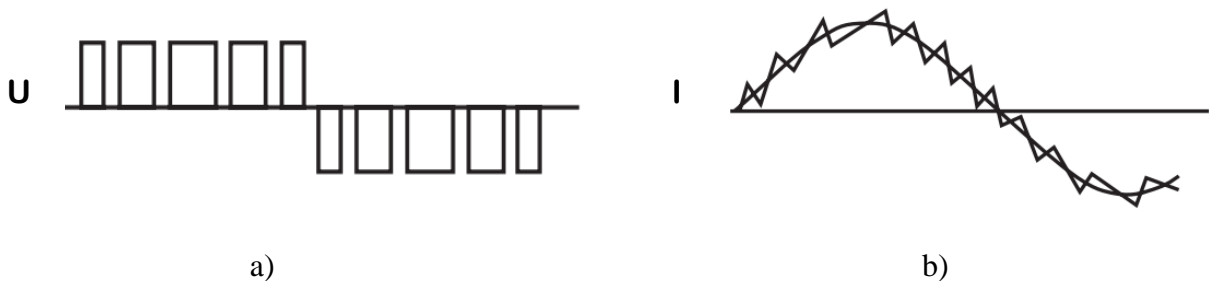
1.6.1.1. lentelė. Viso tiltelio topologijos įtampos šaltinio keitiklio raktų būsenos. [13]

Nr.	Būsena	v_{aN}	v_{bN}	v_o	Veikiantys elementai	
1	S_{1+} ir S_{2-} įjungti, S_{1-} ir S_{2+} išjungti	$v_i/2$	$-v_i/2$	v_i	S_{1+} ir S_{2-} D_{1+} ir D_{2-}	jei $i_o > 0$ jei $i_o < 0$
2	S_{1-} ir S_{2+} įjungti, S_{1+} ir S_{2-} išjungti	$-v_i/2$	$v_i/2$	$-v_i$	D_{1+} ir D_{2+} S_{1-} ir S_{2+}	jei $i_o > 0$ jei $i_o < 0$
3	S_{1+} ir S_{2+} įjungti, S_{1-} ir S_{2-} išjungti	$v_i/2$	$v_i/2$	0	S_{1+} ir D_{2+} D_{1+} ir S_{2+}	jei $i_o > 0$ jei $i_o < 0$

Nr.	Būsena	$v_a N$	$v_b N$	v_o	Veikiantys elementai	
4	S_{1-} ir S_{2-} įjungti, S_{1+} ir S_{2+} išjungti	$-v_i/2$	$-v_i/2$	0	D_{1-} ir S_{2-} S_{1-} ir D_{2-}	jei $i_o > 0$ jei $i_o < 0$
5	S_{1-}, S_{2-}, S_{1+} ir S_{2+} išjungti	$-v_i/2$ $v_i/2$	$v_i/2$ $-v_i/2$	v_i $-v_i$	D_{1-} ir D_{2+} D_{1+} ir D_{2-}	jei $i_o > 0$ jei $i_o < 0$

Neapibrėžta būsena nėra priimtina, nes išėjimo įtampa turi būti determinuota. Siekiant išvengti trumpojo jungimo nuolatinės srovės įtampos šaltinyje ir įtampos neapibrėžtumo, moduliacijos metodus turi užtikrinti, kad kiekvieno laiko momentu tik vienas kiekvieno peties raktas būtų įjungtas.

Konvertavus iš saulės elektrinės generuojamos nuolatinės įtampos ir srovės dydžius gauname keitiklio išėjimo įtampos ir srovės kreives (žr. 1.6.1.2. pav.). Gautos kreivės yra dar prieš keitiklio išėjimo filtrą (žr. 1.6.1.2. (a) pav.), po jo įtampos ir srovės kreivės yra tokios, kaip ir tinklo formos. (žr. 1.6.1.2. (b) pav.)



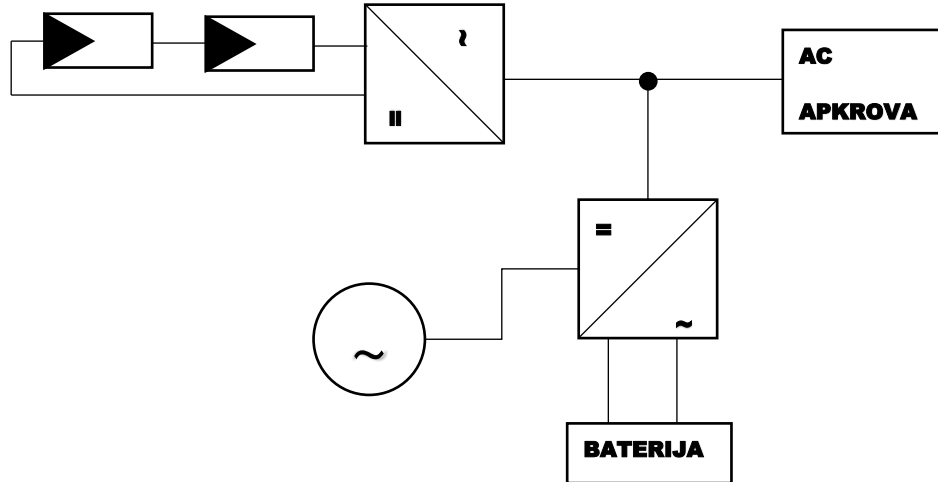
1.6.1.2. pav. Konvertuotos (nefiltruotos) (a) įtampos ir (b) srovės kreivės

1.7. Fotovoltinių saulės keitiklių tipai

1.7.1. Autonominiu režimu veikiantys keitikliai

Autonomiškai veikiantys tinklo keitikliai neturi tiesioginės jungties su skirstomuoju elektros tinklu. Tokio tipo keitiklio valdymo plokštė yra paprastesnė, nes nereikalingi komponentai užtikrinantys sinchronizaciją su tinklu. Autonominis fotovoltinės saulės elektrinės keitiklis nors yra paprastesnis, tačiau sistema sudėtingesnė dėl privalomo rezervinio generatoriaus. Atvejais, kai iš fotovoltinės saulės elektrinės nėra generuojama pakankamai galios arba galia negeneruojama visiškai, turi įsijungti rezervinio tipo generatorius (pvz., kuro celė, dyzelinis generatorius). Fotovoltinės saulės

elektrinės keitiklio darbas turi būti synchronizuotas su rezerviniu generatoriumi, taip užtikrinant srovės tekėjimo kryptį į apkrovas, o ne tarp generatorių. Vienas iš papildomų šių sistemų komponentų yra akumuliatorių baterijos, atliekančios perteklinės energijos saugyklos funkciją.



1.7.1.1. pav. Autonominės fotovoltinės sistemos struktūrinė schema

1.7.2. Tinklo keitikliai

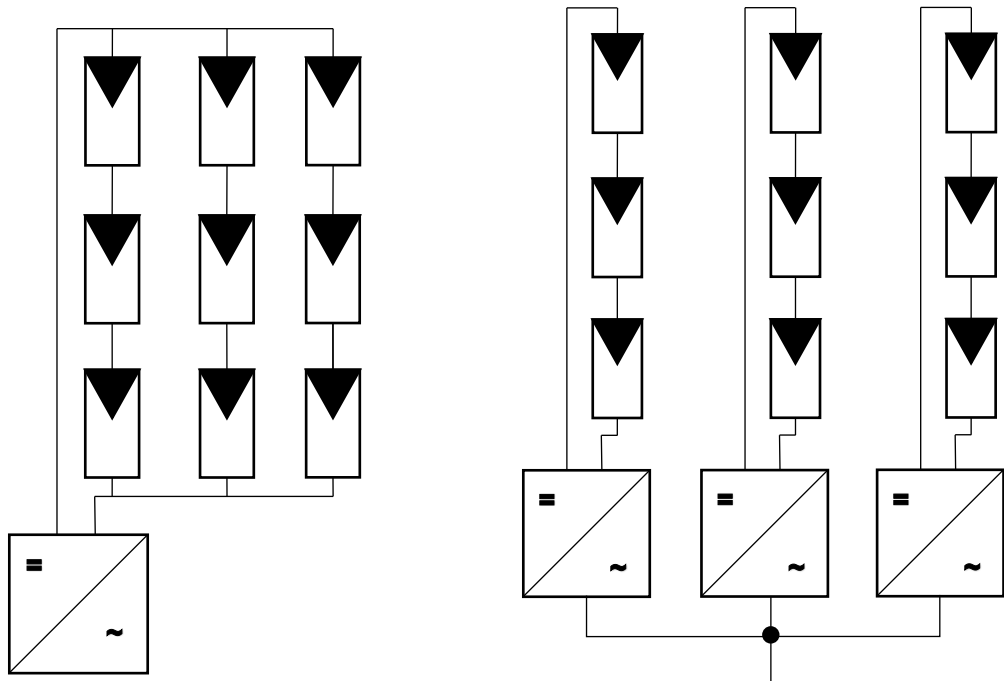
Fotovoltiniai saulės keitikliai, kurie yra jungiami prie tinklo kitaip dar kitaip vadinami tinklo keitikliai. Tinklo keitikliai turi keletą skirtingų topologijų (centriniai keitikliai, serijų keitikliai, mikro-keitikliai, multi-serijiniai keitikliai), tačiau visų šių keitiklių veikimo principas išlieka toks pat.

Centrinių keitiklių topologija pavaizduota 1.7.2.1. (a) paveiksle, šiose sistemose fotovoltiniai saulės moduliai nuosekliai jungiami į kilpas, kurios tarpusavyje jungiamos lygiagrečiai, siekiant gauti reikiamus nominaliuosius keitiklio parametrus (įtampa ir srovė). Tokių sistemų galia paprastai siekia 10 – 1 000 kW, dėl didelės galios šie keitikliai yra trifaziai.

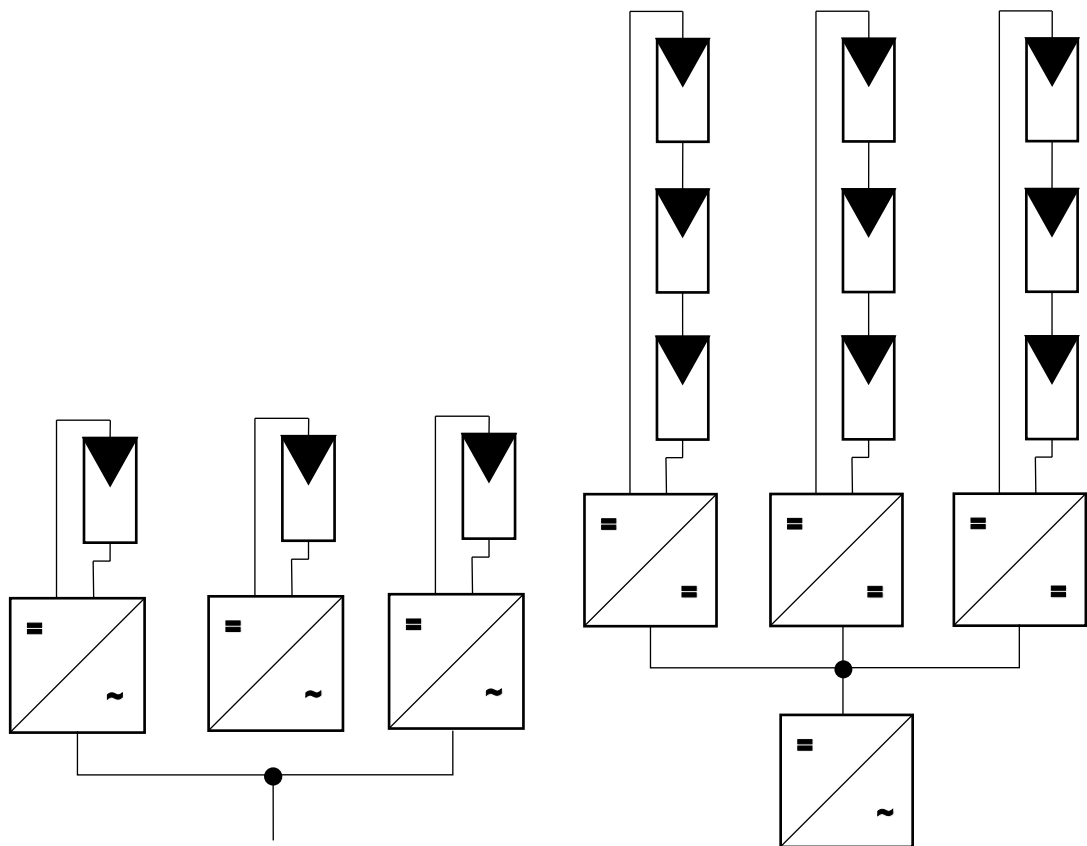
Serijinių keitiklių topologija pavaizduota 1.7.2.1. (b) paveiksle, šie keitikliai yra paremti moduline sistema. Jų galia siekia 0,4–2 kW, čia moduliai nuosekliai jungiami į modulių serijas (kilpas) atskirai prie kiekvieno iš keitiklių. Jeigu sujungus seriją pasiekiamą nominalioji serijinio keitiklio įtampa (320–350 V), nebereikalinga įtampos aukštinimo pakopa ir taip padidinamas efektyvumas. Šių keitiklių serijos jungiamos lygiagrečiai prie skirstomojo tinklo.

Mikro-keitiklių topologija pavaizduota 1.7.2.2. (a) paveiksle. Kiekvienas iš fotovoltinių saulės modulių turi savo nuosavą DC/AC keitiklį. Mikro-keitiklių galia paprastai siekia 50 – 400 W. Vienas

iš pagrindinių šių sistemų privalumų yra tas, jog kiekvienas modulis turi savo maksimalios galios taško sekiklį – tokiu būdu pasiekiamas aukščiausias sistemos efektyvumas.



1.7.2.1. pav. a) centrinių keitiklių topologijos schema; b) serijų keitiklių topologijos schema



1.7.2.2. pav. a) mikro-keitiklių topologijos schema; b) multi-serijų keitiklių topologijos schema

Multi-serijų keitiklių topologija pavaizduota 1.7.2.2. (b) paveiksle, šio tipo keitikliai yra tarpinis variantas tarp serijų ir modulinių keitiklių. Tokių keitiklių galia gali siekti nuo 1,5 - 6 kW. Multi-serijų keitiklio veikimo principas yra pagrįstas atskirų DC/DC keitiklių kiekvieno modulio serijos prijungimu prie vieno pagrindinio DC/AC keitiklio. Taip užtikrinama, kad visos modulių serijos turėtų savo maksimalios galios taško seklikį, ir suteikiama galimybė kiekvienoje serijoje turėti skirtingų charakteristikų fotovoltinius saulės modulius.

1.8. Optimalus fotovoltinių saulės elektrinių keitiklių apkrovimo lygis

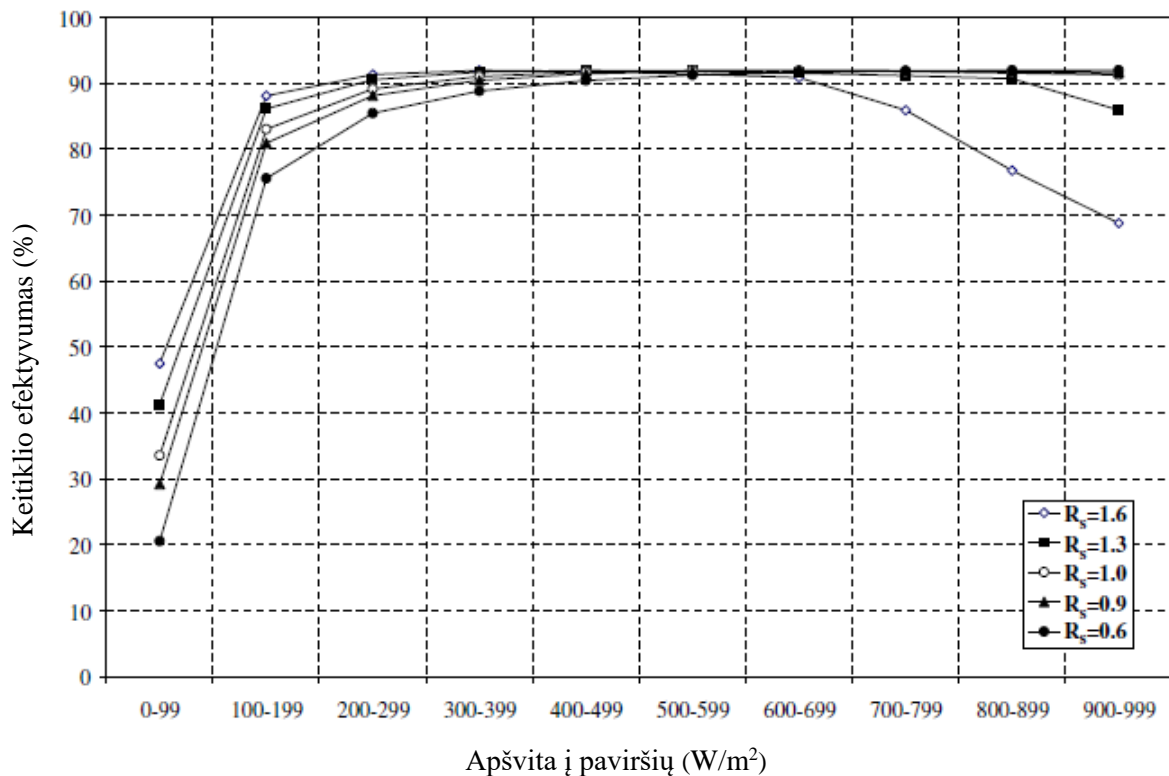
Bendruoju atveju fotovoltinės saulės elektrinės keitiklio apkrovimo lygis yra parenkamas pagal instaliuojamą fotovoltinės saulės elektrinės galią. Tačiau toks parinkimo principas nėra visada teisingas, kadangi pagal atliktus realius matavimus toje pačioje vietovėje ne visada galima išgauti optimalų energijos kiekį iš instaliuotosios galios. Fotovoltinės saulės elektrinės keitiklis yra vienas iš pagrindinių ir daugiausiai kainuojančių atskirų šios sistemos elementų, būtina įvertinti optimalų keitiklio apkrovimo lygį įtakojančius parametrus: fotovoltinių saulės modulių orientaciją, fotovoltinių modulių posvyrio kampą, fotovoltinių saulės modulių technologiją.

Atliekant optimalaus fotovoltinės saulės elektrinės keitiklio lygio apkrovimo vertinimą, vienas iš pagrindinių veiksnių yra tiksliai nustatyti būsimą fotovoltinės saulės elektrinės lokaciją. Pagal numatomą būsimą fotovoltinės saulės elektrinės lokaciją galima sužinoti tikslius daugiamečių matavimų apšvitos duomenis, vidutinę aplinkos temperatūrą bei vėjo greitį.

Siekiant įvertinti tokio tipo investicijos ekonominę naudą, jos atsiperkamumą ir pagrįstumą, reikia papildomai įvertinti elektros kainą, kurią vartotojas moka už elektros energiją, fotovoltinės saulės elektrinės įrangos kainą ir įrengimo kaštus.

Visos fotovoltinės saulės elektrinės našumas priklauso nuo tinkamai parinkto tinklo keitiklio apkrovimo lygio. Fotovoltinei saulės modulių sistemai parinkus nepakankamo arba per didelio dydžio keitiklį, tai tiesiogiai lemia sumažėjusį pagaminamos elektros energijos kiekį arba kitaip išaugusius gamybos nuostolius. Vertinant tokią sistemą būtina atsižvelgti ne tik į bendrą tinklo keitiklio efektyvumą, tačiau ir jo efektyvumą esant daliniam apkrovimui. Keitiklio dydis turi būti parinktas siekiant minimizuoti tiek visos sistemos kaštus, tiek energijos nuostolius keitiklyje. Įeinanti keitiklio galia turi būti pakankamai maža, kad pasiekus nominalų apkrovimą keitiklis dirbtų efektyviausiame taške, ir ne per didelė tais atvejais, kai išauga keitiklio nuostoliai perkrovimo laikotarpiu.

Vidutinio fotovoltinės saulės elektrinės keitiklio efektyvumas buvo nustatytas (Jayanta Deb Mondol ir kt.) keičiant keitiklio apkrovimo lygį ir apšvitą. Tyrimo rezultatai pateikti 1.8.1. paveiksle. Fotovoltinės saulės elektrinės posvyrio kampas yra lygus 45° , orientacija yra lygiai pietų kryptimi (0° laipsnių). Šiuo tyrimu nustatyta, kad keitiklio efektyvumas yra tiesiogiai proporcingas apkrovimo lygiui R_s iki kol pasiekama apšvitos vertė 200 W/m^2 . Esant prastam apšvietimui, elektros energijos generacija yra maža ir keitiklis veikia dalinio apkrovimo sąlygomis. Tokiais atvejais mažai apkrautas keitiklis yra tinkamesnis dėl mažesnių *savo* elektros energijos sąnaudų. Keitiklio efektyvumas išauga nuo 82 % iki 89 % (apšvita pasikeitus nuo 100 iki 200 W/m^2) ir nuo 89 % iki 91 % (apšvita pakitus nuo 200 iki 300 W/m^2), tačiau efektyvumas drastiškai sumažėja nuo 91 % iki 69 % (apšvita pakitus nuo 900–1 000 W/m^2) apkrovimo lygiui išaugus nuo 1 iki 1.7 karto.



1.8.1 pav. Vidutinio keitiklio efektyvumo priklausomybė nuo keitiklio perkrovos lygio ir apšvitos

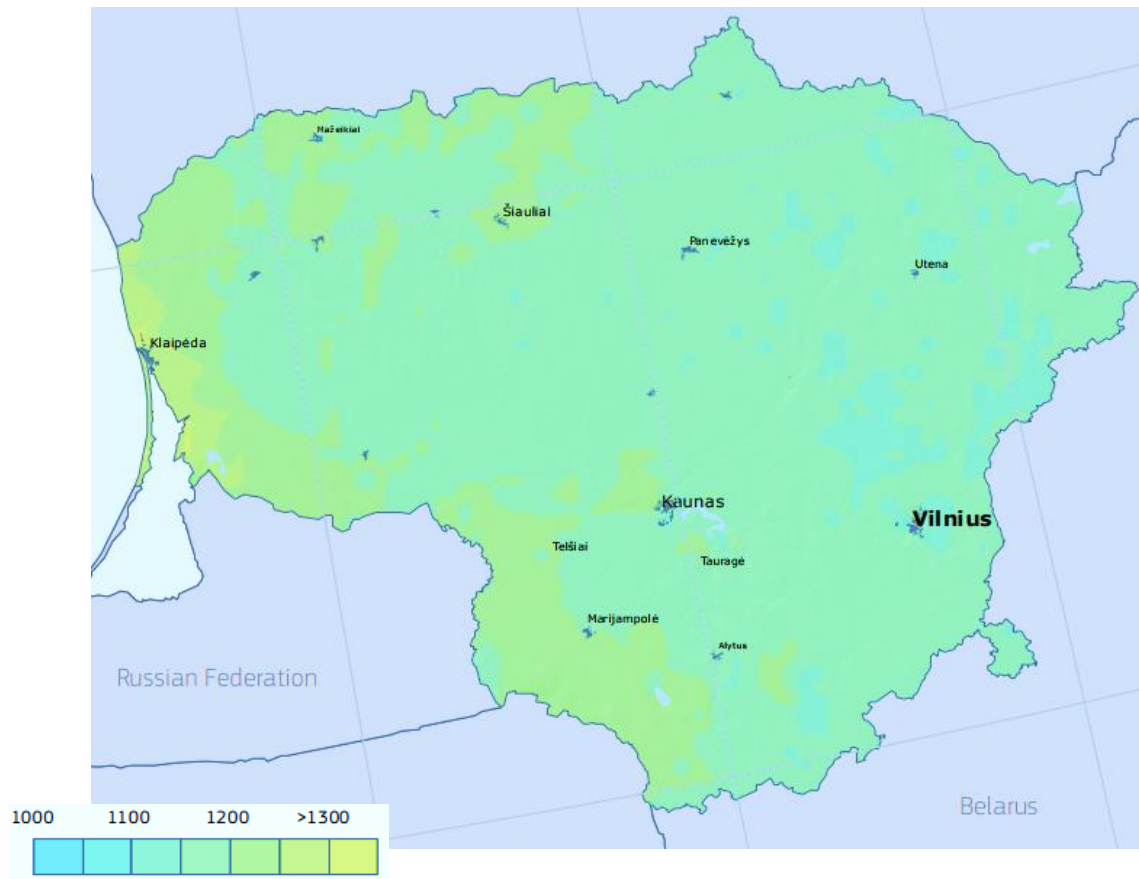
[6]

1.8.1. Fotovoltinės saulės elektrinės geografinė padėtis

Vienas pagrindinių faktorių, lemiančių fotovoltinės saulės keitiklio pasirinkimą, yra geografinė saulės elektrinės padėtis. Geografinė padėtis tiesiogiai veikia būsimą elektros energijos

gamybą, nes vidutinė metinė apšvita priklauso nuo fotovoltinės saulės elektrinės lokacijos. Geografinėje vietoje vyraujančią apšvitą lemia teritorijos padėtis žemėje (ilguma ir platumą), vyraujantys oro masių ciklai ir juos lemianti žemynų ir vandenynų padėtis bei reljefo aukštis.

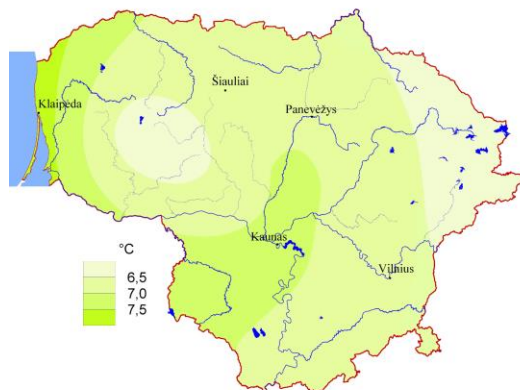
Lietuvos vidutinės metinės apšvitos žemėlapis pateiktas 1.8.1.1. paveiksle. Šalis geografiniu požiūriu nėra didelė lyginant su kitomis valstybėmis, tačiau čia vyrauja gana ryškūs kontrastai – vidutinės metinės apšvitos vertės svyruoja net 30 proc. Šalies vakaruose vyrauja mažas debesuotumas, kas lemia didelį metinį apšvitos kiekį. Vidutinis metinis šalies apšvitos kiekis tolygiai keičiasi vakarų link ir pasiekia žemiausias vertes rytuose.



1.8.1.1. pav. Vidutinė metinė saulės apšvita Lietuvoje W/m^2 [9]

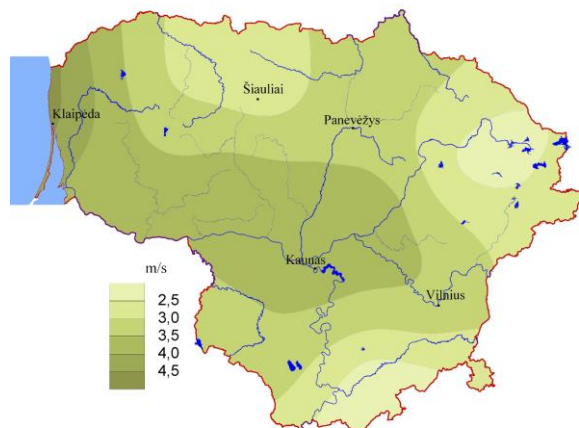
Kitas svarbus vietovės parametras, nuo kurio taip pat priklauso bendra gamyba, yra aplinkos temperatūra. Aplinkos temperatūra daro tiesioginę įtaką elektros energijos gamybai, nes fotovoltinio elemento našumas yra atvirkščiai proporcingas temperatūrai. Didėjant fotovoltinio elemento temperatūrai fotovoltinio elemento našumas krenta ir atvirkščiai. Fotovoltinio saulės modulio įtaką našumui temperatūros pokyčiams apibūdina temperatūrinis tuščios veikos įtampos koeficientas.

Atlikus ilgamečius matavimus Lietuvoje buvo nustatyta, kad šalies teritorijoje temperatūra pasiskirsto netolygiai. Šalies vidutinės temperatūros pasiskirstymas pavaizduotas 1.8.1.2. paveiksle. Iš paveikslo galima matyti, kad mažiausia vidutinė aplinkos yra šalies rytuose ir slenkant vakarų kryptimi laipsniškai didėja. Vertinant vien tik aplinkos temperatūrą, palankiausios sąlygos saulės elektrinės sistemos statybai yra šalies vakarai.



1.8.1.2. pav. Vidutinė metinė oro temperatūra Lietuvoje (pagal 1981–2010 m. atliktų matavimų duomenis) [14]

Norint tiksliai nustatyti fotovoltinio saulės modulio temperatūrą, neužtenka vien tik žinoti vietovės apšvitą ir aplinkos temperatūrą. Faktinė oro temperatūra dėl vėjo greičio dažnu atveju gali skirtis nuo jutiminės (tikrosios) temperatūros. Vėjas aptekėdamas kūną, šiuo atveju fotovoltinį saulės modulį, dalį energijos (temperatūros) nusineša su savimi. Siekiant užtikrinti tikslius rezultatus turi būti įvertinta vėjo įtaka t. y. vėjo greitis ir kryptis. Vidutinis vėjo greičių pasiskirstymas pagal ilgamečių matavimų duomenis pateiktas 1.8.1.3. paveiksle. Didžiausias vėjo greitis vyrauja pajūryje (Klaipėdos regione) ir tolygiai mažėja slenkant iš vakarų link rytų.



1.8.1.3. pav. Vidutinis metinis vėjo greitis Lietuvoje (pagal 1981–2010 m. atliktų matavimų duomenis) [15]

1.8.2. Fotovoltinių saulės modulių posvyrio kampas

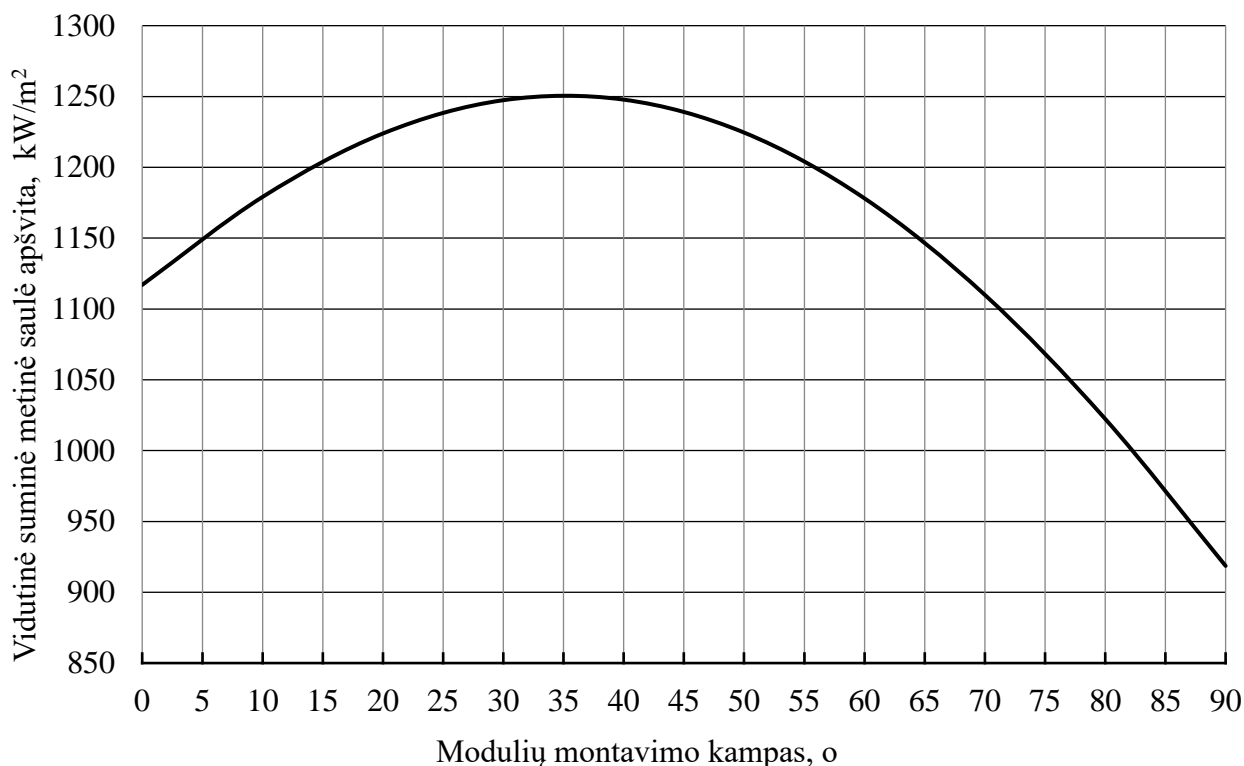
Fotovoltinio saulės modulio posvyrio kampas – tai kampas tarp konkrečioje vietovėje iškelto statmens (horizontalo) ir plokštumos posvyrio dangaus atžvilgiu. Fotovoltinių saulės modulių montavimo kampas yra vienas iš svarbiausių parametru, lemiančių suminės apšvitos kiekį, krintantį į plokštumą. Parinktas optimalus modulių montavimo kampas užtikrina, kad pakreiptą plokštumą per metus pasieks maksimalus tiesioginių saulės spindulių kiekis, o tai reiškia - bus pagaminta daugiausiai elektros energijos.

Optimalų modulių kampą lemia vietovės geografinė padėtis. Žemė saulės atžvilgiu yra pasvirusi 23,5 laipsnio, todėl suminė metinė apšvita žemėje yra pasiskirsčiusi netolygiai. Atliktais tyrimais nustatyta, kad optimalų modulių kampą labiausiai lemia vietovės platumas.

Parinktas optimalus fotovoltinių saulės modulių montavimo kampas iš pasirinktos vietovės leidžia išgauti maksimalią naudą. Vietovėje optimalų posvyrio kampą galima nustatyti tik atlikus ilgamečių apšvitos tyrimų duomenų analizę. Optimalaus modulių montavimo kampo nustatymo algoritmas:

- išmatuojama apšvita vietovėje, pasikliautinas matavimų diapazonas neturi būti trumpesnis ir senesnis nei paskutiniai dešimt metų;
- matavimų vertės perskaičiuojamos kiekvienu atveju, priklausomai nuo modulių montavimo kampo;
- apskaičiuojama metinė suminė apšvita vietovėje, kiekvienu atveju keičiant posvyrio kampą nuo 0 iki 90 laipsnių;
- perskaičiuotos metinės apšvitos (į pakreiptą paviršių) vertės atvaizduojamos diagramoje keičiant apšvitos kampą;
- iš diagramos nustatoma didžiausia suminė metinė apšvitos vertė;
- optimalus fiksuotas modulių montavimo kampas yra tas, ties kuriuo gaunama maksimali suminė metinė apšvitos vertė.

Iš nubraižytos priklausomybės (žr. 1.8.2.1. pav.) galima nustatyti optimalų stacionariai montuojamų fotovoltinių saulės modulių kampą. Didžiausia suminė metinė apšvitos vertė į pakreiptą paviršių gaunama tada, kai modulių montavimo kampas yra 35,5° nuo horizontalo.



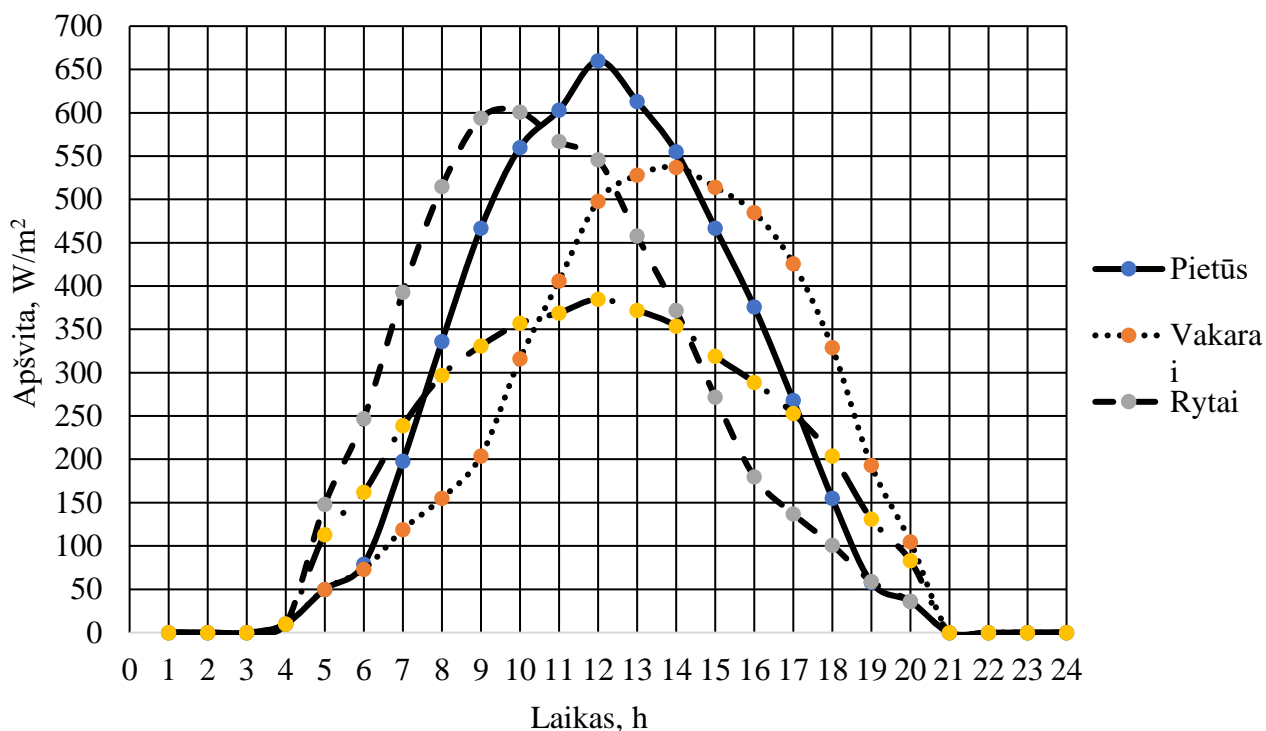
1.8.2.1. pav. Suminė metinė saulės apšvitos priklausomybė nuo modulių posvyrio kampo Lietuvoje

Priklausomai nuo pasirinkto (arba įmanomo) modulių montavimo kampo reikia įvertinti keitiklio apkrovimo lygį. Iš pateiktos priklausomybės galima susidaryti bendrą vaizdą apie modulio montavimo kampo įtaką sistemos perkrovimo dydžiui: palyginus 0 ir 15 laipsnių montavimo kampus, suminis metinis apšvitos kiekis skiriasi net 10 proc. Bendruoju atveju, vertinant tik modulių montavimo kampą, būtų galima parinkti mažesnę keitiklio apkrovimo lygį nepatiriant gamybos nuostolių dėl galios ribojimo.

1.8.3. Fotovoltinių saulės modulių orientacija

Fotovoltinių saulės modulių orientacija erdvėje (azimutas) tiesiogiai lemia, koks apšvitos kiekis per metus pasieks modulių paviršių. Didžiausias apšvitos kiekis pasiekia saulės modulius sumontuotus pietine kryptimi, mažiausias – šiaurine kryptimi. Kitais atvejais, kai fotovoltiniai moduliai nėra nukreipti pietų kryptimi, reikia papildomo vertinimo.

Priklausomai nuo vietovės, kurioje montuojami saulės moduliai, metinė apšvita krintanti į paviršių orientuotą erdvėje gali kisti nevienodai ir asimetriškai rytų-vakarų kryptimis.

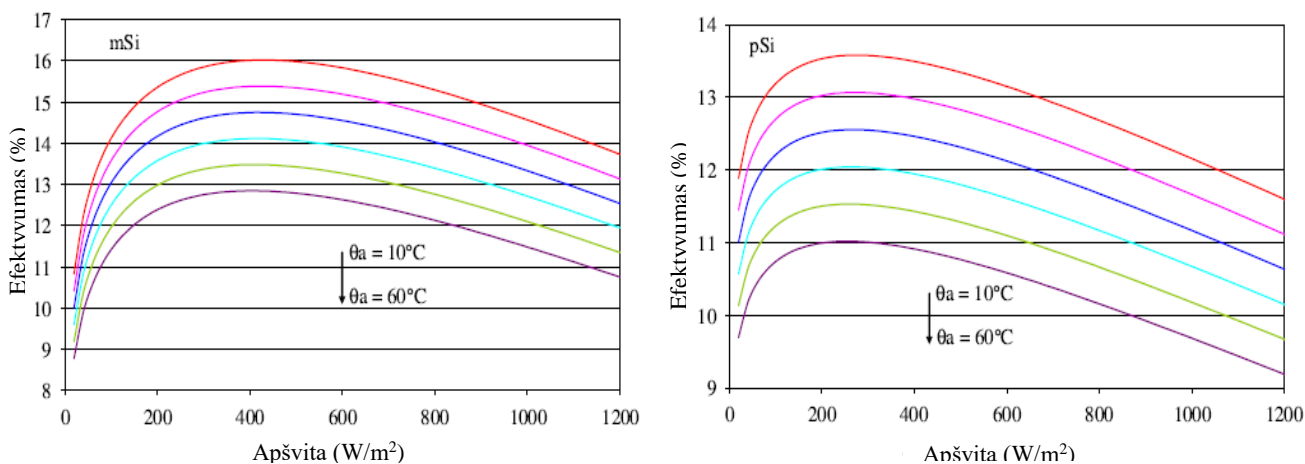


1.8.2.2. pav. Vienos tipinės vasaros paros apšvitos priklausomybė nuo modulių orientacijos

1.8.2.2. paveiksle pateiktos priklausomybės, kai tuo pačiu kampu (35 laipsnių) sumontuotos keturios plokštumos, nukreiptos skirtingomis kryptimis: pietų, rytų, vakarų ir šiaurės. Atlikus vienos paros duomenų analizę, galima nustatyti, kokią įtaką modulių orientacija turi bendrai gamybai. Didžiausias apšvitos kiekis pasiekė plokštumą orientuotą pietų kryptimi, mažiausią – šiaurės. Neįprasčiausias priklausomybės yra rytų ir vakarų kryptimis, jos yra nesimetriškos ir skirtingų pikinių dydžių. Neįprastas modulių orientacijos kampas, turi mažesnę amplitudę ir priklausomai nuo vietovės, neįprastą metinį apšvitos grafiką.

1.8.4. Fotovoltinių saulės modulių technologija

Fotovoltinių modulių technologija taip pat turi nemažai įtakos parenkant optimalų keitiklio lygį. Skirtingos modulių gamybos technologijos lemia ir skirtingus modulių techninius parametrus – temperatūrinį trumpojo jungimo srovės koeficientą, temperatūrinį tuščios veikos įtampos koeficientą, kas daro tiesioginę įtaką galios temperatūriniam koeficientui.



a) monokristalinis silicio fotovoltinis elementas; b) polikristalinis silicio fotovoltinis elementas;

1.8.4.1. pav. Fotovoltinių saulės elementų efektyvumo kreivės, kai kinta jų temperatūra ir krentantis tiesioginis apšvitos kiekis [8]

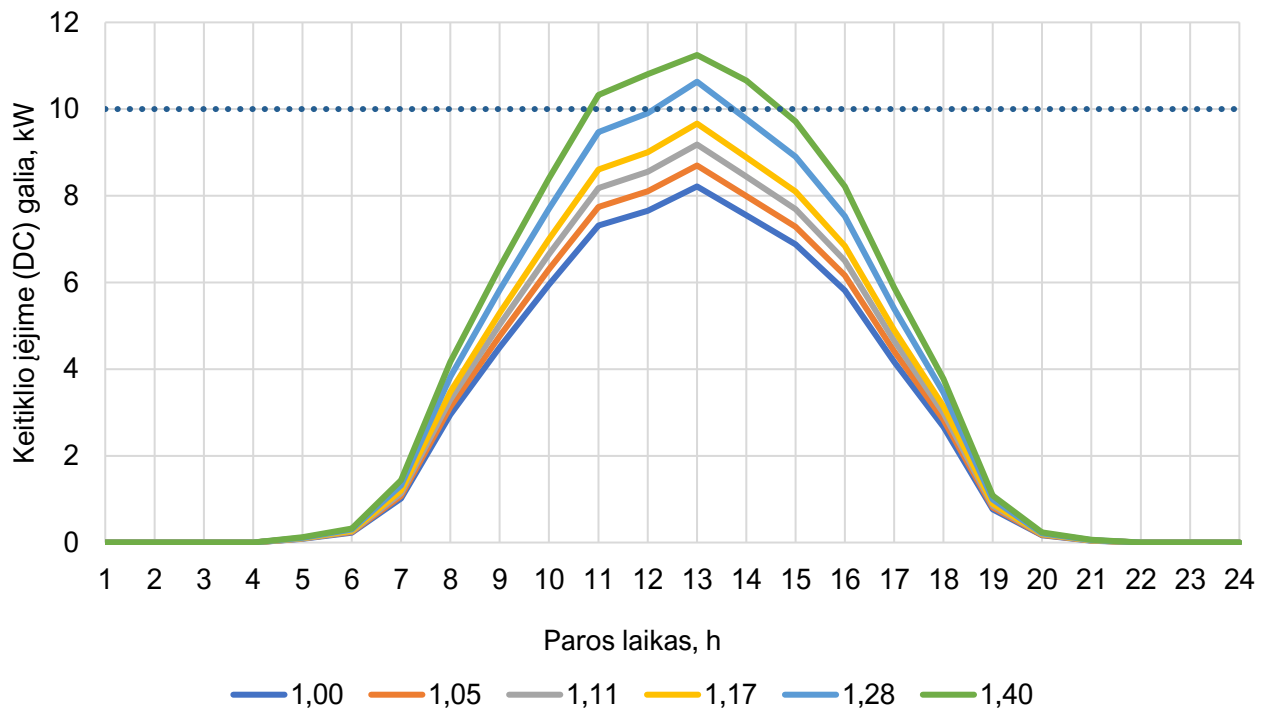
Atlikus skirtingų fotovoltinių saulės elementų tyrimus, nustatytos priklausomybių kreivės, kai kinta aplinkos temperatūra ir apšvita. Monokristalinių silicio pagrindu pagamintų fotovoltinių saulės elementų (mSi) efektyvumas yra didžiausias tuo atveju, kai apšvitos vertė artima 400–500 W/m². Polikristalinių silicio pagrindu pagamintų fotovoltinių saulės elementų (pSi) didžiausias efektyvumas yra pasiekiamas tuo atveju, kai krintanti apšvita artima 200 W/m². Šių modulių efektyvumas keičiantis temperatūrai taip pat yra nevienodas – monokristaliniai fotoelementai gali išlaikyti didesnę efektyvumą didėjant celių temperatūrai Θ_a lyginant su polikristaliniais fotoelementais, kurių efektyvumas krinta sparčiau.

1.8.5. Optimalaus keitiklio apkrovimo lygio nustatymas įvertinant įvairius parametrus

Įvairūs parametrai nustatyti skyriuose (1.8.1-1.8.4) tiesiogiai įtakoja fotovoltinės saulės elektrinės generacijos našumą. Optimalų keitiklio apkrovimo lygį galima nustatyti, tik kompleksiskai įvertinant visų jo gamybą įtakančių parametru įtaką.

Paveiksle 1.8.5.1. pateikta vienos tipinės paros priklausomybė, kurioje yra matomas DC įtampos perkrovimo lygio įtaka generacijai. Didžiausia generaciją būtų galima pasiekti apkrovus keitiklį 1,4 karto didesne galia už nominalią, tačiau DC pusėje generacijai viršijus 10 kW dydį ši galia bus ribojama (apkarpoma). Nustatant maksimalią gautą galia iš instaliuotosios galios reikia palyginti, kokia yra išėjimo (AC) galia kiekvieno keitiklio apkrovimo lygiu nuo 1 iki 1,4.

Tiksliam sistemos apkrovimo lygio nustatymui, reikia neužtenka įvertinti tik vienos paros priklausomybės. Optimaliam keitiklio lygio nustatymui reikalinga visų metų valandinis vertinimas, iš jo nustatytas didžiausios galios dydis ir bus DC/AC sistemos optimalus apkrovimo lygis.



1.8.5.1. pav. Vienos tipinės paros keitiklio generacijos priklausomybė nuo paros laiko, kai yra kintamas apkrovimo lygis

2. TYRIMO METODIKA

Fotovoltinės saulės elektrinės keitiklio optimalaus apkrovimo lygio tyrimui numatyta sudaryti matematinį modelį. Modelio veikimo principas yra pagrįstas saulės elektrinės darbo imitacija, remiantis tikrais ilgametės stebėsenos parametrų duomenimis konkrečioje vietovėje. Bendras modelis sudaromas iš kiekvieną iš komponentų aprašančių atskirų *tarpinių* matematinių modelių: apšvitos į pakreiptą plokštumą matematinio modelio dalies, fotovoltinio saulės modulio matematinio modelio dalies ir fotovoltinio saulės elektrinės keitiklio matematinio modelio dalies.

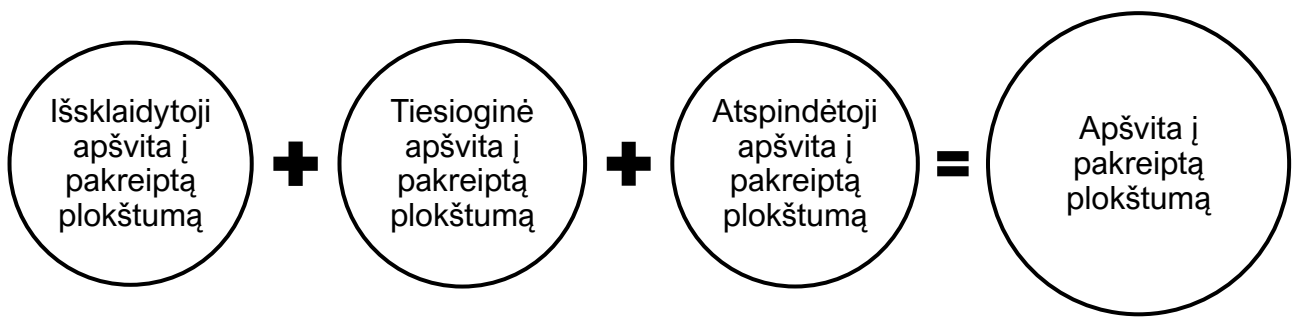
Ilgamečių stebėjimų duomenys, naudojami saulės elektrinės imitacijos darbui, yra bendroji apšvita, aplinkos temperatūra, vėjo greitis bei kryptis.

Vykdam tyrimą atlikti keli supaprastinimai, leidžiantys paprasčiau atlikti analizę:

- ilgamečių apšvitos matavimų duomenys yra atlikti vienos valandos tikslumu;
- kiekvieną fotovoltinį modulį aplinkos parametrai veikia vienodai, moduliai yra išdėstyti vienoje plokštumoje – nėra šešėliavimų nuo aplinkos objektų ir pačių modulių;
- visais laiko momentais saulės modulių paviršius yra švarus – nėra vertinama dulkių ir sniego įtaka;
- fotovoltinių modulių aplinka viso tyrimo metu išlieka pastovi, atspindžio koeficientas – konstanta;
- fotovoltinių saulės modulių degradacija yra tiesinė;
- aplinkos sąlygos (oro temperatūra, laikymo sąlygos) neveikia fotovoltinio keitiklio efektyvumo;
- visa pagaminta elektros energija saulės elektrinėje yra suvartojama iš karto t. y. nepriklausomai nuo paros laiko vartotojo tinklas visais laiko momentais veikia be gedimų ir atsijungimų, tinklo įtampa ir dažnis išlieka pastovūs.

2.1. Apšvitos į pakreiptą plokštumą matematinis saulės modelis

Viena pagrindinių fotovoltinės elektrinės modelio dalių – apšvitos į pakreiptą paviršių modelio dalis. Modelis sudaromas, nes realių matavimų duomenys yra gauti matuojant tik bendrąją apšvitą į horizontalų paviršių. Matavimų duomenys turi būti perskaičiuoti atsižvelgiant į vietovės parametrus (ilgumą ir platumą), pagal tai sudaromas matematinis modelis apskaičiuoti apšvitai, krentančiai į pakreiptą paviršių.



2.1.1. pav. Apšvitos į pakreiptą plokštumą sudedamosios dalys

Apšvitą į pakreiptą plokštumą sudaro trys pagrindiniai elementai, kurie turi būti perskaičiuoti iš realių matavimų į modeliuojamą atvejį. Apšvitos skaičiavimo į pakreiptą paviršių algoritmą sudaro keleto matematinių modelių derinys: saulės pozicijos modelio ir modelio, aprašančio apšvitos kiekį, krentantį į pakreiptą plokštumą.

2.1.1. Saulės pozicija

Saulės pozicija konkrečioje vietovėje nustatoma naudojantis matematiniu modeliu – SPA, kurį sukūrė (I. Reda ir A. Andreas, 2008 m.). Algoritmo paklaida siekia $\pm 0,0003$ laipsnio, skaičiuojant laiko periodu nuo -2000 iki 6000 metų. Algoritmą sudaro vienas po kito sekančių matematinių lygčių skaičiavimas.

Pirmasis šio algoritmo žingsnis – laiko perskaičiavimas pagal Julijaus kalendorių. Julijaus kalendorius prasideda sausio 1d., -4712 metais, 12 valandą VL (visuotiniu laiku). Julijaus diena (JD) yra apskaičiuojama pagal visuotinį laiką:

$$JD = INT(365,25 \cdot (Y + 4716)) + INT(30,6001 \cdot (M + 1)) + D - 1524,5, \quad (2.1)$$

čia: INT – apskaičiuotos reikšmės sveikasis skaičius; Y – metai; M – mėnesis (skaičiavimuose esant mėnesio reikšmei $M > 2$, Y ir M nėra keičiami, tačiau jeigu $M = 1$ arba 2 , tada $Y = Y - 1$ ir $M = M + 12$); D – mėnesio diena atvaizduota dešimtaine išraiška.

Julijaus Efemerido diena apskaičiuojama:

$$JED = JD + \frac{\Delta T}{86400}, \quad (2.2)$$

Julijaus šimtmetis (JC) ir Julijaus Efemerido šimtmetis (JEC) apskaičiuojamas:

$$JC = \frac{JD - 2451545}{36525}, \quad (2.3)$$

$$JEC = \frac{JDE - 2451545}{36525}, \quad (2.4)$$

Julijaus Efemerido tūkstantmetis (JEM) apskaičiuojamas:

$$JME = \frac{JCE}{10}, \quad (2.5)$$

Antrasis algoritmo žingsnis – Žemės heliocentrinės ilgumos, platumos ir spinduliavimo vektoriaus skaičiavimas. Heliocentrinė pozicija reiškia, kad žemės padėtis skaičiuojama saulės atžvilgiu.

Platuma apskaičiuojama:

$$L0_i = A \cdot \cos(B_i + C_i \cdot JME), \quad (2.6)$$

čia: i – i -tasis eilutės numeris iš literatūroje [25] pateiktos lentelės Nr. 4.2 [25]; A_i , B_i , C_i yra vertės literatūroje [25] pateiktoje lentelėje Nr. 4.2.

Ilgumos reikšmė $L0$ (radianais) apskaičiuojama:

$$L0 = \sum_{i=0}^n L0_i, \quad (2.6)$$

čia: n – eilučių skaičius lentelės Nr. 4.2 [25].

Žemės heliocentrinė ilguma (radianais) apskaičiuojama:

$$L = \frac{L0 + L1 \cdot JME + L2 \cdot JME^2 + L3 \cdot JME^3 + L4 \cdot JME^4 + L5 \cdot JME^5}{10^8}, \quad (2.7)$$

Žemės heliocentrinė ilguma (laipsniais) apskaičiuojama:

$$L = \frac{L \cdot 180}{\pi}, \quad (2.8)$$

Ilguma ir platuma apskaičiuojama geocentrinės pozicijos atžvilgiu. Geocentrinė pozicija reiškia, kad saulės pozicija yra skaičiuojama Žemės atžvilgiu.

Platuma geocentrinės pozicijos atžvilgiu (laipsniais) apskaičiuojama:

$$\theta = L + 180, \quad (2.9)$$

Ilguma geocentrinės pozicijos atžvilgiu (laipsniais) apskaičiuojama:

$$\beta = -B, \quad (2.10)$$

Trečiasis algoritmo žingsnis yra nutacijos įtakos ilgumai ir Žemės posvyrio kampui apskaičiavimas. Nutacija tai maži, periodiniai precesuojančio kūno (Žemės) sukimosi ašies svyravimai apie jos vidutinę padėtį.

Vidutinis mėnulio nuo saulės nuokrypis (laipsniais) apskaičiuojamas:

$$X_0 = 297,85036 + 445267,111480 \cdot JCE - 0,0019142 \cdot JCE^2 + \frac{JCE^3}{189474}, \quad (2.11)$$

Vidutinė saulės anomalija (Žemės), X_1 (laipsniais) apskaičiuojama:

$$X_1 = 357,52772 + 35999,050340 \cdot JCE - 0,0001603 \cdot JCE^2 - \frac{JCE^3}{300000}, \quad (2.12)$$

Vidutinė mėnulio anomalija X_2 (laipsniais) apskaičiuojama:

$$X_2 = 134,96298 + 477198,867398 \cdot JCE + 0,0086972 \cdot JCE^2 - \frac{JCE^3}{56250}, \quad (2.13)$$

Mėnulio nepriklausomas kintamasis dydis X_3 įtakojančias ilgumą (laipsniais) apskaičiuojamas:

$$X_3 = 93,27191 + 477198,867398 \cdot JCE - 0,0036825 \cdot JCE^2 + \frac{JCE^3}{327270}, \quad (2.14)$$

Ilgumos augantis mazginis taškas X_4 (laipsniais) priklausantis nuo vidutinės Mėnulio orbitos ekliptikos, matuojant nuo vidutinės lygiadienio datos, apskaičiuojamas:

$$X_4 = 125,04452 - 1934,136261 \cdot JCE - 0,0020708 \cdot JCE^2 + \frac{JCE^3}{450000}, \quad (2.15)$$

Remiantis literatūroje [25] pateikta lentelė Nr. 4.3 kiekvienos eilutės ilgumos nuokrypio ($\Delta\psi_i$) ir Žemės ašies nuokrypio ($\Delta\varepsilon_i$) reikšmės apskaičiuojamos:

$$\Delta\psi_i = (a_i + b_i \cdot JCE) \cdot \sin\left(\sum_{j=0}^4 X_j \cdot Y_{i,j}\right), \quad (2.16)$$

$$\Delta\varepsilon_i = (c_i + d_i \cdot JCE) \cdot \cos\left(\sum_{j=0}^4 X_j \cdot Y_{i,j}\right), \quad (2.17)$$

čia: a_i, b_i, c_i, d_i – koeficientai iš lentelės Nr. 4.3 [25] i-tosios eilutės ir atitinkamai a, b, c, d stulpelių; X_j – j-tasis dydis apskaičiuotas pagal išraiškas (2.11 – 2.15); Y_j – dydis iš lentelės Nr. xx i-tosios eilutės ir j-tojo stulpelio.

Ilgumos nutacija (laipsniais) apskaičiuojama:

$$\Delta\psi = \frac{\sum_{i=0}^n \Delta\psi_i}{36000000}, \quad (2.18)$$

Žemės ašies nutacija (laipsniais) apskaičiuojama:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\sum_{i=0}^n \Delta\varepsilon_i}{36000000}, \quad (2.19)$$

Ketvirtasis algoritmo žingsnis – tikrosios Žemės ašies ekliptikos skaičiavimas.

Vidutinė Žemės ašies ekliptika apskaičiuojama (ark sekundėmis):

$$\begin{aligned} \varepsilon_0 = & 84381,448 - 3680,93 \cdot U - 1,55 \cdot U^2 + 1999,25 \cdot U^3 - 51,38 \cdot U^4 \\ & - 249,67 \cdot U^5 - 39,05 \cdot U^6 + 7,12 \cdot U^7 + 27,87 \cdot U^8 + 5,79 \cdot U^9 + 2,45 \cdot U^{10} \end{aligned} \quad (2.20)$$

čia: U – dydžio JME/10 reikšmė.

Tikroji Žemės ašies ekliptika apskaičiuojama (laipsniais):

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_0}{3600} + \Delta\varepsilon, \quad (2.21)$$

Penktasis žingsnis – aberacijos korekcijos skaičiavimas. Aberacija – regimojo dangaus šviesulio padėties poslinkis dėl stebėtojo judėjimo.

Aberacijos koregacija (laipsniais) apskaičiuojama:

$$\Delta\tau = -\frac{20,4898}{3600 \cdot R'} \quad (2.22)$$

Šeštasis žingsnis – tikrosios saulės ilgumos skaičiavimas. Tikroji saulės ilguma (laipsniais) apskaičiuojama:

$$\lambda = \theta + \Delta\psi + \Delta\tau, \quad (2.23)$$

Septintasis žingsnis – tikrojo kosminio laiko perskaičiavimas iš Grinvičo laiko. Vidutinė kosminio laiko reikšmė perskaičiuojant iš Grinvičo laiko apskaičiuojama (laipsniais):

$$\begin{aligned} v_0 = & 280,46061837 + 360,98564736629 \cdot (JD - 2451545) \\ & + 0,000387933 \cdot JC^2 - \frac{JC^3}{38710000}, \end{aligned} \quad (2.24)$$

Tikrasis kosminis laikas perskaičiuotas iš Grinvičo laiko apskaičiuojamas (laipsniais):

$$v = v_0 + \Delta\psi \cdot \cos(\varepsilon), \quad (2.25)$$

Aštuntasis žingsnis – tikrojo geocentrinio saulės pakilimo skaičiavimas. Tikrasis saulės pakilimas (radianais) apskaičiuojamas:

$$\alpha = \text{Arc tan2} \left(\frac{\sin\lambda \cdot \cos\varepsilon - \tan\beta \cdot \sin\varepsilon}{\cos\lambda} \right), \quad (2.26)$$

Devintasis žingsnis – geocentrinės saulės deklinacijos skaičiavimas. Saulės deklinacija geocentrinio požiūriu apskaičiuojama (laipsniais):

$$\delta = \text{Arc sin} (\sin\beta \cdot \cos\varepsilon + \cos\beta \cdot \sin\varepsilon \cdot \sin\lambda), \quad (2.27)$$

Dešimtas žingsnis – stebėtojo vietinio valandos kampo skaičiavimas. Stebėtojo vietinio laiko valandos kampas laipsniais (apskaičiuojamas):

$$H = v + \sigma - \alpha, \quad (2.28)$$

čia: σ – stebėtojo geografinė ilgumos padėtis, teigiama arba neigiama priklausomai nuo Grinvičo laiko zonos – tai rytai arba vakarai.

Vienuoliktas žingsnis – topocentrinės tikrosios saulės padidėjimo skaičiavimas. Topocentrinė pozicija reiškia, kad saulės pozicija yra skaičiuojama iš stebėtojo padėties Žemės paviršiuje.

Ekvatorinis horizontalusis saulės paralaksas (laipsniais) apskaičiuojamas:

$$\xi = \frac{8,794}{3600 \cdot R'} \quad (2.29)$$

Dydis u (radianais) apskaičiuojamas:

$$u = \text{Arc tan}(0,99664719 \cdot \tan\varphi), \quad (2.30)$$

čia: φ – stebėtojo geografinė platumas, dydis yra teigiamas, jeigu tai šiaurinė dalis nuo ekvatoriaus, priešingu atveju – neigiamas.

Dydis x apskaičiuojamas:

$$x = \cos u + \frac{E}{6378140} \cdot \cos\varphi, \quad (2.31)$$

čia: E – stebėtojo aukštis virš jūros lygio [m].

Dydis y apskaičiuojamas:

$$y = 0,99664719 \cdot \sin u + \frac{E}{6378140} \cdot \sin\varphi, \quad (2.32)$$

Objektas stebimas iš dviejų skirtingų vietų, todėl kinta jo vieta dangaus sferoje, paralaksas reiškiamas kaip kampas tarp spindulių iki objekto abiem atvejais. Saulės paralakso pakilimas (laipsniais) apskaičiuojamas:

$$\Delta\alpha = \text{Arc tan2} \left(\frac{-x \cdot \sin \xi \cdot \sin H}{\cos \delta - x \cdot \sin \xi \cdot \cos H} \right), \quad (2.33)$$

Topocentrinis saulės pakilimas (laipsniais) apskaičiuojamas:

$$\alpha' = \alpha + \Delta\alpha, \quad (2.34)$$

Topocentrinė saulės deklinacija (laipsniais) apskaičiuojama:

$$\delta' = \text{Arc tan2} \left[\frac{(\sin \delta - y \cdot \sin \xi) \cdot \cos \Delta\alpha}{\cos \delta - x \cdot \sin \xi \cdot \cos H} \right], \quad (2.35)$$

Dvyliktas algoritmo žingsnis – topocentrinio vietinio laiko valandos kampo skaičiavimas.

Vietinis topocentrinis valandos kampas (laipsniais) apskaičiuojamas:

$$H' = H + \Delta\alpha, \quad (2.36)$$

Tryliktas algoritmo žingsnis – topocentrinio zenito kampo skaičiavimas.

Topocentrinis aukštumos kampas be atmosferinės refrakcijos korekcijos (laipsniais) apskaičiuojamas:

$$e_0 = \text{Arc sin}(\sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos H') \quad (2.37)$$

Atmosferinė refrakcija (laipsniais) apskaičiuojama:

$$\Delta e = \frac{P}{1010} \cdot \frac{283}{273 + T} \cdot \frac{1,02}{60 \cdot \tan \left(e_0 + \frac{10,3}{e_0 + 5,11} \right)}, \quad (2.38)$$

čia: P – metinis vidutinis vietinis slėgis [milibarai]; T – metinė vidutinė vietinė temperatūra [°C].

Topocentrinis aukštumos kampas (laipsniais) apskaičiuojamas:

$$e = e_0 + \Delta e \quad (2.39)$$

Topocentrinis zenito kampas (laipsniais) apskaičiuojamas:

$$\theta_z = 90 - e \quad (2.40)$$

Keturioliktas algoritmo žingsnis – topocentrinio azimuto kampo skaičiavimas.

Topocentrinis astronominis azimuto kampas (laipsniais) apskaičiuojamas:

$$\Gamma = \text{Arc tan2} \frac{\sin H'}{\cos H' \cdot \sin \varphi - \tan \delta \cdot \cos \varphi}, \quad (2.41)$$

Topocentrinis azimuto kampas (laipsniais) apskaičiuojamas:

$$\Phi = \Gamma + 180, \quad (2.42)$$

Penkioliktas algoritmo žingsnis – spinduliavimo kampo apskaičiavimas. Paviršiui, kuris yra orientuotas bet kokia kryptimi, spinduliavimo kampas (laipsniais) apskaičiuojamas:

$$\theta = \text{Arc cos}[\cos \theta_z \cdot \cos \omega + \sin \omega \cdot \sin \theta_z \cdot \cos(\Gamma - \gamma)], \quad (2.43)$$

čia: ω – posvyrio kampas matuojant nuo horizontalios plokštumos; γ – paviršiaus azimuto pasisukimo kampas (matuojamas nuo pietinės projekcijos ant horizontalios plokštumos), dydis yra teigiamas, jeigu kampas nukreiptas vakarų kryptimi, ir neigiamas, jeigu jis orientuotas rytų kryptimi.

2.1.2. Suminė apšvita į pakreiptą plokštumą

Nustačius saulės poziciją, galima apskaičiuoti suminę apšvitą į pakreiptą plokštumą. Kaip ir minėta anksčiau, visą suminę spinduliuotę į pakreiptą plokštumą sudaro trys pagrindinės dedamosios dalys: tiesioginė apšvita, difuzinė apšvita ir atspindėjusi apšvita. Apšvitos į pakreiptą plokštumą matematinė išraiška:

$$I_T = I_{TB} + I_{TD} + I_{TR}, \quad (2.44)$$

čia: I_{TB} – tiesioginė apšvita į pakreiptą plokštumą [W/m^2]; I_{TD} – išskaidytoji apšvita į pakreiptą plokštumą [W/m^2]; I_{TR} – atspindėjusi apšvita į pakreiptą plokštumą [W/m^2].

Išraiška (2.44) yra tik teorinė, kai yra modeliuojamas giedro dangaus modelis. Realiomis sąlygomis išskaidytoji apšvita veikia visomis kryptimis vienodai (izotropiškai), todėl turi būti įvertinta išskaidytoji izotropinė apšvita (apšvita iš dangaus skliauto), išskaidytoji papildoma apšvita atsirandanti iš sričių šalia saulės spinduliavimo ir horizonto apšvita. Įvertinus visus šiuos dydžius gauname sudėtingesnę išraišką, (2.44) perrašomą:

$$I_T = I_{TB} + I_{TD,iso} + I_{TD,cs} + I_{TD,hb} + I_{TR}, \quad (2.45)$$

čia: $I_{TD,iso}$ – išskaidytoji izotropinė apšvita [W/m^2]; $I_{TD,cs}$ – išskaidytoji papildoma apšvita [W/m^2]; $I_{TD,hb}$ – horizonto apšvita [W/m^2].

Išraiška (2.45) yra labai sudėtinga, ją tiesiogiai apskaičiuoti galima tik turint daugybę išmatuotų parametrų. Norint supaprastinti apšvitos skaičiavimą ir pritaikyti ją tyrimams, buvo sudaryti matematiniai modeliai. Vienas iš tiksliausių modelių yra nustatytas D.T. Reindl modelis (D.T.Reindl ir kt., 1990) pagal 2014 atliktą modelių lyginamąją analizę [26].

Matematinė A. Reindl modelio išraiška, kuria apskaičiuojama suminė apšvita į pakreiptą plokštumą:

$$I_T = (I_B + I_D \cdot A) \cdot r_b + I_D \cdot (1 - A) \cdot \left(\frac{1 + \cos \omega}{2} \right) \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{I_B}{I_H}} \cdot \sin^3 \left(\frac{\omega}{2} \right) \right] + I_H \cdot \rho \cdot \left(\frac{1 - \cos \omega}{2} \right), \quad (2.46)$$

čia: A – azintropijos indeksas; I_H – bendroji apšvita ant horizontalaus paviršiaus [W/m^2]; I_B – tiesioginės-normalinės apšvitos dalis ant horizontalaus paviršiaus [W/m^2]; I_D – bendroji išskaidytoji apšvita ant horizontalaus paviršiaus; r_b – kintamas geometrinis koeficientas; ω – plokštumos posvyrio kampas nuo horizonto; ρ – atspindžio nuo montuojamos plokštumos koeficientas, neapibrėžtai plokštumai šis dydis prilyginamas – 0,2.

Azintropijos koeficientas yra apskaičiuojamas pagal Hay and Davies modelį (Hay and Davies, 1978):

$$A = \frac{I_B}{I_0}, \quad (2.47)$$

čia: I_0 – saulės insoliacija [W/m^2].

Kintamas geometrinis koeficientas apskaičiuojamas kaip apšvitos santykis ant pakreipto ir horizontalaus paviršiaus:

$$r_b = \frac{I_{0T}}{I_0} \approx \frac{\cos \theta_0}{\cos \theta_z}, \quad (2.48)$$

čia: θ_0 – posvyrio kampas nuo statmens lygiagretaus ekvatoriui; θ_z – zenito kampas tarp saulės ir horizontalios koordinačių sistemos poliaus.

Posvyrio kampas nuo statmens, lygiagretaus ekvatoriui, apskaičiuojamas:

$$\cos \theta_0 = \sin \delta \cdot \sin(\vartheta - \omega) + \cos \delta \cdot \cos(\vartheta - \omega) \cdot \cos \theta, \quad (2.49)$$

čia: δ - deklinacijos kampas, tai kampas tarp žemės ekvatoriaus ir saulės; ϑ –platumas.

Zenito kampas apskaičiuojamas:

$$\cos \theta_z = \sin \delta \cdot \sin \vartheta + \cos \delta \cdot \cos \vartheta \cdot \cos \theta, \quad (2.50)$$

Saulės insoliacija yra išvestinis dydis, kuris nurodo, koks teorinis apšvitos dydis pasiekia žemės atmosferą:

$$I_0 = I_{sc} \cdot \left(\frac{R_{av}}{R}\right)^2, \quad (2.51)$$

čia: I_{sc} – saulės konstanta 1 367 [W/m²]; R_{av} – vidutinis saulės atstumas nuo žemės; R – tikrasis atstumas tarp saulės ir žemės, priklausantis nuo metų dienos.

Išraišką (2.48) galima apskaičiuoti, išskleidus santykį, esantį skliaustuose:

$$\begin{aligned} \left(\frac{R_{av}}{R}\right)^2 &= 1,000110 + 0,034221 \cdot \cos(b) + 0,00128 \cdot \sin(b) \\ &+ 0,000719 \cdot \cos(2b) + 0,000077 \cdot \sin(2b), \end{aligned} \quad (2.52)$$

čia: b -išvestinis koeficientas, kuris apskaičiuojamas:

$$b = 2 \cdot \pi \cdot \frac{D}{365}, \quad (2.53)$$

čia: D – metų diena.

Tiesioginė normalinė apšvita gali būti fiziškai išmatuota prietaisu pirheliometru. Tačiau jeigu nėra galimybės gauti realių matavimų, šį dydį apytiksliai galima apskaičiuoti kaip matematinį bendrosios ir išskaidytosios apšvitos skirtumą:

$$I_B = I_H - I_D, \quad (2.54)$$

Išskaidytoji apšvieta taip gali būti išmatuota fiziškai, tačiau neturint išmatuotų tiesioginės apšvitos verčių, šias vertes reikia perskaičiuoti iš bendrosios apšvitos ant horizontalaus paviršiaus verčių. Šių dydžių perskaičiavimas yra vadinamas transpozicija. Transpozicijai atlikti yra sukurti matematiniai modeliai, vienas iš tiksliausių – Reindl modelis (Reindl, 1990). Naudojant šį modelį gaunami tiksliausi rezultatai, kadangi šis modelis įvertina aplinkos oro temperatūrą T_a ir santykinę oro drėgmę ϕ .

Priklausomai nuo giedrumo indekso k_t reikšmės, išskaidytoji apšvita I_d apskaičiuojama trimis išraiškomis (2.55, 2.56, 2.57).

Esant giedrumo indekso dydžiui tarp reikšmių $0 \leq k_t \leq 0,3$, išskaidytoji apšvita apskaičiuojama:

$$I_d = (1 - 0,232 \cdot k_t + 0,0239 \cdot \sin \alpha - 0,000682 \cdot T_a + 0,019 \cdot \phi) \cdot I_{GHI}, \quad (2.55)$$

Esant giedrumo indekso dydžiui tarp reikšmių $0,3 \leq k_t \leq 0,78$, išskaidytoji apšvita apskaičiuojama:

$$I_d = (1,329 - 1,716 \cdot k_t + 0,267 \cdot \sin \alpha - 0,00357 \cdot T_a + 0,106 \cdot \phi) \cdot I_{GHI}, \quad (2.56)$$

Esant giedrumo indekso dydžiui tarp reikšmių $0,3 \leq k_t \leq 0,78$, išskaidytoji apšvita apskaičiuojama:

$$I_d = (0,426 \cdot k_t + 0,256 \cdot \sin \alpha - 0,00349 \cdot T_a + 0,0734 \cdot \phi) \cdot I_{GHI}, \quad (2.57)$$

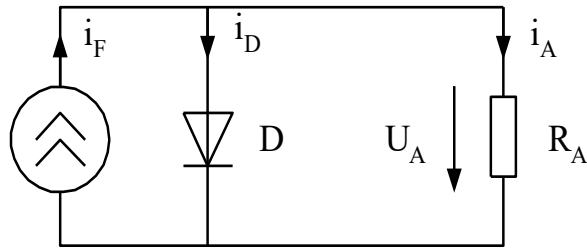
Giedrumo indeksas k_t , apskaičiuojamas kaip santykinis dydis tarp horizontaliosios apšvitos ir saulės insoliacijos:

$$k_t = \frac{I_H}{I_0} \quad (2.58)$$

Trūkštamus parametrus aprašius matematinėmis lygtimis, galima pagal išraišką (2.46) nustatyti suminės apšvitos dydį, kuris krinta ant pakreiptos plokštumos.

2.2. Fotovoltinio saulės modulio matematinis modelis

Vienas iš pagrindinių fotovoltinės saulės elektrinės elementų yra fotovoltinis saulės modulis, kurio fotoelektriniai elementai saulės šviesą paverčia į elektros energiją. Fotovoltinio saulės modulio modelis imituoja modulio darbą, jo charakteristikos turi būti kuo artimesnės realioms. Pagrindiniai parametrai apibūdinantys fotovoltinį saulės modulį yra jo voltamperinės charakteristikos, t. y., įtampos ir srovės priklausomybės. Fotovoltinį saulės modulį sudaro atskiri fotoelementai, idealaus fotovoltinio saulės elemento ekvivalentinė schema pavaizduota 2.2.1. paveiksle. Atstojamoji schema vaizduoja idealų fotovoltinį saulės elementą, kurį sudaro ekvivalentinis srovės šaltinis I , ekvivalentinis diodas D ir apkrovos varža R_A . Ekvivalentinio srovės šaltinio srovės stipris i_F priklauso nuo apšvitos, diodas D apibūdina atvirkštinę įsisotinimo srovę i_D .

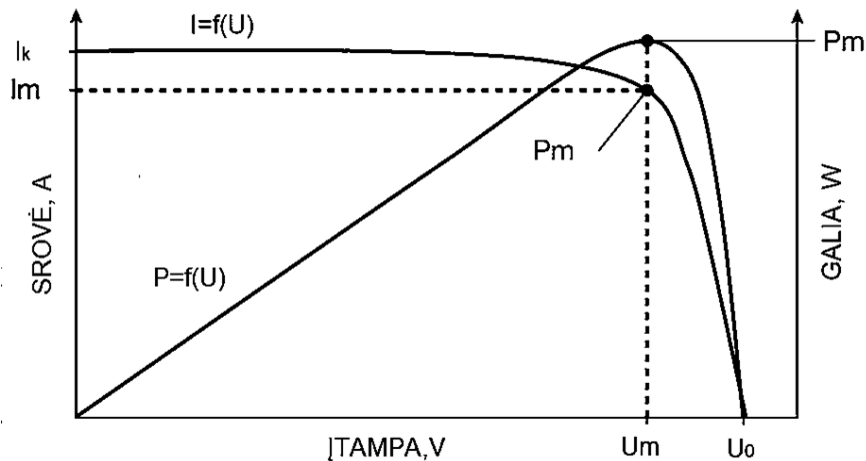


2.2.1. pav. Idealaus fotovoltinio elemento ekvivalentinė schema

Esant apkrovos varžai $R_A=0$, apkrovos įtampa taip lygi nuliui $U_A=0$, tuomet fotovoltinis saulės elementas veikia trumpojo jungimo režimu. Per diodą D dėl didelės sandūros varžos srovė i_D neteka.

Padidinus apkrovos varžą $R_A>0$, atsiranda įtampa $U_A>0$, srovė nežymiai mažėja. Tokiu atveju fotovoltinis saulės elementas veikia srovės šaltinio režimu, tai vyksta tol, kol apkrovos galia pasiekia didžiausią vertę $P=f(U)$ ir $I=f(U)$ susikirtimo taškuose voltamperinėje charakteristikoje (žr. 2.2.2. pav.). Didinant apkrovos varžą R_A toliau, didėja ir įtampa U_A , tokiu atveju fotovoltinis saulės elementas veikia įtampos šaltinio režimu. Šis režimas prasideda mažėjant diodo D sandūros varžai, mažėjant srovei i_A ir galiai P_A .

Apkrovos varžai R_A artėjant link begalybės, apkrovos srovė yra $i_A=0$, tokiu atveju fotovoltinis saulės elementas veikia tuščios veikos režimu. Tokiu atveju apkrovos galia yra $P_A=0$, o fotoelementas generuoja tuščios veikos įtampą U_0 .



2.2.2. pav. Fotovoltinio saulės elemento voltamperinė ir galios-įtampos charakteristikos

Fotovoltinio saulės modulio sukuriamos srovės išraiška I_{FVM} pagal Huan-Liang (2008) sudarytą matematinį modelį:

$$I_{FVM} = I_{t.j.} [1 - K_1 \cdot (e^{K_2 \cdot U_{FVM}^m} - 1)], \quad (2.59)$$

čia: $I_{t.j.}$ – fotovoltinio saulės modulio trumpojo jungimo srovė [A], U_{FVM} – modulio išėjimo įtampa [V], K_1 – matematinis koeficientas (0,01175).

Koeficientai K_2 , K_3 , K_4 ir m apskaičiuojami:

$$K_2 = \frac{K_4}{U_0^m}, \quad (2.60)$$

$$K_3 = \ln \left[\frac{I_{t.j.} \cdot (1 + K_1) - I_m}{K_1 \cdot I_{t.j.}} \right], \quad (2.61)$$

$$K_4 = \ln \left[\frac{1 + K_1}{K_1} \right], \quad (2.62)$$

$$m = \frac{\ln \left[\frac{K_3}{K_4} \right]}{\ln \left[\frac{U_m}{U_0} \right]}, \quad (2.63)$$

čia: U_0 – fotovoltinio modulio tuščios veikos įtampa [V], I_m – fotovoltinio modulio srovė didžiausios galios taške, U_m – fotovoltinio modulio įtampa didžiausios galios taške [V].

Matematinė išraiška (2.59) yra tipinė fotovoltinio elemento voltamperinę charakteristiką, kuri neįvertina kintamos apšvitos ir nuo aplinkos temperatūros verčių. Pastaroji išraiška (2.59) turi būti papildoma dydžiais, kurie įvertintų kintamos apšvitos ir oro temperatūros dydžius.

Fotovoltinio modulio temperatūrą įvertinančios išraiškos:

$$\Delta T_a = T_a - T_0, \quad (2.64)$$

$$\Delta I_{SE} = \alpha_{t.j.} \cdot \left(\frac{E}{E_0} \right) \cdot \Delta T_a + I_{t.j.} \cdot \left(\frac{E}{E_0} - 1 \right), \quad (2.65)$$

$$\Delta U_{SE} = -\beta_0 \cdot T_a - R_n \cdot \Delta I_{SE}, \quad (2.66)$$

čia: ΔT_a – aplinkos temperatūros T_a nuokrypis nuo standartinės bandymų temperatūros T_0 [°C], $\alpha_{t.j.}$ – temperatūrinis trumpojo jungimo koeficientas [mA/°C], β_0 – temperatūrinis tuščios veikos koeficientas [mV/°C], R_n – nuosekliai fotovoltinio modulio varža [Ω], E – momentinis apšvitos srautas, krintantis ant fotovoltinio saulės modulio paviršiaus [W/m^2], E_0 – apšvitos srautas standartinėmis sąlygomis [W/m^2], ΔI_{SE} – srovės nuokrypis fotovoltinio saulės modulio išėjime (atsiradęs dėl temperatūrinio pokyčio) [A], ΔU_{SE} – įtampos nuokrypis fotovoltinio saulės modulio išėjime (atsiradęs dėl temperatūrinio pokyčio) [U], $I_{t.j.}$ – fotovoltinio saulės modulio trumpojo jungimo srovė [A].

Fotovoltinio modulio įtampą ir srovę, priklausomai nuo krintančios apšvitos ir aplinkos temperatūros, galima išreikšti:

$$U_{SEp} = U_{SE} + \Delta U_{SE}, \quad (2.67)$$

$$I_{SEp} = I_{SE} + \Delta I_{SE}, \quad (2.68)$$

čia: U_{SEp} – perskaičiuota fotovoltinio modulio įtampa, priklausanti nuo apšvitos ir aplinkos temperatūros [V], I_{SEp} – perskaičiuota fotovoltinio modulio srovė, priklausanti nuo apšvitos ir aplinkos temperatūros [A], U_{SE} – teorinė fotovoltinio modulio generuojama įtampa [V], I_{SE} – teorinė fotovoltinio modulio generuojama srovė [A].

Atliekant skaičiavimus fotovoltinių saulės modulių duomenis perimame iš gamintojo pateiktą specifikaciją. Fotovoltinio modulio įtampa U_{SE} apskaičiuojama remiantis Omo dėsnium:

$$U_{SE} = I_{SE} \cdot R_{ap}, \quad (2.69)$$

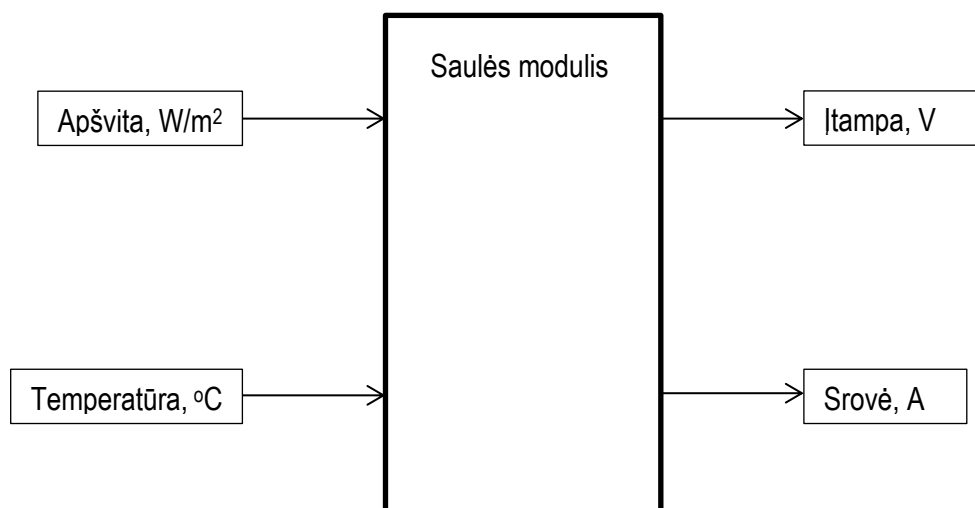
čia: R_{ap} – fotovoltinio modulio apkrovos varža [Ω].

Iš anksčiau pateiktų išraiškų galima sudaryti fotovoltinio saulės modulio matematinį modelį, tačiau tam reikalinga konkretaus saulės modulio gamintojo specifikacija.

2.2.1. lentelė. Fotovoltinių saulės modulių P270 ir M300 techninės specifikacijos.

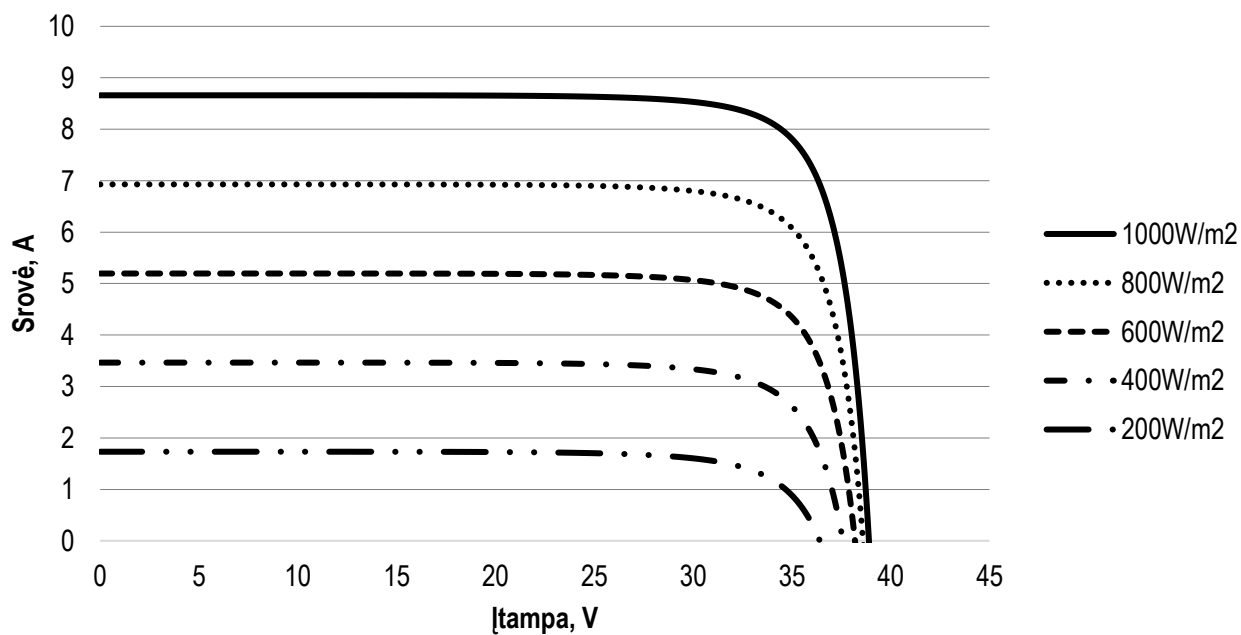
Techninis parametras	P270	M300
Nominalioji galia, P_n	270 W	300
Didžiausio galios taško įtampa, U_m	33,8 V	32,25 V
Didžiausio galios taško srovė, I_m	8,16 A	9,30 A
Tuščios veikos įtampa, U_0	38,9 V	39,54 V
Trumpojo jungimo srovė, $I_{t.j.}$	8,66 A	9,90 A
Temperatūrinis trumpojo jungimo srovės koeficientas, $\alpha_{t.j.}$	4,33 mA/°C	3,37 mA/°C
Temperatūrinis tuščios veikos įtampos koeficientas, β_0	-132,26 mV/°C	-124,16 mV/°C

2.2.3. paveiksle pateikta blokinė fotovoltinio saulės modulio matematinio modelio schema. Pagrindinis blokas – saulės modulis, turintis du pagrindinius įėjimo parametrus: momentinę apšvitą E [W/m^2] ir aplinkos temperatūrą T_a [°C]. Fotovoltinio saulės modulio modelio bloko išėjime gauname momentinę įtampą U_{SE} ir srovę I_{SE} [A].

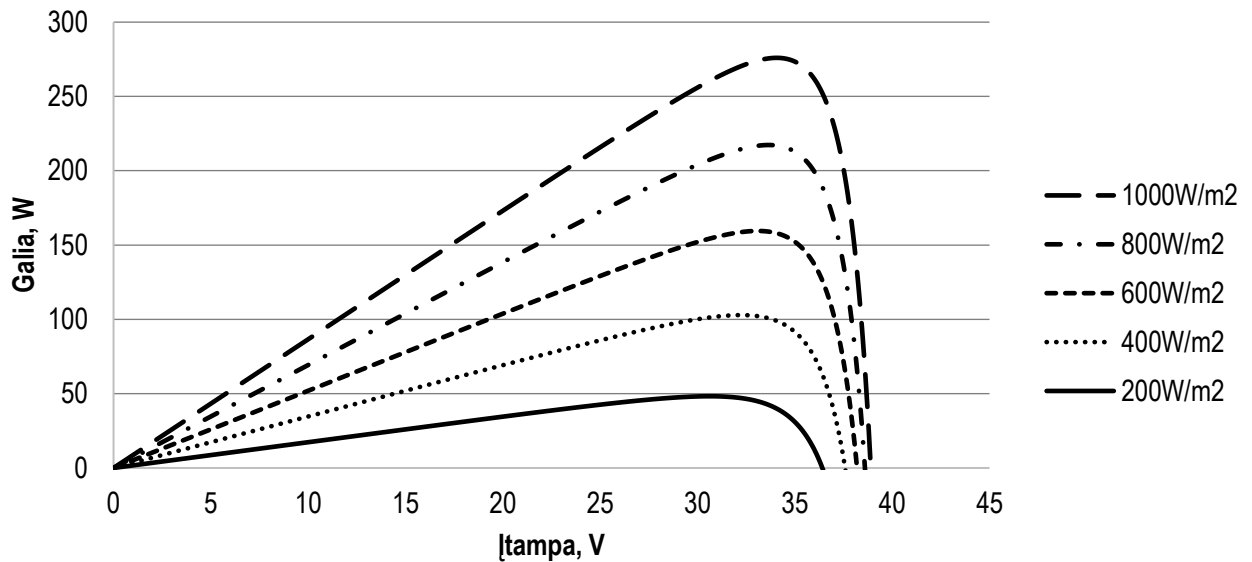


2.2.3. pav. Fotovoltinio saulės modulio modelio blokinė schema

Pagal sudarytą fotovoltinį saulės modulio modelį braižomos pagrindinės voltamperinės charakteristikos $I=f(U)$ ir $P=f(U)$. Charakteristikos sudaromos išlaikant pastovią fotovoltinių saulės modulių temperatūrą (25 °C), ir keičiant tik krintančios apšvitos kiekį.



2.2.4. pav. Fotovoltinio saulės modulio P270 voltamperinė charakteristika

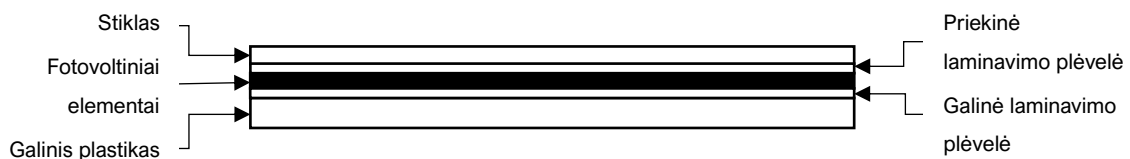


2.2.5. pav. Fotovoltinio modulio P270 galios charakteristika

Nubraižius charakteristikas (žr. 2.2.4. pav. ir 2.2.5. pav.), galima aiškiai išskirti pagrindinius taškus, apibūdinančius fotovoltinį saulės modulį: trumpojo jungimo srovę, atviros grandinės įtampą, maksimalaus galios taško įtampą ir srovę.

Modelis imituoja realų fotovoltinio saulės modulio veikimą, nes modulio temperatūra skiriasi nuo aplinkos temperatūros. Besikeičiant aplinkos sąlygoms fotovoltinio saulės modulio temperatūra gali siekti net iki 70 °C. Modelis turi įvertinti net tik spinduliuotės intensyvumą, bet ir aplinkos veiksnius: aplinkos temperatūrą, vėjo greitį bei vėjo kryptį. Siekiant tiksliai sumodeliuoti saulės elektrinę, būtina nustatyti temperatūros įtaką fotovoltinės saulės elektrinės darbui.

Šiuolaikiniai fotovoltiniai saulės moduliai sudaryti sluoksniuojant pagrindinius elementus iš apačios į viršų: galinis plastikas, galinė laminavimo plėvelė, fotovoltinių elementų sluoksnis, priekinė laminavimo plėvelė ir priekinis stiklas. Laminavimo plėvelės plotis yra itin plonas, jų konvencinės savybės artimos stiklui, todėl atskirai jų vertinti nereikia. Sudarant modelį atsižvelgiama tik į priekinio stiklo, fotovoltinių elementų sluoksnio ir galinio plastiko sluoksnio šilumos mainų savybes (M.T. Giuseppe, 2010).



2.2.6. pav. Fotovoltinio saulės modulio struktūra

Vertinant saulės modulio darbo temperatūrą reikia įvertinti medžiagų, iš kurių pagamintas saulės modulis, savybes bei modulių tvirtinimo būdą (M. Laura, 2014). Fotovoltinio saulės modulio svyravimai kinta su tam tikra inercija – padidėjus į saulės modulį krintančios apšvitos srautui, temperatūra padidėja tik po laiko lygaus inercijos laikotarpiui.

Fotovoltinio saulės modulio įtampą lemiantys veiksniai, apibūdinami kaip pagrindiniai šilumos perdavimo būdai, yra laidumas, konvekcija ir spinduliavimas. Fotovoltinio saulės modulio konvekcija ir spinduliavimas yra glaudžiai susiję, perdavimas (šilumos laidumas) tarp saulės modulio rėmo ir konstrukcijos dažniausiai nėra didelis. Šiluminė fotovoltinio saulės modulio talpa išraiška:

$$C_{mod} \cdot \frac{dT_{mod}}{dt} = P_{tb} + P_{ib} - P_{konv} - P_{iš}, \quad (2.70)$$

čia: C_{mod} – fotovoltinio saulės modulio šiluminė talpa; dT_{mod}/dt – fotovoltinio saulės modulio išvestinė laike; P_{tb} – saulės galios sraute esančių trumpųjų bangų galia fotovoltinio modulio paviršiuje; P_{ib} – saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų galia fotovoltinio modulio paviršiuje; P_{konv} – šilumos konvekcijos kitimo greitis fotovoltiniame saulės modulyje; $P_{iš}$ – modulyje sukuriama elektros momentinė galia jo išėjime.

Norint apskaičiuoti fotovoltinio saulės modulio kitimą pagal 2.70 formulę reikia žinoti ilgųjų ir trumpųjų šviesos bangų spinduliuotės kiekį ir konvekcijos pasikeitimo bei sukuriama elektros galios priklausomybę nuo fotovoltinio saulės modulio charakteristikų (kintant aplinkos sąlygoms). Atliekant fotovoltinio saulės modulio analizę, priimamos supaprastintos sąlygos: modulis sudarytas iš trijų sluoksnių (viršutinis – stiklas, vidurinis – fotovoltinių elementų sluoksnis, galinis – plastikas), visų sluoksnių temperatūra yra tokia pat. Fotovoltinio saulės modulio rėmas ir sandarinimo medžiagos daro nedidelę įtaką fotovoltinio saulės modulio temperatūrai, nes dengia labai mažai saulės modulio ploto. Skaičiuojant saulės modulio temperatūros kitimą neatsižvelgiama į mažą poveikį darančius elementus. Šiluminė fotovoltinio saulės modulio talpa apskaičiuojama kaip pavienių modulio elementų šiluminių talpų suma ir išreiškiama:

$$C_{mod} = \sum_m S_p \cdot l_m \cdot \rho_m \cdot C_m, \quad (2.71)$$

čia: S_p – fotovoltinio saulės modulio paviršiaus plotas [m^2]; l_m – medžiagos storis [m]; ρ_m – medžiagos tankis; C_m – medžiagos savitoji šiluminė talpa; $m=1, 2, 3$ – fotovoltinio modulio konstrukcijos elemento eilės numeris.

Tiesioginiai saulės spinduliai – tai spinduliai, pasiekiantys priekinę fotovoltinio saulės modulio dalį. Jų dydis priklauso nuo trumpųjų saulės spindulių kiekio, kuris patenka ant fotovoltinio

saulės modulio ir kuris atsispindi nuo paviršiaus. Trumpųjų fotovoltinių šviesos bangų galia fotovoltinio modulio paviršiuje apskaičiuojama:

$$P_{tb} = k \cdot E_{\Sigma} \cdot S_p, \quad (2.72)$$

čia: k – santykinis fotovoltinio saulės modulio naudingojo darbo paviršiaus, sugeriančio saulės srautą, koeficientas; E_{Σ} – visas saulės galios srautas, patenkantis į fotovoltinio modulio paviršių.

Šviesos sugertis priklauso ne tik nuo fotovoltinių saulės modulių krypties, bet ir nuo posvyrio kampo saulės atžvilgiu, modulių išsidėstymo, modulių gamybos medžiagų sugėrimo ir atspindėjimo savybių. Šviesos sraute iš saulės ilgųjų fotovoltinių bangų galia modulių paviršiuje aprašoma Stefano-Boltcmano dėsnio:

$$P_{ib} = \sigma \cdot E \cdot T^4, \quad (2.73)$$

čia: σ – Stefano-Bolcmano konstanta $5,6705 \cdot 10^{-8}$ [W/m²·K⁴]; E – spinduliuojamas saulės galios srautas.

Šviesos srautas gali atsispindėti nuo vieno paviršiaus ir pasiekti kitą, šis reiškinys vadinamas sklaidos faktoriumi. Ilgųjų bangų mainai tarp skirtingų x ir y paviršių galios sraute išreiškiami:

$$P_{ib,ab} = S_a \cdot (L_a - L_b) \cdot F_{ab} = S_b \cdot (L_b - L_a) \cdot F_{ba}, \quad (2.74)$$

čia: $P_{ib,ab}$ – saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų mainų srautų tarp a ir b paviršių galia; S_a, S_b – a ir b paviršių plotai, L_a – nuo a paviršiaus atsispindėjęs saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų galios srautas; L_b – nuo b paviršiaus atsispindėjęs saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų galios srautas; F_{ab} – sklaidos koeficientas, apibūdinantis saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų perdavimą iš a paviršiaus į b paviršių; F_{ba} – sklaidos koeficientas, apibūdinantis saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų perdavimą iš b paviršiaus į a paviršių.

Laikoma, kad viso modulio temperatūra yra tokia pat kaip ir medžiagos paviršiaus, ant kurio įrengta fotovoltinė saulės jėgainė. Fotovoltinio saulės modulio ilgųjų bangų atsispindėjimas nuo galinės modulio sienelės į kitos medžiagos (konstrukcijos) paviršių yra labai mažas ir neturi reikšmingos įtakos saulės modulio darbui. Galios sraute iš saulės esančių ilgųjų bangų atspindžių skaičiavimus naudinga atlikti nuo priekinės saulės modulio paviršiaus pusės. Modulis, kuris sumontuotas kampu β_{posv} zenito atžvilgiu lygus $F_{ab} = (1 + \cos \beta_{posv})/2$, o žemės atžvilgiu $F_{ba} = (1 - \cos \beta_{posv})/2$.

Išraišką (2.73) pertvarkius įvertinant saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų mainus tarp fotovoltinio saulės modulio ir dangaus skliauto bei žemės paviršiaus, gauname išraišką, apibūdinančią saulės galios sraute esančių bangų galią fotovoltinio saulės modulio paviršiuje:

$$P_{ib} = \sigma \cdot E \cdot \left(\frac{1+\cos\omega}{2} \cdot E_{dan} \cdot T_{dan}^4 + \frac{1-\cos\omega}{2} \cdot E_{zem} \cdot T_{zem}^4 - E_{mod} \cdot T_{mod}^4 \right) \cdot S_p, \quad (2.75)$$

čia: ω – fotovoltinio modulio posvyrio kampas; E_{dan} – saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų atsispindėjusių nuo dangaus skliauto galios srautas; E_{zem} – saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų atsispindėjusių nuo žemės paviršiaus galios srautas; E_{mod} – saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų atsispindėjusių nuo fotovoltinio saulės modulio paviršiaus galios srautas; T_{dan} – dangaus skliauto temperatūra; T_{zem} – žemės paviršiaus temperatūra; T_{mod} – fotovoltinio saulės modulio temperatūra.

Fotovoltinio saulės modulio paviršiaus energetiniai mainai nustatomi remiantis III Niutono dėsniumi. Išraiška, kurioje fotovoltinio saulės modulio ir aplinkos temperatūra veikia priešingomis kryptimis viena kitos atžvilgiu, atrodo taip:

$$P_{konv} = -h_k \cdot (T_{mod} - T_a) \cdot S_p, \quad (2.76)$$

čia: h_k – šilumos konvekcijos koeficientas.

Šilumos konvekcijos koeficiento h_k dydį nulemia fotovoltinio saulės modulio tvirtinimas (instaliacija). Konvekcija gali būti dviejų tipų – natūrali ir priverstinė. Natūrali konvekcija vyksta tada, kai galinė modulių pusė yra uždengta ir aplinkos sąlygos nekinta. Esant palankioms aplinkos sąlygoms (vėjuota) šilumos konvekcija modulio paviršiuje vyksta greičiau.

Konvekcijos koeficientas esant natūraliam aušinimui yra proporcingas fotovoltinio modulio ir aplinkos oro temperatūrų skirtumui. Fotovoltinis saulės modulis prilyginamas plokščiajam paviršiui, laisvasis konvekcijos koeficientas apskaičiuojamas pagal tokią (J. P. Holman, 1992) išraišką:

$$h_{k,laisv} = 1,31 \cdot (T_{mod} - T_{apl})^{\frac{1}{3}}, \quad (2.77)$$

čia: $h_{k,laisv}$ – laisvasis konvekcijos koeficientas [$W/m^2 \cdot K$].

Laikant, kad bendra šilumos konvekcijos suma lygi priekinio ir galinio fotovoltinio saulės modulio sumai, gauname išraišką:

$$P_{konv} = -(h_{k,pad} + h_{k,laisv}) \cdot (T_{mod} - T_{apl}) \cdot S_p, \quad (2.78)$$

čia: $h_{k,pad}$ – padidėjusios konvekcijos koeficientas [$W/m^2 \cdot K$].

Laikome, kad padidėjusį konvekcijos koeficientą reikėtų laikyti vėjo greičio tiesine funkcija (D. Thijs et al. 2010).

Fotovoltinio saulės modulio elektrinė galia apskaičiuojama pagal įtampos ir įtampos kreivės užpildymo koeficientą, kuris išreiškiamas:

$$P_{iš} = C_{FF} \cdot \frac{E \cdot \ln(k_1 \cdot E)}{T_{mod}}, \quad (2.79)$$

čia: C_{FF} – fotovoltinio saulės modulio koeficientas 1,22 [$K \cdot m^2$]; k_1 – konstanta 10^6 [m^2/W].

Susisteminius išraiškas 2.72, 2.74, 2.75 ir 2.79 į pradinę 2.70 formulę, gauname išraišką fotovoltinio saulės modulio temperatūros kitimui apskaičiuoti:

$$C_{mod} \cdot \frac{dT_{mod}}{dt} = \alpha \cdot E_{\Sigma} \cdot S_p + \sigma \cdot E \cdot \left(E_{dan} \cdot (T_{apl} - \delta T)^4 - E_{mod} \cdot T_{mod}^4 \right) \cdot S_p \quad (2.80)$$

$$- (h_{k,pad} + h_{k,lasiv}) \cdot (T_{mod} - T_{apl}) \cdot S_p - C_{FF} \cdot \frac{E \cdot \ln(k_1 \cdot E)}{T_{mod}},$$

Pagal gautą išraišką (2.80) galima apskaičiuoti fotovoltinio modulio tikrąją temperatūrą, priklausomai nuo į fotovoltinio modulio paviršių krintančio saulės šviesos srauto.

2.3. Saulės elektrinės keitiklio matematinis modelis

Saulės elektrinės keitiklį sudaro daugybė elektronikos elementų (raktai, filtrai ir kt.), tačiau ieškant bendrojo pagaminto elektros energijos kiekio, nebūtina sukurti kiekvieno keitiklio elemento matematinį modelį. Visą fotovoltinio saulės keitiklio elementų grandinę skaičiavimuose galima supaprastinti ir laikyti DC/AC konversijos efektyvumo koeficientu, priklausančiu nuo keitiklio apkrovimo lygio.

Gautą galutinę pagamintą AC energiją galima apskaičiuoti pasinaudojant SANDIA keitiklio modeliu (David L. King ir kt., 2007). SANDIA keitiklio pagaminta kintamos srovės elektros energija P_{AC} išreiškiama matematine lygtimi:

$$P_{AC} = \left[\frac{P_{AC0}}{A - B} - C \cdot (A - B) \right] \cdot (P_{DC} - B) + C \cdot (P_{DC} - B)^2, \quad (2.81)$$

šioje lygtyje A, B, C koeficientai yra išreiškiami:

$$A = P_{DC0} \cdot [1 + C_1 \cdot (U_{DC} - U_{DC0})], \quad (2.82)$$

$$B = P_{s0} \cdot [1 + C_2 \cdot (U_{DC} - U_{DC0})], \quad (2.83)$$

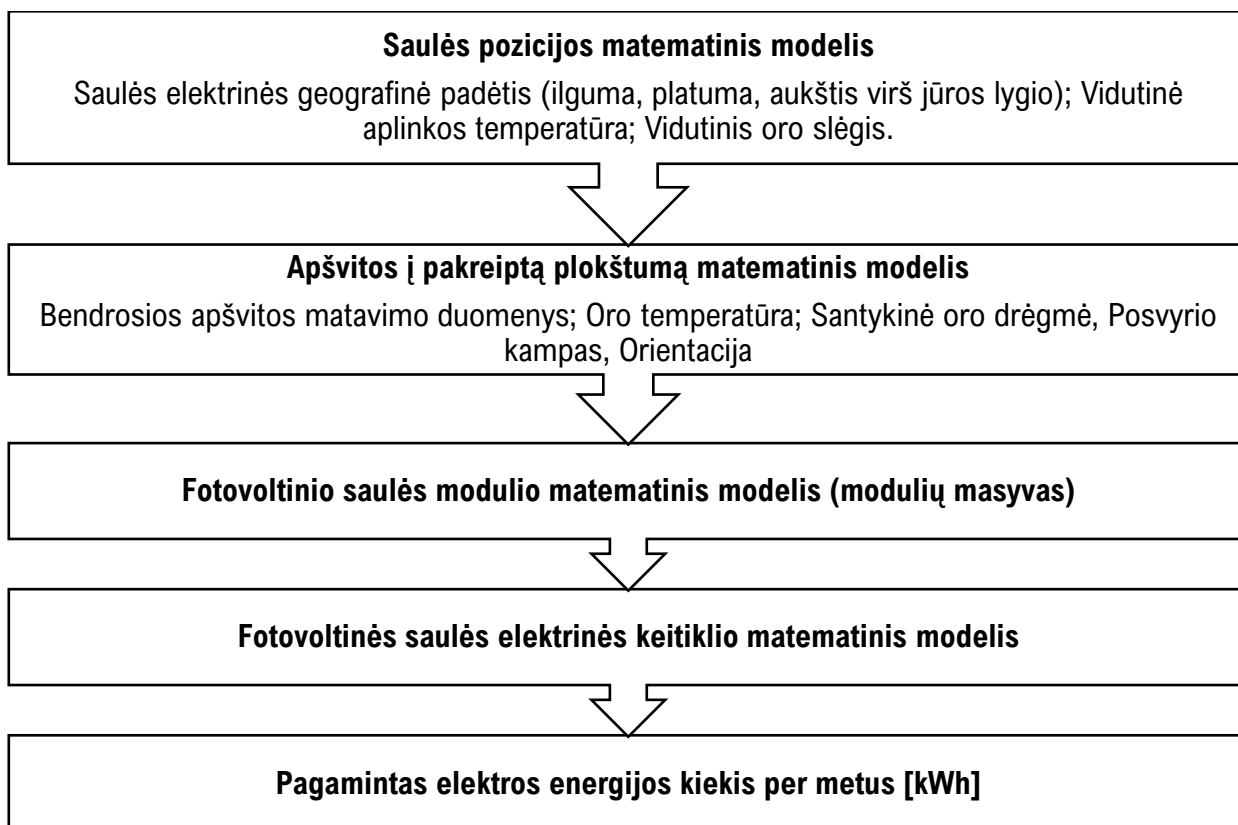
$$C = C_0 \cdot [1 + C_3 \cdot (U_{DC} - U_{DC0})], \quad (2.84)$$

čia: U_{DC} – keitiklio įėjimo įtampa [V]; U_{DC0} – DC įtampos lygis, kai AC galios reikšmė pasiekta nustatytai veikimo sąlygai [V]; P_{AC0} – maksimali leidžiama keitiklio išėjimo AC galia [W]; P_{DC0} – DC galios lygis, kai AC galios reikšmė pasiekta nustatytai veikimo sąlygai [W]; P_{s0} – pradinė keitiklio įėjimo DC galia [W]; C_0 – koeficientas, apibūdinantis AC išėjimo ir DC įėjimo galios priklausomybės išlinkį [1/W]; C_1 – empirinis koeficientas, leidžiantis P_{DC0} skirtis nuo tiesinio nuolatinės įtampos įėjimo, numatytasis dydis – 0 [1/V]; C_2 – empirinis koeficientas, leidžiantis P_{s0} skirtis nuo tiesinio nuolatinės įtampos įėjimo, numatytasis dydis – 0 [1/V]; C_3 – empirinis koeficientas, leidžiantis C_0 skirtis nuo tiesinio nuolatinės įtampos įėjimo, numatytasis dydis – 0 [1/V].

3. TIRIAMOJI DALIS

3.1. Tyrimo specifika ir priemonės

Anksčiau aprašytas matematinis fotovoltinės saulės elektrinės modelis yra imituojamas MATLAB aplinkoje, naudojantis realiais matavimų rezultatais ir tikromis įrenginių specifikacijomis.



3.1.1. pav. Fotovoltinio saulės keitiklio tyrimo schema

Tyrimo tikslas yra nustatyti vieno konkretaus (K10) fotovoltinės saulės elektrinės keitiklio optimalaus apkrovimo lygį įvertinant modulių technologiją (polikristaliniai arba monokristaliniai), modulių posvyrio kampą (nuo 0 iki 90 laipsnių, 5 laipsnių žingsniu) ir modulių orientaciją (matuojant nuo pietinės krypties nuo 90 iki -90 laipsnių, 10 laipsnių žingsniu). Kiekvienu atveju optimalus keitiklio apkrovimo lygis nustatomas dviem pagrindiniais žingsniais:

- 1) apkrovus keitiklį tam tikro dydžio apkrova santykinio didžiausio sugeneruoto elektros energijos kiekio;
- 2) atliekant ekonominę keitiklio perkrovimo lygio pagrįstumą, skaičiuojant fotovoltinės saulės elektrinės sistemos pradinių investicijų trumpiausią atsipirkimo laikotarpį.

Galimas minimalus ir maksimalus fotovoltinio keitiklio apkrovimo lygis nustatomas pagal keitiklio technines specifikacijas, pateiktas lentelėje Nr. 3.1.3.1., ir tiriamų fotovoltinių saulės modulių specifikacijas, pateiktas lentelėje Nr. 2.2.1. Nustačius galimas keitiklio apkrovimo lygio vertes, sudaromos apkrovimo lygio tyrimo lentelės 3.1.1.1. ir 3.1.1.2. Keitiklio apkrovimo lygio režiai sudaryti atsižvelgiant tiek į tyrimą su polikristaliniais P270, tiek su monokristaliniais M300 saulės moduliais.

3.1.1.1. lentelė. Keitiklio K10 apkrovimo lygio tyrimo režiai, tiriant P270 modulius.

Nuosekliai sujungtų modulių skaičius, vnt.	Lygiagrečiai sujungtų modulių skaičius, vnt.	Modulių skaičius per MPPT		Modulių masyvo (MPPT) įtampa, V	Modulių masyvo (MPPT) srovė, A	Suminė galia, kWp	Apkrovimo lygis
		1	2				
8	1	8	8	270,4	8,16	4,32	0,419
9	1	9	9	304,2	8,16	4,86	0,472
10	1	10	10	338	8,16	5,4	0,524
11	1	11	11	371,8	8,16	5,94	0,577
12	1	12	12	405,6	8,16	6,48	0,629
13	1	13	13	439,4	8,16	7,02	0,682
14	1	14	14	473,2	8,16	7,56	0,734
15	1	15	15	507	8,16	8,1	0,786
16	1	16	16	540,8	8,16	8,64	0,839
17	1	17	17	574,6	8,16	9,18	0,891
18	1	18	18	608,4	8,16	9,72	0,944
19	1	19	19	642,2	8,16	10,26	0,996
20	1	20	20	676	8,16	10,8	1,049
11	2	22	22	371,8	16,32	11,88	1,153
12	2	24	24	405,6	16,32	12,96	1,258
13	2	26	26	439,4	16,32	14,04	1,363
14	2	28	28	473,2	16,32	15,12	1,468

3.1.1.2. lentelė. Keitiklio K10 apkrovimo lygio tyrimo režiai, tiriant M300 modulius.

Nuosekliai sujungtų modulių skaičius, vnt.	Lygiagrečiai sujungtų modulių skaičius, vnt.	Modulių skaičius per MPPT		Modulių masyvo (MPPT) įtampa, V	Modulių masyvo (MPPT) srovė, A	Suminė galia, kWp	Apkrovimo lygis
		1	2				
8	1	8	8	258	9,3	4,8	0,466
9	1	9	9	290,25	9,3	5,4	0,524
10	1	10	10	322,5	9,3	6	0,583
11	1	11	11	354,75	9,3	6,6	0,641
12	1	12	12	387	9,3	7,2	0,699
13	1	13	13	419,25	9,3	7,8	0,757
14	1	14	14	451,5	9,3	8,4	0,816
15	1	15	15	483,75	9,3	9	0,874
16	1	16	16	516	9,3	9,6	0,932
17	1	17	17	548,25	9,3	10,2	0,990
18	1	18	18	580,5	9,3	10,8	1,049
19	1	19	19	612,75	9,3	11,4	1,107
20	1	20	20	645	9,3	12	1,165
11	2	22	22	354,75	18,6	13,2	1,282
12	2	24	24	387	18,6	14,4	1,398

3.1.1. Meteorologinių matavimų duomenys

Tyrime naudojami apšvitos tyrimo rezultatai iš *MeteoSun* duomenų bazės. Šioje duomenų bazėje pateikiami valandos tikslumo matavimai, perskaičiuoti pagal ilgalaikių matavimų duomenis 2001–2009 m. periodu. Ši duomenų bazė pateikia tik bendrosios apšvitos ant horizontalaus paviršiaus duomenis.

Tyrime naudojami oro temperatūros, vėjo krypties, slėgio ir santykinės drėgmės duomenys pateikiami iš PVGIS duomenų bazės [10]. PVGIS matavimų vertės yra kas valandinio tikslumo. Užtikrinant modelio tikslumą, pasirenkamas toks pats laiko periodas kaip ir *MeteoSun* duomenų bazėje – 2001–2009m.

Užtikrinant tyrimo aktualumą, saulės elektrinės lokacijai pasirinktas Vilniaus regionas, kuriame vidutinė apšvita artimiausia Lietuvos apšvitos vidurkiui. Tyrimo lokacijai parinkta artimiausia vietovė šalia *MeteoSun* meteorologinės stotelės, t. y., Trakai (platuma – 54.625°, ilguma – 24.935°, aukštis virš jūros lygio – 155 m).

3.1.2. Fotovoltiniai saulės moduliai

Tyrime naudojami dviejų tipų silicio pagrindu pagaminti fotovoltiniai saulės moduliai: polikristaliniai (270 W) ir monokristaliniai (300 W). Pagrindinės saulės modulių techninės specifikacijos pateiktos lentelėje Nr. 3.1.3.1. Aktyvus modulių plotas – 1,627 m².



a)



b)

3.1.2.1. pav. Saulės moduliai – (a) polikristalinis ir (b) monokristalinis

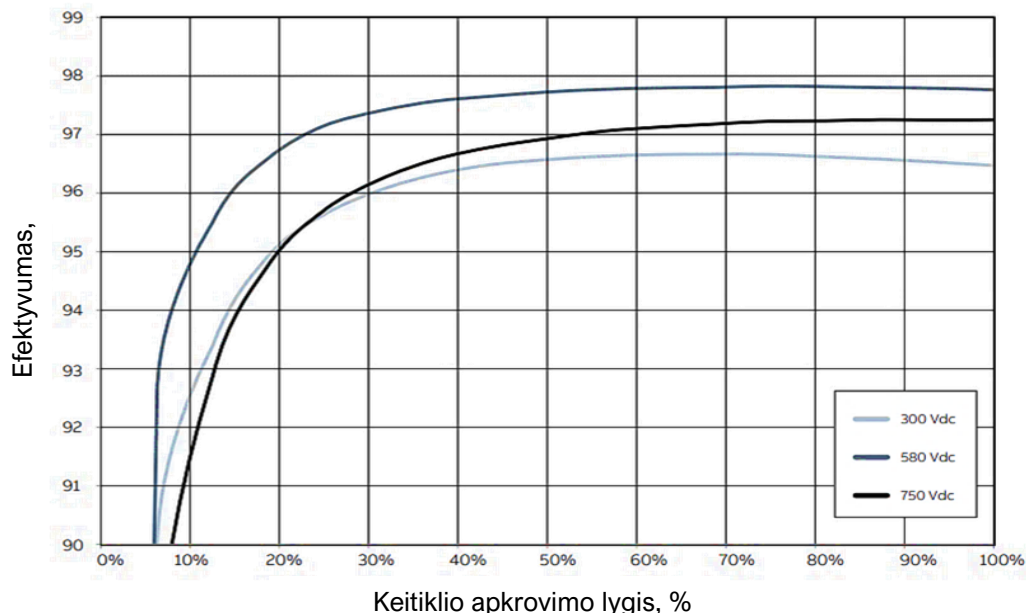
3.1.3. Fotovoltinės saulės elektrinės keitiklis

Tyrime naudojamas 10kWp vardinės galios fotovoltinės saulės elektrinės keitiklis K10. Pagrindiniai keitiklio techniniai parametrai pateikti lentelėje Nr. 3.1.3.1. Šis trifazis tinklo keitiklis turi du maksimalios galios taško sekiklius (MPPT), veikiančius nepriklausomai vienas nuo kito.

3.1.3.1. lentelė. Fotovoltinės saulės elektrinės keitiklio techninės specifikacijos.

Techninis parametras	Dydis
<i>Iėjimo parametrai (DC dalis)</i>	
Maksimali įėjimo srovė, U_{max}	900 V
Pradinio veikimo įtampa, U_{demin}	360 V
Nominalioji keitiklio galia, P_{dcr}	10 300 W
Nepriklausomų MPPT skaičius	2
Maksimali MPPT įėjimo galia, $P_{MPPTmax}$	6 500 W
Maksimali MPPT įėjimo srovė, $I_{MPPTmax}$	22 A
<i>Išėjimo parametrai (AC dalis)</i>	
Nominalioji išėjimo galia, P_{acr}	10 000 W
Maksimali išėjimo galia, P_{acmax}	11 000 W
Nominalioji AC tinklo įtampa, V_{acr}	400 V
Maksimali išėjimo srovė, I_{acmax}	16,6 A
Maksimalus efektyvumas, η_{max}	97,8 %

Sudarant keitiklio veikimo modelį, reikalingi keitiklio bandymų rezultatai keitiklio efektyvumui įvairiomis apkrovimo sąlygomis nustatyti.



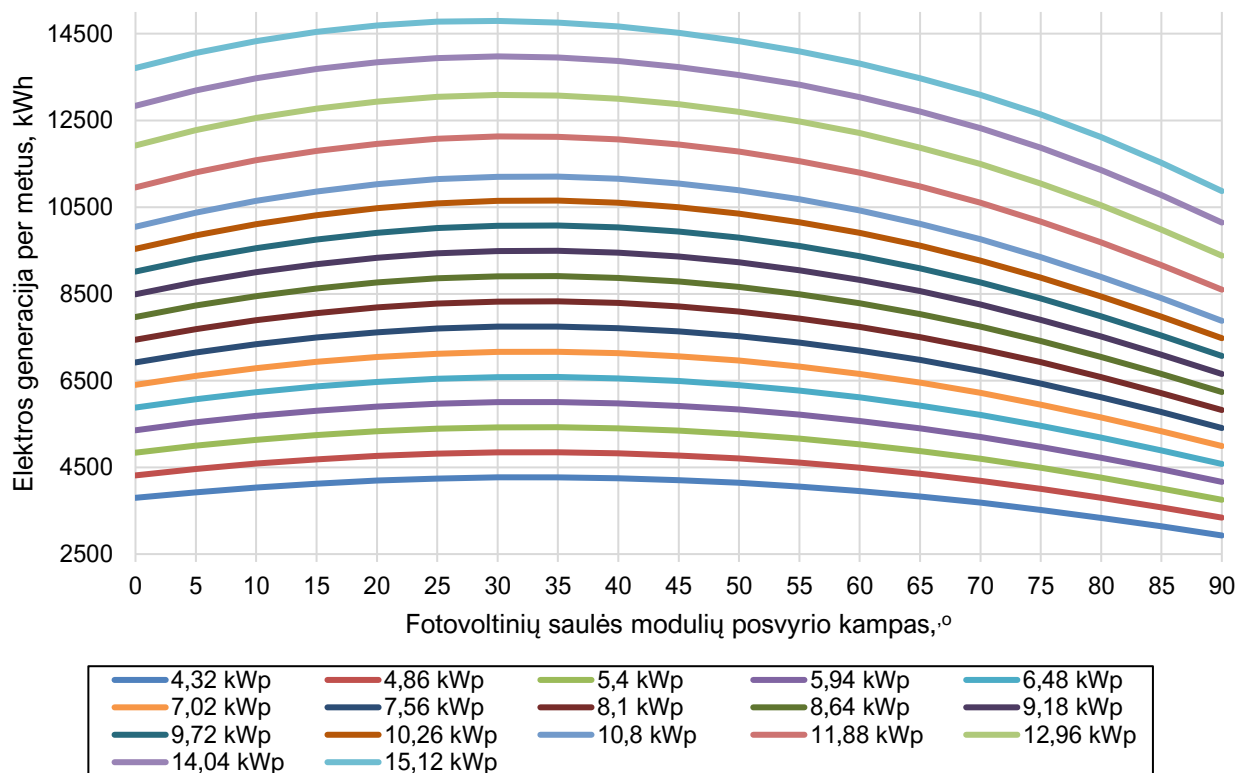
3.1.3.1. pav. Keitiklio K10 efektyvumo priklausomybės nuo apkrovimo lygio ir įtamos

3.2. Optimalaus keitiklio apkrovimo lygio nustatymas įvertinant modulių posvyrio kampą

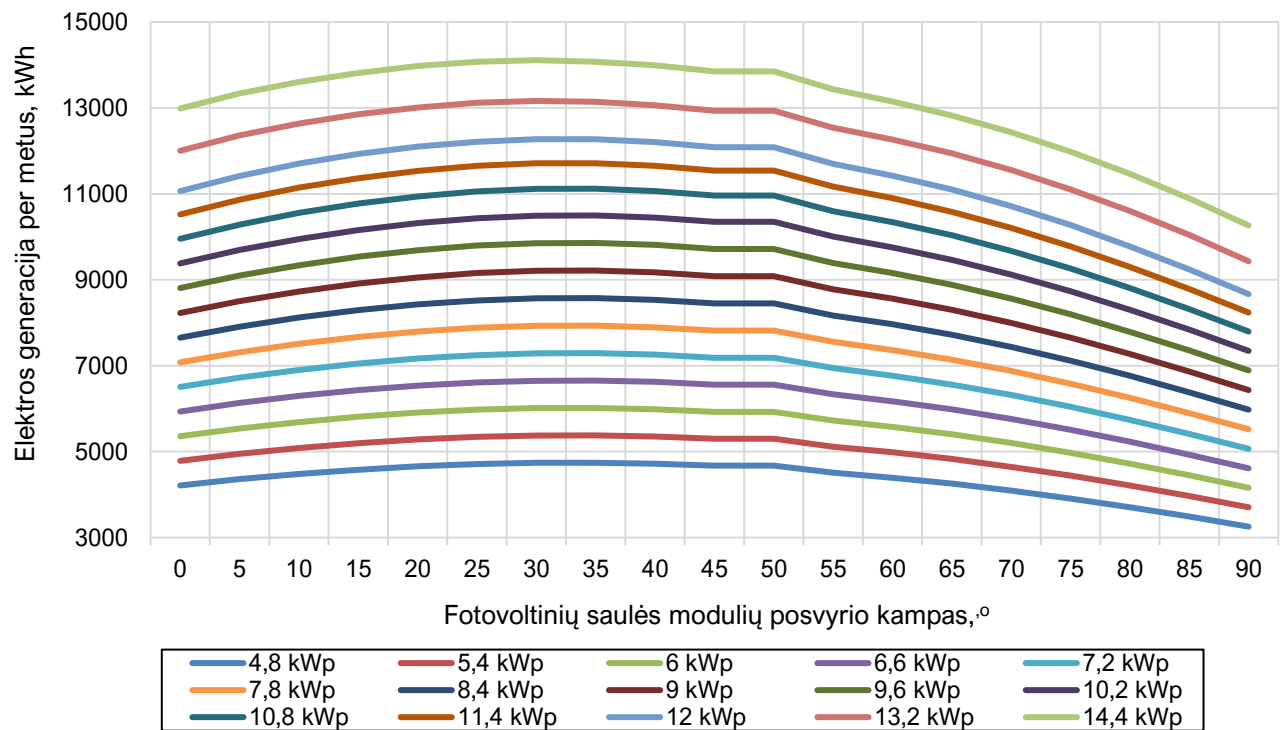
Pirmojoje tyrimo dalyje fotovoltinio saulės elektrinės keitiklio apkrovimo lygis tiriamas įvertinant tik modulių montavimo kampą nuo horizonto, moduliai orientuoti pietų kryptimi.

Optimalaus keitiklio apkrovimo lygiui nustatyti yra atliekama elektros energijos generacijos analizė. Fotovoltinių modulių orientacija išlaikoma lygi nuliui (moduliai orientuoti pietų kryptimi), keičiamas tik keitiklio apkrovimo lygis (instaliuotoji modulių galia) ir modulių posvyrio kampas nuo horizonto (žr. 3.2.2. pav. ir 3.2.3. pav.)

Iš šių priklausomybių galima pamatyti aiškią tendenciją, kad fotovoltinės saulės elektrinės generacija smarkiai išauga instaliuotajai galiai esant didesnei už keitiklio vardinę galią. Nepriklausomai nuo fotovoltinių saulės modulių tipo, didžiausia generacija vyksta esant maksimaliam keitiklio apkrovimui t. y. instaliuotajai fotovoltinių modulių galiai esant didesnei už 10 kW_p. Dar viena ryški šių priklausomybių tendencija yra ta, kad esant didesnei instaliuotajai galiai, ryškesnę įtaką generacijai daro fotovoltinių saulės modulių posvyrio kampas.



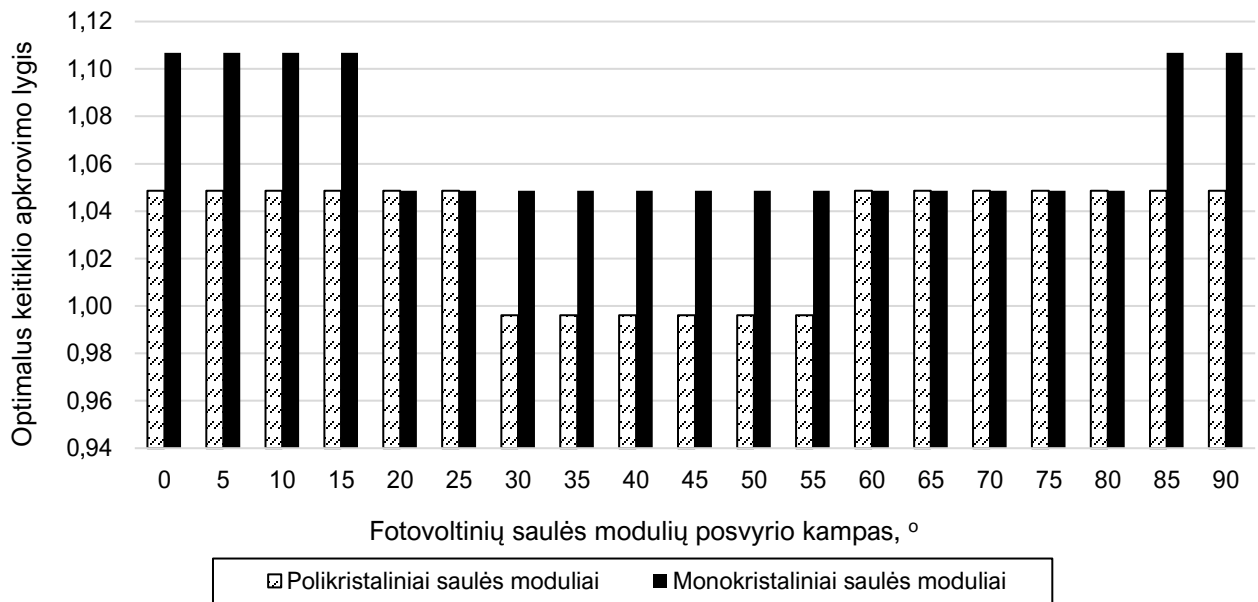
3.2.2. pav. Metinės elektros energijos generacijos iš fotovoltinės saulės elektrinės (su polikristaliniais saulės moduliais) priklausomybė nuo modulių montavimo kampo ir keitiklio apkrovimo galios



3.2.3. pav. Metinės elektros energijos generacijos iš fotovoltinės saulės elektrinės (su monokristaliniais saulės moduliais) priklausomybė nuo modulių montavimo kampo ir keitiklio apkrovimo galios

Iš bendrosios generacijos negalima nustatyti, koks yra optimalus keitiklio apkrovimo lygis, nes nėra įvertinamos santykinės reikšmės t. y. koks elektros energijos kiekis yra pagaminamas iš vieno instaliuotojo kilovato. Sistemos efektyvumas įvertinamas metinį elektros energijos kiekį (kWh) padalijant iš instaliuotosios galios (kWp). Atlikus duomenų analizę, sudarytas grafikas, vaizduojantis optimalaus keitiklio apkrovimo lygio priklausomybę nuo modulių posvyrio kampo (žr. 3.2.4. pav.).

Grafiškai pavaizdavus optimalaus keitiklio apkrovimo lygio priklausomybę nuo fotovoltinių saulės modulių montavimo kampo, aiškiai matoma, kad saulės elektrinės keitiklį su monokristaliniais saulės moduliais galima apkrauti daugiau. Saulės elektrinės keitiklis prie kurio prijungtas monokristalinių modulių masyvas efektyviausiai veikia šiomis sąlygomis: nuo 0 iki 15 laipsnių – apkrovus 1,11 vardinės galios; 20 iki 80 laipsnių – 1,05; nuo 85 iki 90 laipsnių – 1,11. Prijungus prie saulės elektrinės keitiklio polikristalinių modulių masyvą, keitiklis efektyviausiai veikia šiomis sąlygomis: nuo 0 iki 25 laipsnių – apkrovus 1,05; nuo 30 iki 55 laipsnių – 1,0; nuo 60 iki 90 laipsnių – 1,05.



3.2.4. pav. Fotovoltinės saulės elektrinės keitiklio optimalaus apkrovimo lygio priklausomybė nuo fotovoltinių saulės modulių montavimo kampo

3.3. Optimalaus keitiklio apkrovimo lygio nustatymas įvertinant modulių orientaciją

Orientuoti saulės modulių pietų kryptimi nevisada įmanoma dėl techninių montavimo kliūčių, ypač tuomet, kai fotovoltinė saulės elektrinė yra montuojama ant pastato stogo. Montuojant fotovoltinę saulės elektrinę ne pietų kryptimi, reikia įvertinti ir orientacijos įtaką. Modulių orientacija, kaip ir montavimo kampas, tiesiogiai veikia vidutinę metinę apšvitą.

Metinė apšvita į pakreiptą plokštumą, orientuojamą erdvėje (nuo rytų iki vakarų), apskaičiuojama naudojant aprašytąjį modelį. Duomenis paprasčiausia pavaizduoti procentinėmis reikšmėmis, lyginant su maksimalia apšvitos verte (3.3.1 lentelė).

3.3.1. lentelė. Procentinės vidutinės metinės apšvitos išraiškos priklausomai nuo modulių posvyrio kampo ir orientacijos

Fotovoltinių saulės modulių orientacija																				
	Vakarai										0	Rytai								
	90	80	70	60	50	40	30	20	10	10		20	30	40	50	60	70	80	90	
0	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	
5	90	90	91	91	91	92	92	92	92	92	91	91	91	90	90	89	89	88	87	
10	90	91	92	93	93	94	94	94	94	94	93	93	92	91	90	89	88	87	86	
15	91	92	93	94	95	96	96	96	96	96	95	94	93	92	90	89	87	86	84	

20	91	93	94	96	97	97	98	98	98	97	96	95	94	92	91	89	87	85	83
25	91	93	95	97	98	99	99	99	99	98	97	96	94	92	90	88	86	84	81
30	90	93	95	97	98	99	100	100	99	98	97	96	94	92	90	88	85	83	80
35	90	93	95	97	99	100	100	100	99	98	97	96	94	92	89	87	84	81	78
40	89	92	95	97	99	99	100	100	99	98	97	95	93	91	88	86	83	80	77
45	88	91	94	96	98	99	99	99	98	97	96	94	92	90	87	84	81	78	75
50	87	90	93	95	97	98	98	97	97	95	94	92	90	88	85	83	80	76	73
55	85	89	92	94	95	96	96	96	95	94	92	90	88	86	83	81	78	74	71
60	83	87	90	92	94	94	94	94	93	91	90	88	86	84	81	78	75	72	69
65	81	85	88	90	91	92	92	91	90	88	87	85	83	81	79	76	73	70	67
70	79	82	85	87	88	89	89	88	87	85	84	82	80	78	76	73	70	67	64
75	76	80	82	84	85	86	85	85	83	82	80	79	77	75	73	70	68	65	62
80	73	76	79	81	82	82	82	81	79	78	76	75	73	72	69	67	65	62	59
85	70	73	76	77	78	78	78	77	75	74	72	71	69	68	66	64	62	59	56
90	67	70	72	74	74	74	73	72	71	69	68	67	65	64	62	60	58	56	54

Iš pateiktos lentelės aiškiai matyti, kad nagrinėjamoje vietovėje apšvita nėra simetriška rytų-vakarų kryptimis. Didžiausia apšvita orientuota vakarų kryptimi (20–50 laipsnių nuo pietų krypties), kai modulių posvyrio kampas nuo horizonto yra 30–45 laipsniai. Mažiausia apšvita yra ant plokštumos, orientuotos rytų kryptimi (60–90 laipsnių nuo pietų krypties).

Optimalus fotovoltinės saulės elektrinės keitiklio apkrovimo lygis nustatomas analogiškai, kaip ir prieš tai nagrinėtoje situacijoje (žr. 3.2. skyrių). Optimaliu keitiklio apkrovos lygiu laikomas toks lygis, kai iš vienos instaliuotosios galios kilovato gaunama didžiausia metinės gamybos reikšmė kilovatvalandėmis (priklausomybės pateikiamos 3.3.2 ir 3.3.3. lentelėse). Šiuo atveju vertinamas ne tik modulių posvyrio kampas, bet ir modulių orientacija.

3.3.2. lentelė. Optimalus fotovoltinės saulės elektrinės (su polikristaliniais saulės moduliais) keitiklio apkrovimo lygis priklausomai nuo modulių posvyrio kampo ir orientacijos

Fotovoltinių saulės modulių orientacija																			
	Vakarai										Rytai								
	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y
5	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y
10	y	y	y	y	y	y	y	y	x	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y
15	y	y	y	y	y	y	y	y	x	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y
20	y	y	y	y	y	y	y	y	x	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y
25	y	y	y	y	y	x	x	x	x	x	x	x	y	y	y	y	y	y	y
30	y	y	y	y	x	x	x	x	x	x	x	x	y	y	y	y	y	y	y
35	y	y	y	y	x	x	x	x	x	x	x	x	y	y	y	y	y	y	y

40	y	y	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	y	y	y	y	y	y
45	y	y	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	y	y	y	y	y	y
50	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	y	y	y	y	y	y	y
55	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	y	y	y	y	y	y	y
60	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	y	y	y	y	y	y	y	y
65	x	x	x	x	x	x	x	x	x	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y
70	x	x	x	x	x	x	x	x	x	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y
75	x	x	x	x	x	x	y	x	x	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y
80	x	x	y	y	y	y	y	y	x	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y
85	y	y	y	y	y	y	y	y	x	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y
90	y	y	y	y	y	y	y	y	x	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y

3.3.2. lentelėje yra atvaizduoti keitiklio apkrovimo lygio tyrimo rezultatai: x – keitiklio apkrovimo lygis yra 1; y – keitiklio apkrovimo lygis yra 1,05. Lyginant šią lentelę su 3.2. lentele matoma koreliacija tarp maksimalios apšvitos ir keitiklio apkrovimo lygio, didesnis efektyvumas pasiekiamas vardine galia apkrovus keitiklį esant aukštam apšvitos lygiui. Esant mažesnėms vidutinėms metinėms apšvitos vertėms, fotovoltinės saulės elektrinės keitiklio efektyvumas yra pasiekiamas keitiklio apkrovimo lygiui esant 1,05. Toliau didinant apkrovimo lygį efektyvumas vėl mažėja.

3.3.3. lentelė. Optimalus fotovoltinės saulės elektrinės su monokristaliniais saulės moduliais keitiklio apkrovimo lygis priklausomai nuo modulių posvyrio kampo ir orientacijos

Fotovoltinių saulės modulių orientacija																			
Vakarai										Rytai									
	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z
5	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z
10	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z
15	z	z	z	z	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	z	z	z	z
20	z	z	z	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	z	z	z	z
25	z	z	z	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	z	z	z	z
30	z	z		y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	z	z	z	z
35	z	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	z	z	z	z
40	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	z	z	z	z
45	y	y	y	y	y	y	x	x	x	y	y	y	y	y	y	z	z	z	z
50	y	y	y	y	x	x	x	x	y	y	y	y	y	y	y	z	z	z	z
55	y	y	y	x	x	x	x	y	y	y	y	y	y	y	y	z	z	z	z
60	y	y	y	x	x	x	y	y	y	y	y	y	y	z	z	z	z	z	z
65	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	z	z	z	z	z	z	z
70	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	z	z	z	z	z	z	z	z	z

75	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	z	z	z	z	z	z	z	z	z
80	y	y	y	y	y	y	y	y	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z
85	y	y	y	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z
90	y	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z	z

3.3.3. lentelėje atvaizduoti keitiklio apkrovimo lygio tyrimo rezultatai: x – keitiklio apkrovimo lygis yra 0,99; y – keitiklio apkrovimo lygis yra 1,05; z – keitiklio apkrovimo lygis lygus 1,11. Lyginant šią apkrovimo lygių pasiskirstymo lentelę su fotovoltinės saulės elektrinės su polikristaliniais saulės moduliais lentele, keitiklį galima apkrauti daugiau esant mažesnėms apšvietos vertėms.

3.4. Ekonominis keitiklio lygio apkrovimo pagrindumas ir atsiperkamumas

Optimalus apkrovimo lygis turi būti įvertintas ne tik techniniu požiūriu, bet ir ekonominiu. Vertinant investicijas, pagrindinis rodiklis yra atsipirkimo laikotarpis. Optimaliu laikomas tas variantas, kurio atsiperkamumo trukmė yra trumpiausia.

Skaičiuojant pradines saulės elektrinės investicijas dažniausiai taikomas supaprastinimas – įrengimo kaina susiejama su įrengtąja galia (kWp/€). Tačiau esant nedideliam nuokrypiui nuo pradinės galios, toks vertinimas yra per daug grubus ir įrengimo kaina gali būti nepagrįstai didelė arba nepagrįstai maža. Kiekvienu atveju perskaičiuojant saulės elektrinės įrengimo kaštus pagal kintamą keitiklio apkrovimo lygį priimama, kad elektros įrenginių kainos perklauso nuo saulės elektrinės dydžio, tik kintamos sąnaudos (montavimo konstrukcijos, kitos medžiagos, montavimo ir perdavimo darbai) yra susiejamos su įrengtąja galia. Atlikus šiuos supaprastinimus, lengviau operuoti kainomis ir kiekvienu atveju nereikia iš naujo detalai nagrinėti sąmatos. Nustatyti saulės elektrinės instaliuotojo kilovato įrengimo kainą skaičiuoti kintamoms sąnaudoms yra priimta laikyti bazinį dydį 10 kWp galios saulės elektrinės įrengimo sąmatą.

Nagrinėjami du atvejai – kai įrengiama saulės elektrinė yra su monokristaliniais saulės moduliais, ir kai su polikristaliniais saulės moduliais. Modulių kainos skiriasi, todėl ir įrengimo kaina kiekvienu atveju skaičiuojama atskirai. Saulės elektrinių įrengimo pradinių investicijų sąmatos (pagal 2018 metų pirmojo ketvirčio kainas) pateiktos 3.4.1. ir 3.4.2. lentelėse.

3.4.1 lentelė. Saulės elektrinės (9,99 kWp) su polikristaliniais saulės moduliais įrengimo sąmata

Eil. Nr.	Pavadinimas	Vnt. kaina, €	Kiekis	Iš viso, €
1	Polikristalinis saulės modulis P270	135,00	37,00	4 995,00
2	Trifazis saulės elektrinės keitiklis K10	1 950,00	1,00	1 950,00
3	Monitoringas internetu	150,00	1,00	150,00
4	Montavimo konstrukcijos	1 400,00	1,00	1 400,00
5	Kitos medžiagos*	400,00	1,00	400,00
6	Projektavimas, dokumentų tvarkymas, leidimai	500,00	1,00	500,00
7	Montavimas, perdavimas	2 200,00	1,00	2 200,00
			Iš viso:	11 595,00
			21 % PVM	2 434,95
			Viso su PVM:	14 029,95

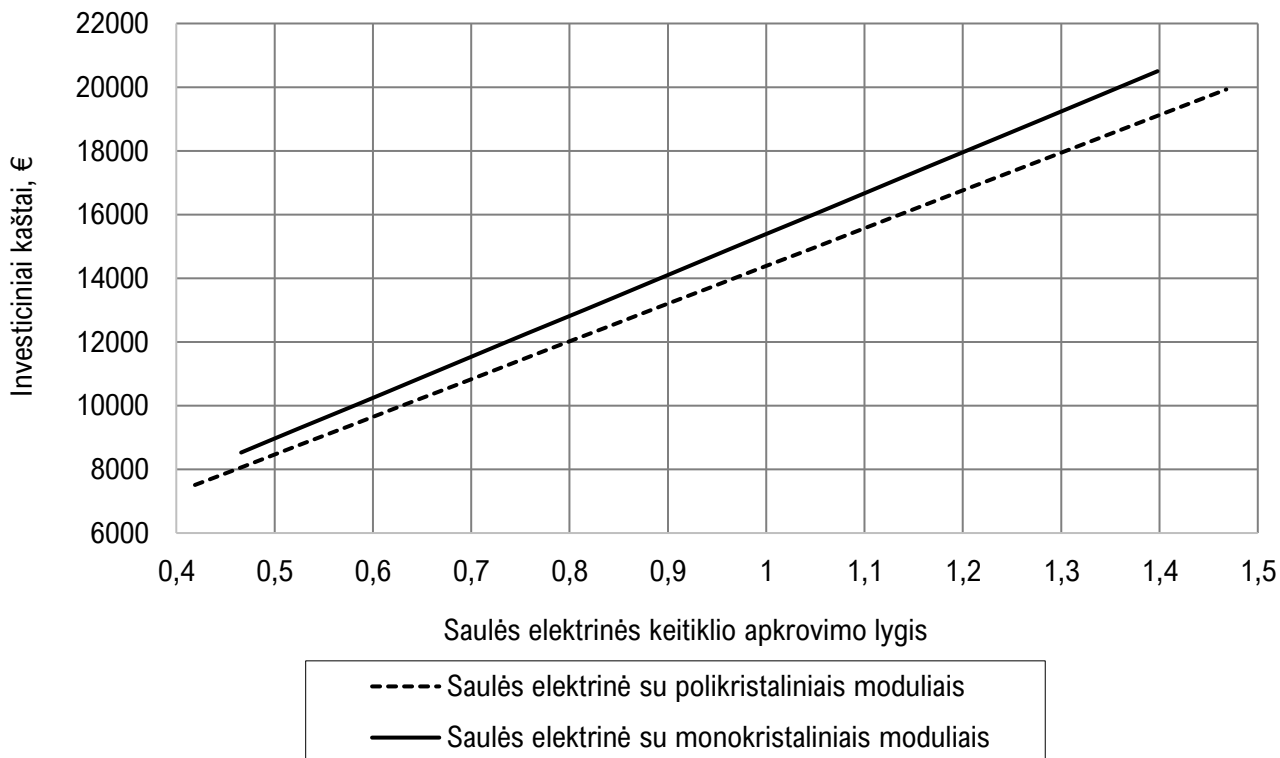
* kitos medžiagos – elektros kabeliai, elektros kabelių jungtys, automatinis jėgos skydas.

3.4.2. lentelė. Saulės elektrinės (9,9 kWp) su monokristaliniais saulės moduliais įrengimo sąmata

Eil. Nr.	Pavadinimas	Vnt. kaina, €	Kiekis	Iš viso, €
1	Polikristalinis saulės modulis M300	185,00	33,00	6 105,00
2	Trifazis saulės elektrinės keitiklis K10	1 950,00	1,00	1 950,00
3	Monitoringas internetu	150,00	1,00	150,00
4	Montavimo konstrukcijos	1 250,00	1,00	1 250,00
5	Kitos medžiagos*	350,00	1,00	350,00
6	Projektavimas, dokumentų tvarkymas, leidimai	500,00	1,00	500,00
7	Montavimas, perdavimas	2 000,00	1,00	2 000,00
			Iš viso:	12 305,00
			21 % PVM	2 584,05
			Viso su PVM:	14 889,05

Didžiausią dalį fotovoltinės elektrinės įrengimo sąmatoje sudaro keitiklis, montavimo konstrukcijos bei montavimo darbai.

Atlikus perskaičiavimus, pateiktos priklausomybės, apibūdinančios polikristalinių ir monokristalinių saulės modulių elektrinių įrengimo kainą priklausomai nuo keitiklio apkrovimo lygio (žr. 3.4.1. pav.). Didėjant sistemos dydžiui, taip pat didėja ir skirtumas tarp saulės elektrinės su polikristaliniais saulės moduliais įrengimo kainos ir tarp monokristalinių saulės modulių elektrinės įrengimo kainos.



3.4.1. pav. Saulės elektrinės įrengimo investicinių kaštų priklausomybė nuo apkrovimo lygio

Fotovoltinės saulės elektrinės atsiperkamumo skaičiavimuose daroma prielaida, kad visa pagaminta elektros energija yra sunaudojama, t. y., nėra vertinamos elektros energijos saugojimo išlaidos. Laikoma, kad diskonto norma visą laikotarpį yra 6 proc. [25]. Elektros energijos kaina nustatyta pagal 2018 m. sausio mėnesį galiojusią skirstomųjų tinklų buitiniams vartotojams (vieno laiko zonos tarifo) elektros tiekimo kainą – 0,113 €/kWh [24]. Skaičiavimai atliekami skaičiuojant atsipirkimo laikotarpį su pritaikyta valstybės parama – 25 proc. Priimtinas investicijų atsipirkimo laikotarpis yra 20 metų, atsipirkimo laikotarpių palyginimui yra pasirenkamas dar vienas atskaitinis *patenkinamas* investicijų atsipirkimo laikotarpis – 25 metai.

Techninės priežiūros sąnaudos apskaičiuojamos taikant tiesinį metodą:

$$C_{tp} = k_d \cdot K \cdot \frac{d_{tp}}{d_a}, \quad (3.1)$$

čia: k_d – metinė kapitalo norma – 0,036; K – saulės elektrinės įrengimo investicijos; d_{tp} – techninės priežiūros dalies savikaina – 0,2 %; d_a – amortizacijos ir nusidėvėjimo dalies savikaina – 0,8%.

Amortizacijos ir nusidėvėjimo sąnaudos apskaičiuojamos:

$$C_a = k_a \cdot K, \quad (3.2)$$

čia: k_a – metinė amortizacijos ir nusidėvėjimo norma – 0,05 %.

Metinės fotovoltinės saulės elektrinės eksploatavimo sąnaudos apskaičiuojamos:

$$C = C_{tp} + C_a, \quad (3.3)$$

Metinės pajamos yra apskaičiuojamos kaip sutaupytos išlaidos naudojant fotovoltinės saulės elektrinės pagamintą elektros energiją, vietoj iš elektros skirstomųjų tinklų įsigytos energijos:

$$p = s \cdot W \cdot (1 - d_g \cdot t), \quad (3.4)$$

čia: s – elektros energijos kaina, kuri būtų mokama už iš skirstomųjų tinklų įsigytą energijos kiekį [€/kWh]; W – per metus pagamintas elektros energijos kiekis iš fotovoltinės saulės elektrinės [kWh]; d_g – sumažėjusios gamybos koeficientas, nusakantis fotovoltinių saulės modulių degradaciją 1,0 % per metus.

Metinis pinigų srautas skaičiuojamas pasitelkiant esamosios vertės metodą:

$$CF = P - C, \quad (3.5)$$

Skaičiuojant fotovoltinės saulės elektrinės atsiperkamumo laikotarpį, būtina pinigų srautus įvertinti pagal laiko vertę. Metodas, įvertinantis tikrąją pinigų vertę laike, yra vadinamas pinigų srautų diskontavimu. Fotovoltinė saulės elektrinė laikoma atsipirkusia, kai gautos išlaidos padengia investicinius kaštus.

Pradinės investicijos yra laikomos atsipirkusiomis tada, kai jos susilygina su gautaisiais pinigų srautais. Norint įvertinti pinigų srautą laike, reikia pinigų srautus diskontuoti pagal k diskonto normą:

$$NPV = \sum_{t=0}^{t_a} \frac{CF_t}{(1+k)^{t'}} \quad (3.6)$$

čia: CF_t – pinigų srautas laiko momentu t ; t_a – atsipirkimo trukmė.

Prieš apskaičiuojant optimalų apkrovimo lygį ekonomiškai trumpiausiam atsipirkimo laikotarpiui, skaičiuojami atsipirkimo laikotarpiai esant fotovoltinės saulės elektrinės keitiklio

vardiniam apkrovimo lygiui. Atsipirkimo trukmės skaičiavimų rezultatai pateikti lentelėse Nr. 3.4.3 ir 3.4.4.

3.4.3. lentelė. Fotovoltinės saulės elektrinės (su polikristaliniais saulės moduliais) atsipirkimo laikotarpis esant vardiniam keitiklio apkrovimo lygiui, priklausomai nuo modulių posvyrio kampo ir orientacijos

Fotovoltinės saulės elektrinės atsipirkimo laikotarpis esant vardiniam apkrovimo lygiui										
Montavimo kampas	Fotovoltinių saulės modulių orientacija									
	Vakarai									Pietūs
	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
0	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4
5	21,8	21,4	21,1	20,9	20,7	20,6	20,5	20,5	20,5	20,6
10	21,4	20,8	20,3	19,8	19,5	19,3	19,2	19,1	20,5	19,3
15	21,1	20,3	19,6	19,0	18,6	18,3	18,2	18,1	19,2	18,4
20	21,0	19,9	19,1	18,4	18,0	17,6	17,5	17,5	18,2	18,4
25	21,0	19,7	18,8	18,0	17,5	17,2	17,0	17,0	17,6	17,4
30	21,2	19,7	18,6	17,8	17,2	16,9	16,7	16,8	17,1	17,2
35	21,5	19,8	18,6	17,7	17,1	16,8	16,6	16,7	16,9	17,2
40	22,0	20,1	18,8	17,8	17,2	16,8	16,7	16,8	16,8	17,3
45	22,8	20,6	19,1	18,1	17,4	17,0	16,9	16,8	17,0	17,7
50	23,8	21,3	19,7	18,5	17,8	17,4	17,3	17,0	17,2	18,3
55	-	22,3	20,4	19,2	18,4	18,1	17,9	17,5	17,7	19,1
60	-	23,7	21,5	20,2	19,3	18,9	18,9	18,2	18,5	20,3
65	-	-	23,1	21,4	20,6	20,1	20,2	19,1	19,6	21,9
70	-	-	-	23,2	22,2	21,8	22,0	20,5	21,2	24,3
75	-	-	-	-	24,6	24,2	24,5	22,4	23,4	-
80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Montavimo kampas	Fotovoltinių saulės modulių orientacija									
	Rytai									
	10	20	30	40	-50	60	70	80	90	
0	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4
5	20,7	20,9	21,2	21,5	21,8	22,2	22,6	23,0	23,4	23,4
10	19,6	19,9	20,3	20,8	21,4	22,1	22,8	23,7	24,7	24,7
15	18,7	19,1	19,6	20,3	21,1	22,0	23,2	24,5	-	-
20	18,1	18,6	19,2	20,0	20,9	22,1	23,5	-	-	-
25	17,8	18,3	18,9	19,8	20,9	22,3	24,1	-	-	-
30	17,6	18,2	18,9	19,9	21,1	22,7	24,8	-	-	-
35	17,6	18,2	19,1	20,1	21,5	23,3	-	-	-	-
40	17,8	18,5	19,4	20,6	22,1	24,2	-	-	-	-

Fotovoltinės saulės elektrinės atsipirkimo laikotarpis esant vardiniam apkrovimo lygiui									
50	18,2	19,0	19,9	21,3	23,0	-	-	-	-
55	18,9	19,7	20,8	22,3	24,3	-	-	-	-
60	19,8	20,8	22,1	23,7	-	-	-	-	-
65	21,2	22,2	23,8	-	-	-	-	-	-
70	23,1	24,4	-	-	-	-	-	-	-
75	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	-	-	-	-	-	-	-	-	-
85	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Atlikus fotovoltinės saulės elektrinės su polikristaliniais saulės moduliais įrengimo investicijų atsipirkamumo skaičiavimus diskontuojant pinigų srautus, nustatyta investicijų atsipirkimo trukmė priklausomai nuo modulių montavimo kampo ir orientacijos. Skaičiavimai yra atvaizduoti dešimtaine išraiška. Trumpiausias investicijų laikotarpis (16,6 m.) yra pasiekiamas, kai saulės elektrinės fotovoltiniai saulės moduliai yra sumontuoti 35 laipsnių kampu ir nukreipti nuo pietų 30 laipsnių vakarų kryptimi. Atsipirkimo trukmė priimtina 117-oje pozicijų, atsipirkimo trukmė patenkinama 118-oje pozicijų, investicijos neatsiperka 126-ose pozicijose. Vidutinė investicijų atsipirkimo trukmė siekia 20,1 metų.

3.4.4. lentelė. Fotovoltinės saulės elektrinės (su monokristaliniais saulės moduliais) atsipirkimo laikotarpis esant vardiniam keitiklio apkrovimo lygiui, priklausomai nuo modulių posvyrio kampo ir orientacijos

Fotovoltinės saulės elektrinės atsipirkimo laikotarpis esant vardiniam apkrovimo lygiui										
Montavimo kampas	Fotovoltinių saulės modulių orientacija									
	Vakarai									Pietūs
	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	24,5	24,0	23,6	23,4	23,4	23,5	23,7
15	-	-	24,1	23,2	22,6	22,2	22,0	21,9	22,1	22,3
20	-	24,6	23,3	22,3	21,7	21,2	21,0	20,9	21,1	21,4
25	-	24,3	22,8	21,7	21,0	20,5	20,3	20,3	20,5	20,8
30	-	24,2	22,6	21,4	20,6	20,1	19,9	19,9	20,1	20,5
35	-	24,4	22,6	21,3	20,4	20,0	19,7	19,8	20,0	20,5
40	-	24,8	22,8	21,4	20,5	20,0	19,8	19,9	20,2	20,7
45	-	-	23,3	21,8	20,9	20,3	20,1	20,3	20,6	21,3
50	-	-	24,1	22,4	21,4	20,9	20,7	21,0	21,3	21,3
55	-	-	-	23,5	22,3	21,8	21,6	22,0	22,4	23,3

Fotovoltinės saulės elektrinės atsipirkimo laikotarpis esant vardiniam apkrovimo lygiui										
60	-	-	-	25,0	23,6	23,0	23,0	23,4	24,1	-
65	-	-	-	-	-	24,8	25,0	-	-	-
70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Montavi- mo kampas	Fotovoltinių saulės modulių orientacija									
	Rytai									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	24,1	24,6	-	-	-	-	-	-	-	-
15	22,7	23,3	24,2	-	-	-	-	-	-	-
20	21,9	22,6	23,5	24,7	-	-	-	-	-	-
25	21,4	22,1	23,1	24,4	-	-	-	-	-	-
30	21,2	21,9	23,0	24,5	-	-	-	-	-	-
35	21,2	22,0	23,3	24,9	-	-	-	-	-	-
40	21,4	22,5	23,8	-	-	-	-	-	-	-
45	22,0	23,2	24,6	-	-	-	-	-	-	-
50	23,0	24,3	-	-	-	-	-	-	-	-
55	24,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Analogiškai atlikti ir fotovoltinės saulės elektrinės su monokristaliniais saulės moduliais įrengimo investicijų atsipirkamumo skaičiavimai diskontuojant pinigų srautus. Investicijų laikotarpis trumpiausias (19,7 m.) tada, kai fotovoltiniai saulės elektrinės moduliai yra sumontuoti 35 laipsnių kampu ir nukreipti nuo pietų 30 laipsnių vakarų kryptimi. Atsipirkimo trukmė yra priimtina tik 6-ose pozicijose, atsipirkimo trukmė patenkinama – 115-oje pozicijų, investicijos neatsiperka 240-yje pozicijų. Vidutinė investicijų atsipirkimo trukmė siekia 22,4 metų. Investicijų atsipirkimo laikotarpis dėl didesnių pradinių investicijų yra ilgesnis lyginant su polikristaliniais saulės moduliais.

Norint nustatyti ekonomiškai optimalų keitiklio apkrovimo lygį, reikia surasti keitiklio apkrovimo lygio vertę, su kuria investicijų atsipirkimo laikotarpis yra trumpiausias. Saulės elektrinės

įrengimo investicijų atsipirkimo trukmė, kai keitiklis yra apkrautas ekonomiškai optimaliu lygiu, pateikta lentelėse Nr. 3.4.5. ir 3.4.6.

3.4.5. lentelė. Fotovoltinės saulės elektrinės (su polikristaliniais saulės moduliais) atsipirkimo laikotarpis lygis esant ekonomiškai optimaliam apkrovimo lygiui, priklausomai nuo modulių posvyrio kampo ir orientacijos

Fotovoltinės saulės elektrinės atsipirkimo laikotarpis esant optimaliam apkrovimo lygiui										
Montavimo kampas	Fotovoltinių saulės modulių orientacija									
	Vakarai									Pietūs
	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
0	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5
5	20,0	19,8	19,6	19,4	19,3	19,2	19,1	19,1	19,1	19,2
10	19,7	19,3	18,9	18,6	18,4	18,2	18,1	18,1	19,1	18,3
15	19,6	18,9	18,4	18,0	17,7	17,5	17,4	17,4	18,2	17,7
20	19,6	18,7	18,1	17,6	17,3	17,0	16,9	16,9	17,5	17,2
25	19,6	18,7	17,9	17,3	16,9	16,7	16,6	16,6	17,0	16,9
30	19,9	18,8	17,9	17,2	16,8	16,5	16,4	16,4	16,7	16,8
35	20,3	19,0	18,0	17,2	16,7	16,5	16,3	16,4	16,5	16,8
40	20,9	19,4	18,2	17,4	16,9	16,5	16,4	16,5	16,6	17,0
45	21,8	19,9	18,7	17,8	17,1	16,7	16,6	16,5	16,5	17,4
50	22,8	20,7	19,3	18,2	17,5	17,1	17,0	16,7	17,0	17,9
55	24,3	21,8	20,0	18,9	18,1	17,8	17,6	17,2	17,5	18,7
60	-	23,2	21,1	19,8	19,0	18,6	18,5	17,9	18,2	19,7
65	-	-	22,6	21,0	20,2	19,7	19,8	18,8	19,2	21,0
70	-	-	24,6	22,7	21,7	21,2	21,3	19,9	20,5	22,9
75	-	-	-	-	23,7	23,3	23,4	21,6	22,3	-
80	-	-	-	-	-	-	-	23,9	24,7	-
85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Montavimo kampas	Fotovoltinių saulės modulių orientacija									
	Rytai									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
0	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5
5	19,4	19,5	19,7	19,9	20,2	20,5	20,8	21,1	21,3	21,3
10	18,5	18,8	19,1	19,5	20,0	20,5	21,1	21,7	22,4	22,4
15	17,9	18,3	18,7	19,2	19,9	20,6	21,4	22,4	23,5	23,5
20	17,5	17,9	18,4	19,1	19,8	20,8	21,8	23,1	24,6	24,6
25	17,3	17,7	18,3	19,0	19,9	21,1	22,4	24,0	-	-
30	17,2	17,7	18,3	19,1	20,2	21,5	23,1	-	-	-
35	17,3	17,8	18,5	19,4	20,6	22,1	24,0	-	-	-
40	17,5	18,1	18,8	19,8	21,2	22,9	-	-	-	-

Fotovoltinės saulės elektrinės atsipirkimo laikotarpis esant optimaliam apkrovimo lygiui									
45	17,8	18,5	19,3	20,5	22,0	24,0	-	-	-
50	18,4	19,1	20,1	21,4	23,1	-	-	-	-
55	19,3	20,0	21,1	22,5	24,6	-	-	-	-
60	20,4	21,2	22,6	24,2	-	-	-	-	-
65	21,9	23,0	24,4	-	-	-	-	-	-
70	24,0	-	-	-	-	-	-	-	-
75	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	-	-	-	-	-	-	-	-	-
85	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Atlikus fotovoltinės saulės elektrinės su polikristaliniais saulės moduliais įrengimo investicijų atsipirkamumo skaičiavimus diskontuojant pinigų srautus pagal ekonomiškai optimaliausią apkrovimo lygį, nustatyta investicijų atsipirkimo trukmė priklausomai nuo modulių montavimo kampo ir orientacijos (skaičiavimai pateikti dešimtaine išraiška). Apkrovus fotovoltinės saulės elektrinės keitiklį ekonomiškai optimaliu lygiu, investicijų laikotarpis trumpiausias (16,3 m.) tada, kai fotovoltiniai saulės elektrinės moduliai yra sumontuoti 35 laipsnių kampu ir nukreipti nuo pietų 30 laipsnių vakarų kryptimi. Atsipirkimo trukmė yra priimtina 155-iose pozicijose, atsipirkimo trukmė patenkinama – 94-iose pozicijose, investicijos neatsiperka 112-oje pozicijų. Vidutinė investicijų atsipirkimo trukmė siekia 19,5 metų. Lyginant su polikristalinių modulių saulės elektrinės įrengimo investicijomis, kai keitiklis yra apkrautas vardiniu lygiu, atsipirkimo trukmė sumažėja vidutiniškai 0,6 metų.

3.4.6. lentelė. Fotovoltinės saulės elektrinės (su polikristaliniais saulės moduliais) atsipirkimo laikotarpis esant ekonomiškai optimaliam apkrovimo lygiui, priklausomai nuo modulių posvyrio kampo ir orientacijos

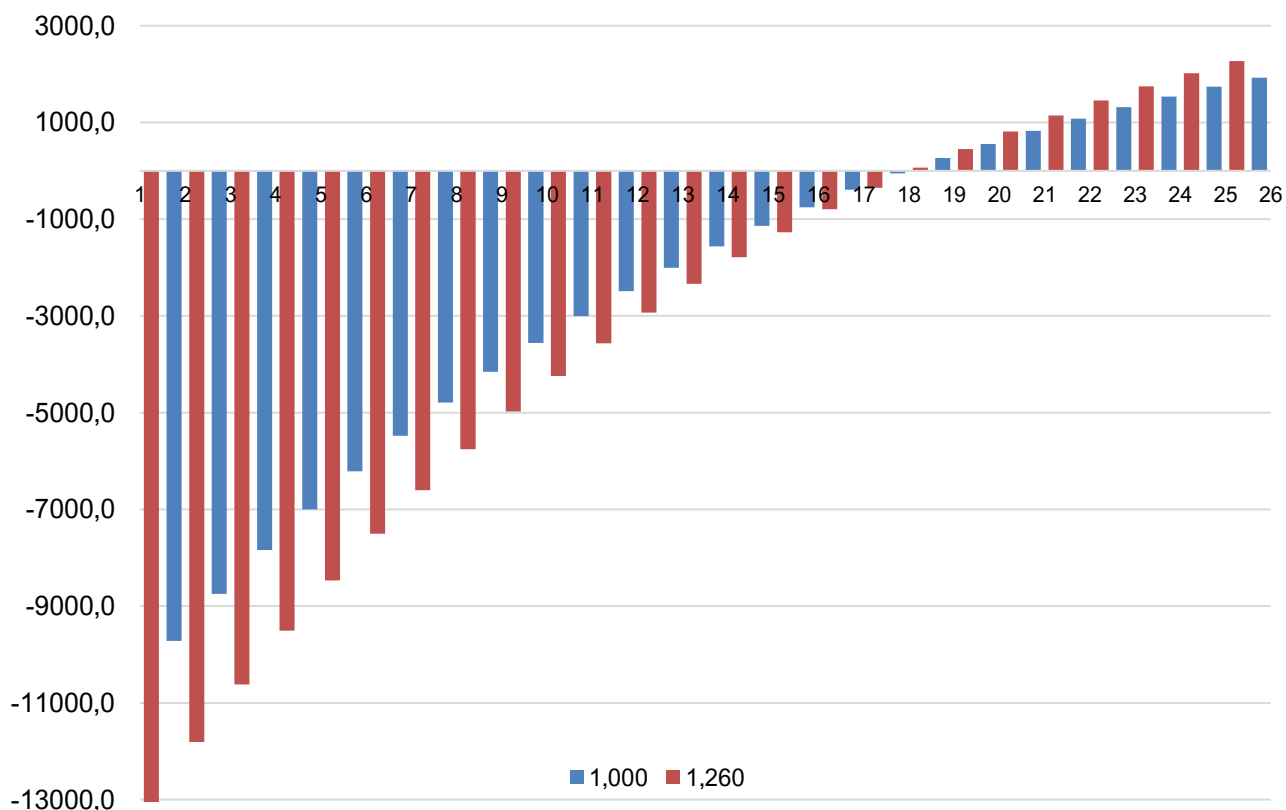
Fotovoltinės saulės elektrinės atsipirkimo laikotarpis esant optimaliam apkrovimo lygiui										
Montavimo kampas	Fotovoltinių saulės modulių orientacija									
	Vakarai									Pietūs
	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	24,7	24,3	24,1	23,8	23,6	23,5	23,5	23,6	23,7
10	24,6	23,9	23,2	22,7	22,3	22,0	21,8	21,8	21,9	22,1
15	24,3	23,2	22,4	21,7	21,2	20,8	20,7	20,6	20,8	21,0
20	24,2	22,8	21,7	20,9	20,4	20,0	19,8	19,8	20,0	20,3
25	24,3	22,6	21,4	20,5	19,9	19,5	19,3	19,3	19,5	19,8
30	24,5	22,6	21,2	20,2	19,6	19,2	19,0	19,0	19,2	19,6

Fotovoltinės saulės elektrinės atsipirkimo laikotarpis esant optimaliam apkrovimo lygiui										
35	25,0	22,8	21,2	20,2	19,5	19,1	18,9	19,0	19,2	19,6
40	-	23,2	21,5	20,4	19,6	19,2	19,0	19,1	19,4	19,8
45	-	24,0	22,0	20,8	19,9	19,5	19,3	19,5	19,8	20,3
50	-	-	22,9	21,4	20,5	20,0	19,9	20,1	20,4	20,3
55	-	-	24,0	22,4	21,3	20,9	20,7	21,0	21,4	22,1
60	-	-	-	23,7	22,5	22,0	21,9	22,2	22,8	23,6
65	-	-	-	-	24,2	23,5	23,6	24,0	24,9	-
70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Montavimo kampas	Fotovoltinių saulės modulių orientacija									
	Rytai									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	23,9	24,1	24,5	24,9	-	-	-	-	-	-
10	22,4	22,8	23,3	24,0	24,7	-	-	-	-	-
15	21,3	21,8	22,5	23,4	24,4	-	-	-	-	-
20	20,7	21,2	22,0	23,0	24,2	-	-	-	-	-
25	20,3	20,9	21,7	22,8	24,3	-	-	-	-	-
30	20,1	20,8	21,7	23,0	24,6	-	-	-	-	-
35	20,2	20,9	21,9	23,3	-	-	-	-	-	-
40	20,4	21,3	22,4	23,9	-	-	-	-	-	-
45	20,9	21,9	23,1	24,9	-	-	-	-	-	-
50	21,8	22,9	24,2	-	-	-	-	-	-	-
55	23,0	24,2	-	-	-	-	-	-	-	-
60	24,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

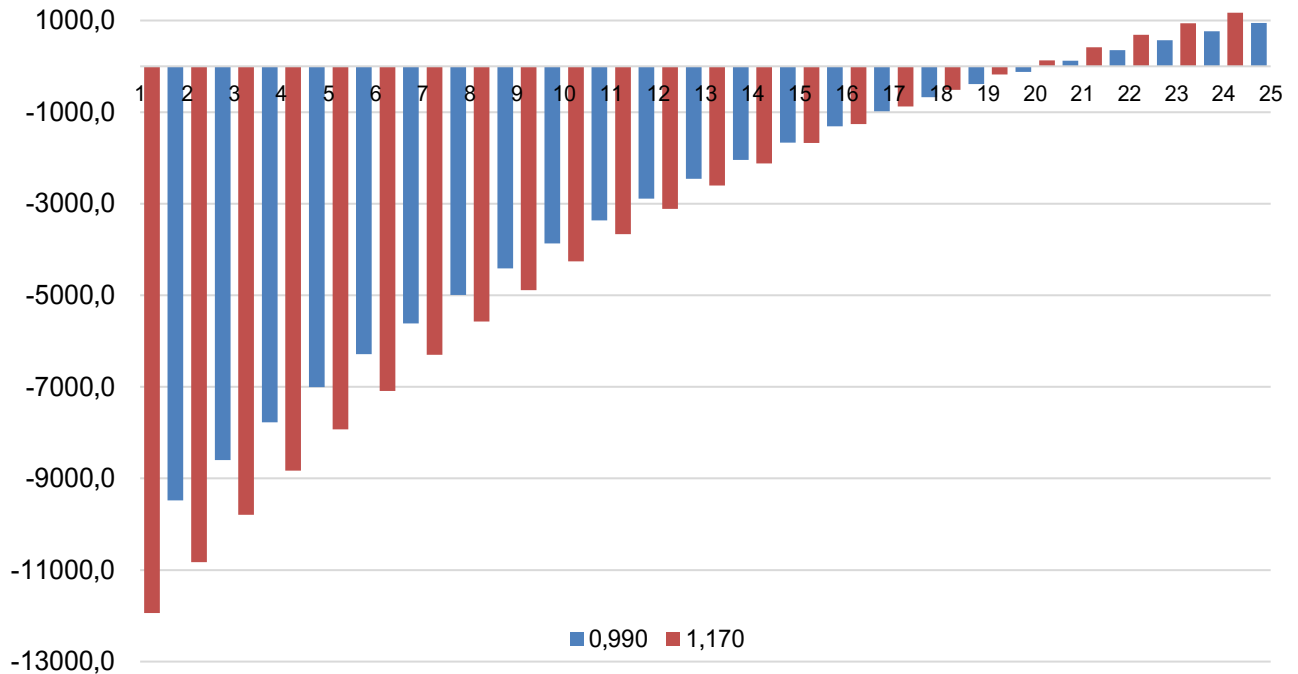
Analogiškai atlikti ir fotovoltinės saulės elektrinės su monokristaliniais saulės moduliais įrengimo investicijų atsiperkamumo skaičiavimai diskontuojant pinigų srautus pagal ekonomiškai optimaliausią apkrovimo lygį. Nustatyta investicijų atsipirkimo trukmė priklausomai nuo modulių montavimo kampo ir orientacijos (skaičiavimai pateikti dešimtaine išraiška). Apkrovus fotovoltinės saulės elektrinės keitiklį ekonomiškai optimaliu lygiu, investicijų laikotarpis trumpiausias (18,9 m.)

tada, kai fotovoltiniai saulės elektrinės moduliai yra sumontuoti 35 laipsnių kampu ir nukreipti nuo pietų 30 laipsnių vakarų kryptimi. Atsipirkimo trukmė yra priimtina 33-ose pozicijose, atsipirkimo trukmė patenkinama – 129-iose pozicijose, investicijos neatsiperka 199-iose pozicijose. Vidutinė investicijų atsipirkimo trukmė siekia 21,8 metų. Lyginant su monokristalinių modulių saulės elektrinės įrengimo investicijomis, kai keitiklis yra apkrautas vardiniu lygiu, atsipirkimo trukmė sumažėja vidutiniškai 0,4 metų.

Fotovoltinės saulės elektrinės sistemų investicijų atsipirkimo laikotarpiai diskontuojant pinigų srautus dabartine verte pateikti paveiksluose 3.4.2. ir 3.4.3. Šiose priklausomybėse yra lyginamos sistemos, kuriose yra keitiklis apkrautas vardiniu lygiu ir ekonomiškai optimaliu. Pinigų srautai skaičiuojami, kuomet fotovoltinių saulės modulių pozicija yra orientuota pietų kryptimi ir pakreipti 35° laipsniais nuo horizonto.



3.4.2. pav. Fotovoltinės saulės elektrinės su polikristaliniais moduliais, pinigų srautai diskontuojant pinigų srautus dabartine verte



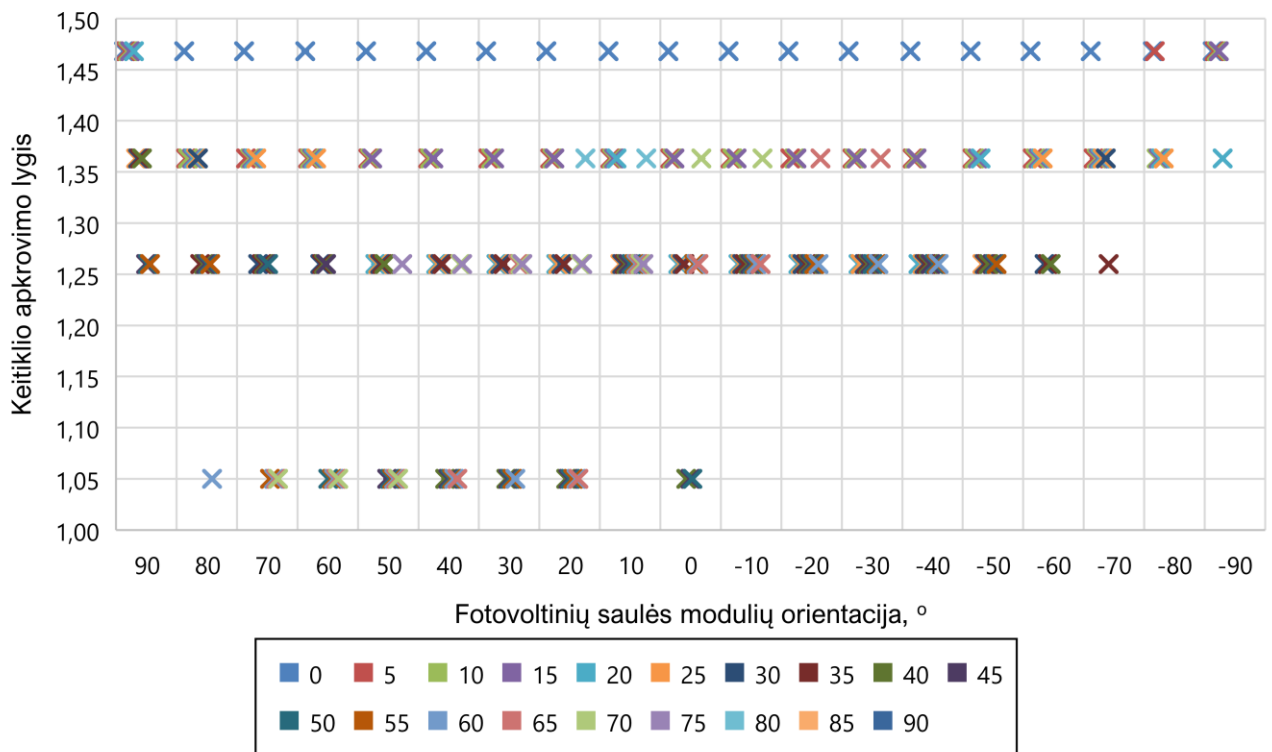
3.4.3. pav. Fotovoltinės saulės elektrinės su monokristaliniais moduliais, pinigų srautai diskontuojant pinigų srautus dabartine verte

Iš priklausomybių pateiktų paveiksluose 3.4.2 ir 3.4.3 galima aiškiai nustatyti, kad fotovoltinės saulės elektrinės sistemos ekonomiškai optimalaus lygiu pradinės investicijos yra ženkliai didesnės lyginant su vardiniu lygiu sistemos. Ekonomiškai optimaliu lygiu apkrovus keitiklį, sistemos atsiperkamumo laikotarpis sumažėja dėl išaugusios elektros energijos gamybos – didesnių gaunamų pajamų. Gaunami didesni pinigų srautai, kuomet yra parinktas optimalus keitiklio lygis ne tik padengia didesnes pradines investicijas, tačiau padidina likutinę investicijų vertę.

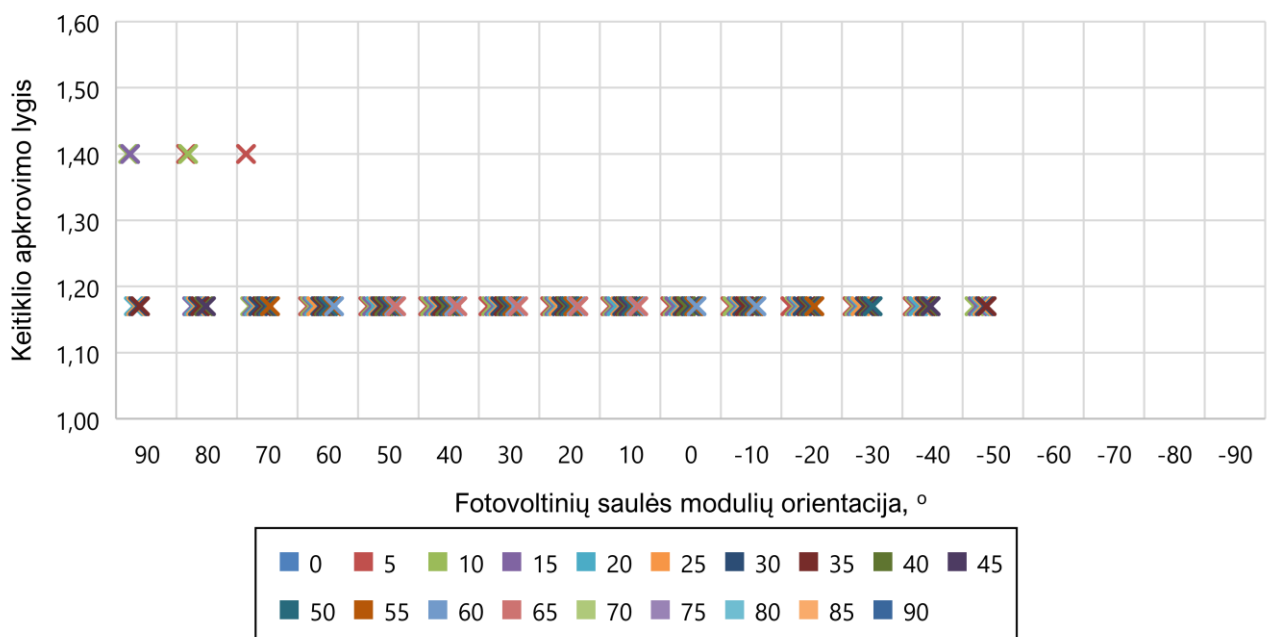
Ekonomiškai optimalaus fotovoltinės saulės elektrinės lygio priklausomybė nuo fotovoltinių saulės modulių posvyrio kampo bei orientacijos pateikta paveiksluose 3.4.4. ir 3.4.5.

Ekonomiškai optimalus keitiklio apkrovimo lygis saulės elektrinėje su polikristaliniais saulės moduliais glaudžiai susijęs su per metus elektrinėje pagamintu elektros energijos kiekiu. Ekonominio atsiperkamumo laikas trumpiausias tada, kai esant mažai generacijai keitiklis yra apkraunamas dideliu lygiu. Esant dideliame saulės elektrinės našumui (optimaliai apšvitai), greičiausias investicijų atsiperkamumas pasiekiamas keitiklį apkraunant nominaliu arba artimu nominaliam lygiu.

Ekonomiškai optimalus keitiklio apkrovimo lygis saulės elektrinėje su monokristaliniais saulės moduliais nėra susijęs su per metus pagamintu elektros energijos kiekiu. Beveik kiekvienoje fotovoltinių saulės modulių pozicijoje optimalus keitiklio apkrovimo lygis yra 1,17 karto.



3.4.4. pav. Ekonomiškai optimalus keitiklio apkrovimo lygis priklausomai nuo polikristalinių fotovoltinių saulės modulių orientacijos ir posvyrio kampo



3.4.5. pav. Ekonomiškai optimalus keitiklio apkrovimo lygis priklausomai nuo monokristalinių fotovoltinių saulės modulių orientacijos ir posvyrio kampo

IŠVADOS

1. Atlikus literatūros analizę nustatyta, kad nėra išsamių fotovoltinės saulės elektrinės tyrimų atsižvelgiant į Lietuvos geografines sąlygas. Atliekant literatūros analizę apžvelgti fotovoltinių saulės modulių bei keitiklių veikimo principai, tipai ir pagrindiniai parametrai. Išskirti pagrindiniai parametrai, darantys įtaką bendram fotovoltinės saulės elektrinės našumui t. y. keitiklio apkrovimo lygiui.
2. Tyrimui atlikti sudarytas matematinis modelis, leidžiantis imituoti fotovoltinės saulės elektrinės veikimą. Matematinis modelis leidžia atlikti tyrimą keičiant (imituojant) saulės poziciją, fotovoltinių modulių technologiją ir fotovoltinės saulės elektrinės keitiklio darbo parametrus.
3. Išanalizavus realius ilgamečių matavimų duomenis konkrečioje vietovėje, nustatytas nesimetriškas apšvitos pasiskirstymas vakarų-rytų kryptimi. Didžiausios apšvitos vertės nustatytos ant pietų-pietvakarių kryptimi orientuotos plokštumos, kai fotovoltinių saulės modulių posvyrio kampas yra tarp 30-40 laipsnių nuo horizonto.
4. Atlikus fotovoltinės saulės elektrinės tyrimą, nustatytos optimalios keitiklio lygio vertės įvertinant geografinę padėtį, modulių posvyrio nuo horizonto kampą, modulių orientaciją ir modulių gamybos technologiją. Optimalios keitiklio apkrovimo lygio vertės įvertintos atskirai pagal gamybos našumą ir pagal ekonominį atsiperkamumą.
 - 4.1. Vertinant tik didžiausią elektros energijos generacijos našumą iš instaliuotosios galios, keitiklio apkrovimo lygis yra atvirkščiai proporcingas maksimaliai apšvitai t. y. kuo didesnė apšvita į pakreiptą plokštumą, tuo naudingiau keitiklį apkrauti vardiniu lygiu. Optimalus saulės elektrinės su polikristaliniais moduliais keitiklio apkrovimo lygis nėra stipriai priklausantis modulių pakreipimo: saulės modulių orientacijai esant artimai pietų kryptčiai, optimalus apkrovimo lygis yra vienetinis; fotovoltinių saulės modulių orientacijai žymiai pakrypus nuo pietinės krypties, optimalus apkrovimo lygis – 1,05. Optimalus saulės elektrinės su monokristaliniais saulės moduliais keitiklio apkrovimo lygis labai priklauso nuo fotovoltinių saulės modulių pozicijos: modulių orientacijai esant efektyviausiai (orientaciją artimai pietų kryptčiai, modulių posvyrio kampas apie 30 laipsnių nuo horizonto), optimalus keitiklio apkrovimo lygis – 0,99; fotovoltinių modulių orientacijai tolstant nuo pietinės ir efektyviausios pozicijos, optimalus apkrovimo lygis taip pat auga nuo 1,05 iki 1,11.
 - 4.2. Optimalų keitiklio apkrovimo lygį vertinant pagal trumpiausią ekonominį laikotarpį diskontuojant pinigų srautus, keitiklio apkrovimo lygis atvirkščiai proporcingas per metus

pagamintai elektros energijai t. y. kuo didesnis gamybos našumas, tuo mažesniu lygiu yra apkraunamas fotovoltinės saulės elektrinės keitiklis. Saulės elektrinės su polikristaliniais saulės moduliais pozicijai esant efektyviausiai, keitiklio apkrovimo lygis yra lygus 1,26, o fotovoltinių saulės modulių pozicijai tolstant nuo efektyviausios, optimalus keitiklio apkrovimo lygis išauga nuo 1,36 iki 1,47. Optimalus saulės elektrinės su monokristaliniais saulės moduliais keitiklio apkrovimo lygis nėra labai ryškiai susijęs su fotovoltinių saulės modulių pozicija, išskyrus keletą atvejų (kai saulės modulių pozicija neefektyvi), dauguma atvejų optimalus keitiklio apkrovimo koeficientas yra lygus 1,17.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. G. Petrauskas, V. Adomavičius. Saulės energijos naudojimas elektrai gaminti. Kaunas, 2012. p. 40-43.
2. Boyle G. Renewable Energy. Power for a sustainable future. *Oxford University Press in association with The Open University*. 2004. p. 315-352 *Interaktyvus*. Prieiga per internetą: <http://ukcatalogue.oup.com/product/9780199545339> [žiūrėta 2017 gruodžio 18 d.]
3. Huan-Liang, T.; Ci-Siang, T., Yi-Jie, S. Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK. *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*. 2008. *Interaktyvus*. Prieiga per internetą: <https://pdfs.semanticscholar.org/2fdd/c5cdada7b44a598b3a4a76de52825350dd5d> [žiūrėta vasario 12 d.]
4. Srushti, R. C.; Uttam B. V. Incremental Conductance MPPT Technique For PV System, *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*. 2013. *Interaktyvus*. Prieiga per internetą: <http://www.rioi.com/open-access/incremental-conductance-mppt-techniquefor-pv-system.php?aid=41625> [žiūrėta 2018 sausio 1 d.]
5. Roberto S. Faranda , Hossein Hafezi, Sonia Leva, Marco Mussetta and Emanuele Ogliari, The Optimum PV Plant for a Given Solar DC/AC Converter. 2015. *Interaktyvus*. Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/1996-1073/8/6/4853/pdf> [žiūrėta 2018 sausio 5 d.]
6. Jayanta Deb Mondol, Yigzaw G. Yohanis, Brian Norton. Optimal sizing of array and inverter for grid-connected photovoltaic systems. 2006. *Interaktyvus*. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/232191603_Optimal_sizing_of_array_and_inverter_for_grid-connected_photovoltaic_systems [žiūrėta 2018 sausio 28 d.]
7. Mondol, Yigzaw G. Yohanis, Brian Norton. Optimising the economic viability of grid-connected photovoltaic systems. *Applied Energy*. 2009. *Interaktyvus*. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/236877129_Optimising_the_economic_viability_of_grid-connected_photovoltaic_systems [žiūrėta 2018 sausio 27 d.]
8. G. Notton, V. Lazarov., L. Stoyanov, Optimal sizing of a grid-connected PV system for various PV module technologies and inclinations, inverter efficiency characteristics and locations. 2009. *Interaktyvus*. Prieiga per internetą:

- <https://econpapers.repec.org/RePEc:eee:renene:v:35:y:2010:i:2:p:541-554> [žiūrėta 2018 sausio 20 d.]
9. Song Chen, Peng Li, David Brady, Brad Lehman, Determining the optimum grid-connected photovoltaic inverter size. *Solar Energy*. 2013. p. 96-116. *Interaktyvus*. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/256854851_Determining_the_optimum_grid-connected_photovoltaic_inverter_size [žiūrėta 2018 sausio 18 d.]
 10. Photovoltaic geographical information system. *Interaktyvus*. Prieiga per internetą: http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_download/map_index.html [žiūrėta 2018 m. sausio 27 d.]
 11. Reda, I.; Nrel, A.A. Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications (Revised). *Sol. Energy* 2004. p. 577–589 *Interaktyvus*. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X0300450X> [žiūrėta 2018 sausio 30 d.]
 12. Holtz, J., 1992. Pulsewidth modulation-a survey, in PESC '92 Record. *23rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference IEEE*. *Interaktyvus*. Prieiga per internetą: <http://www.ece.ualberta.ca/~dinavahi/ece633/Download/Papers/holtz92> [žiūrėta 2018 vasario 10 d.]
 13. Rashid, M.. *Power Electronics Handbook*, Elsevier: Oxford, 3rd ed, 2011. *Interaktyvus*. Prieiga per internetą: <https://www.elsevier.com/books/power-electronics-handbook/rashid/978-0-12-382036-5> [žiūrėta 2018 vasario 16 d.]
 14. Vidutinė metinė oro temperatūra Lietuvoje. Standartinė klimato norma, 1981–2010 m. Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba. *Interaktyvus*. Prieiga per internetą: <http://www.meteo.lt/lt/oro-temperatura> [žiūrėta 2018 m. kovo 30 d.]
 15. Vidutinis metinis vėjo greitis Lietuvoje. Standartinė klimato norma, 1981–2010 m. Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba. *Interaktyvus*. Prieiga per internetą: <http://www.meteo.lt/lt/vejas> [žiūrėta 2018 m. kovo 30 d.]
 16. Reindl, D.T.; Beckman, W.A.; Duffie, J.A. Evaluation of hourly tilted surface radiation models. *Sol. Energy*. 1990. p. 9-17 *Interaktyvus*. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X9090061G> [žiūrėta 2018 m. balandžio 5 d.]
 17. Hay, J.E.; Davies, J.A. Calculation of the Solar Radiation Incident on an Inclined Surface. In *Proceedings of the First Canadian Solar Radiation Data Workshop, Toronto, ON, Canada, 17–19 April 1978*. *Interaktyvus*. Prieiga per internetą:

- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X85901720> [žiūrėta 2018 m. balandžio 5 d.]
18. Reindl, D.T.; Beckman, W.A.; Duffie, J.A. Diffuse fraction corrections. *Sol. Energy* 1990. p. 1-7. *Interaktyvus*. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214014696> [žiūrėta 2018 m. balandžio 5 d.]
19. Huan-Liang, T.; Ci-Siang, T., Yi-Jie, S. 2008 Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK, Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, 2008. p. 7. *Interaktyvus*. Prieiga per internetą: <https://pdfs.semanticscholar.org/2fdd/c5cdada7b44a598b3a4a76de52825350dd5d> [žiūrėta 2018 m. balandžio 16d.]
20. Notton, G. Thermal Models for Photovoltaic Modules in the BIPV applications, Researchgate, 2010. p. 5. *Interaktyvus*. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/229076422_Thermal_Models_for_Photovoltaic_Modules_in_the_BIPV_applications [žiūrėta balandžio 20 d.]
21. Laura, M.; Giorgio, B.; David, M.; Matteo Del B. 2014. BiPV system performance and efficiency drops: overview on PV module temperature conditions of different module types, International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry September 2013, Freiburg, Germany. *Interaktyvus*. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/229044367_Performance_Monitoring_of_Different_PV_Technologies_at_a_PV_Field_in_Northern_Italy [žiūrėta 2018 m. balandžio 25 d.]
22. Holman, J. P. 1992. p. 713. Heat transfer: London; Sydney: McGraw-Hill. *Interaktyvus*. Prieiga per internetą: [http://dl.iranidata.com/book/daneshgahi/%5BJack_P._Holman%5D_Heat_Transfer,_Tenth_Edition_\(www.IraniData.com\).pdf](http://dl.iranidata.com/book/daneshgahi/%5BJack_P._Holman%5D_Heat_Transfer,_Tenth_Edition_(www.IraniData.com).pdf) [žiūrėta 2018 m. balandžio 30 d.]
23. Thijs, D.; Bert, B.; Jan C. 2010. Convective heat transfer coefficients for exterior building surfaces: Existing correlations and CFD modelling, Energy Conversion and Management. p. 20. *Interaktyvus*. Prieiga per internetą: <https://pdfs.semanticscholar.org/4573/056a9e72a2542cddf5974f74923cb776b20e.pdf>
24. Visuomeniniai tarifai AB „Energijos skirstymo operatorius“ nuo 2018 m. sausio 1 d. *Interaktyvus*. Prieiga per internetą: <https://www.regula.lt/elektra/Puslapiai/tarifai/visuomeniniai-tarifai-esogaliojantys> [žiūrėta 2018 balandžio 16 d.]

25. Renewable energy discount rate survey results – 2017. *Interaktyvus*. Prieiga per internetą: <http://www.cleanenergypipeline.com/Resources/CE/ResearchReports/renewable-energy-discount-rate-survey-2017.pdf> [žiūrėta gegužės 1 d.]
26. Mathieu David, Philippe Lauret, John Boland. Evaluating tilted plane models for solar radiation using comprehensive testing procedures, at a southern hemisphere location .*Interaktyvus*. Prieiga per internetą: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00917856/document> [žiūrėta 2018 balandžio 12d.]