



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

ELEKTROTECHNIKOS KATEDRA

Ernestas Zimkus

PLONAPLĖVELINIŲ FOTOVOLTINIŲ MODULIŲ TYRIMAS
ANALYSIS OF THE PHOTOVOLTAIC THIN FILM MODULES

Baigiamasis magistro darbas

Elektros energetikos sistemų inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H62002

Moderniosios elektros energetikos inžinerijos specializacija

Elektronikos ir elektros inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2013

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

ELEKTROTECHNIKOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

Ernestas Zimkus

PLONAPLĖVELINIŲ FOTOVOLTINIŲ MODULIŲ TYRIMAS
ANALYSIS OF THE PHOTOVOLTAIC THIN FILM MODULES

Baigiamasis magistro darbas

Elektros energetikos sistemų inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H62002

Moderniosios elektros energetikos inžinerijos specializacija

Elektronikos ir elektros inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

habil. dr. prof. Saulius Balevičius

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas Lekt. Vaida Buivydienė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2013

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROTECHNIKOS KATEDRA

Elektronikos ir elektros inžinerijos studijų kryptis
Elektros energetikos sistemų inžinerijos studijų programa,
valstybinis kodas 621H62002
Moderniosios elektros energetikos inžinerijos specializacija

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

.....Nr.
Vilnius

Studentui Ernestui Zimkui

Baigiamojo darbo tema: PLONAPLĖVELINIŲ FOTOVOLTINIŲ MODULIŲ TYRIMAS

patvirtinta 2011m. Lapkričio 8d. dekanų potvarkiu Nr. 256el.

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2013 m. Birželio 1 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Įvertinti gamtinių sąlygų ir modulių posvyrio kampo įtaką įvairių plonaplėvelinių fotovoltinių baterijų našumui Rytų Lietuvoje.

1. Išanalizuoti skirtingais posvyrio kampais įtvirtintų fotovoltinių modulių našumą;
2. Nustatyti modulių posvyrio kampo įtaką metiniam energijos generavimui;
3. Ištirti skirtingų gamintojų modulių specifinę generuojamą energiją esant vienodam posvyrio kampui;
4. Palyginti skirtingų gamintojų modulių energijos generavimą įvairiais metų laikotarpiais;
5. Nustatyti įvairių saulės baterijų našumo rodiklius esant skirtingai apšvietai.

Vadovas
(Parašas)

habil. dr. prof. Saulius Balevičius
(Moksl. laipsnis/pedag.vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

.....
(Parašas)

.....
(Vardas, pavardė)

.....
(Data)

Vilniaus Gedimino Technikos Universitetas
Elektronikos fakultetas
Elektrotechnikos katedra

ISBN ISSN
Egz. sk.
Data-....-....

Elektros energetikos sistemų inžinerija studijų programos baigiamasis magistro darbas
Pavadinimas **Plonaplėvelinių fotovoltinių modulių tyrimas**

Autorius **Ernestas Zimkus**

Vadovas habil. dr. prof. **Saulius Balevičius**

Kalba

☒ X

lietuvių



užsienio

Anotacija

Buvo ištirta meteorologinių sąlygų įtaka UAB „Arginta“ įrengtų plonaplėvelinių fotovoltinių baterijų našumams. Išanalizuoti 4 gamintojų saulės baterijų masyvų našumai, esant skirtingiems posvyrio kampams. Sukaupiti duomenis ir atlikti specifinės energijos, efektyvumų ir našumo rodiklių skaičiavimai. Nustatytas optimalus saulės baterijų posvyrio kampas parodyta, kad Rytų Lietuvos sąlygomis žiemos mėnesiais jis yra 20°, o vasarą 35°. Esant šiam kampui, iš 4 tirtų skirtingų gamintojų baterijų, didžiausius našumus pasiekė „Sharp NA-F128(GK)“ baterijos.

Darbą sudaro: įvadas, literatūros šaltinių apžvalga, tiriamos sistemos parametrai, saulės baterijų našumai prie skirtingų posvyrio kampų, duomenų bazės analizė, teoriniai našumo skaičiavimai, generuojamos galios priklausomybė nuo apšvietos tyrimas, išvados, literatūros šaltiniai. Darbo apimtis – 57 psl. teksto be priedų, 47 iliustr., 6 lent., 35 bibliografiniai šaltiniai.

Prasminiai žodžiai: Fotoelementai, plonaplėveliniai, posvyrio kampas, specifinė energija, našumo rodiklis, masyvų našumas, galia.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Electronics
Department of Electrical Engineering

ISBN ISSN
Copies No.
Date-....-....

Electrical Energetics Systems Engineering study programme master thesis

Title: **Analysis of the Photovoltaic Thin Film Modules**

Author **Ernestas Zimkus** Academic supervisor prof.dr. habil. **Saulius Balevičius**

Thesis language

☒ Lithuanian

☐ Foreign (English)

Annotation

Main goal of this master thesis was to study the effects of meteorological conditions on photovoltaic systems performance installed at company Arginta. Research was done on performance of 4 solar panels produced by different manufacturers. The panels were installed at 4 different light incident angles. Data obtained from PV arrays allowed to calculate specific yields, array efficiencies and performance ratios. From these data, optimal light incident angle was found for East Lithuania region. During winter and summer time optimal angle for PV arrays was 20° and 35° respectively. Best performance from 4 different types of panels installed at optimal angles was achieved using Sharp NA-F128 (GK) arrays.

Structure of the thesis: introduction, literature review, installed PV system parameters, batteries performance under different light incident angles, data analysis, calculations of the performance, analysis of power dependence vs. irradiation, conclusions and references.

Thesis consists of: 57 p. of text without appendixes, 47 pictures, 6 tables, 35 references.

Keywords: Photovoltaic, thin films, incident angle, specific yield, performance ratio, array yield, power, irradiation.

Vilniaus Gedimino technikos universiteto egzaminų
sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo bei gynimo
organizavimo tvarkos aprašo 2011–2012 m. m.
1 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Ernestas Zimkus, 20111490

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Elektros energetikos sistemų inžinerija, EEIfmu–11

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)

SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2013 m. Birželio 3 d.
(Data)

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „**Plonaplėvelinių fotovoltinių modulių tyrimas**“ patvirtintas 2011 m. Lapkričio 8 d. potvarkiu Nr. 256el, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Mano darbo vadovas prof. habil. dr. Saulius Balevičius.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

(Parašas)

ERNESTAS ZIMKUS
(Vardas ir pavardė)

TURINYS

IVADAS.....	11
1. INFORMACINIŲ ŠALTINIŲ APŽVALGA	12
1.1. Saulės energija.....	12
1.2. Saulės baterijų charakteristikos	14
1.3. Fotovoltinių elementų technologija.....	18
1.4. Silicio saulės elementai	19
1.5. Monokristaliniai saulės elementai	21
1.6. Polikristaliniai saulės elementai	22
1.7. Plonaplėveliniai saulės elementai.....	23
1.8. Amorfinio silicio (a-Si) technologija.....	24
1.9. Kadmio telūrido (CdTe) technologija	26
1.10. Vario–indžio (CIS arba CIGS) technologija	28
2. TYRIAMOS SISTEMOS PARAMETRAI	30
2.1. Saulės baterijų energijos generavimo priklausomybė nuo modulių posvyrio kampo	33
2.2. Apšvietos matavimai	39
2.3. Saulės baterijų energijos gamybos ir efektyvumų tyrimas	42
2.4. Aukštos nuolatinės įtampos poveikis keitiklio naudingumui	50
2.5. Masyvų generuojamos galios priklausomybė nuo apšvietos.....	52
IŠVADOS	54
LITERATŪRA.....	55

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Atmosferos storis AM1 ir AM1.5 (Brooks, Dunlop, 2012)	12
1.2 pav. Saulės spinduliuotės spektras Žemės orbitoje už jos atmosferos ribų (AM0) ir jai praėjus pusantros atmosferos storio sluoksni (AM1.5) (Nelson, 2007)	12
1.3 pav. Šviesos kelias per atmosferą (DGS, 2008).....	13
1.4 pav. Tiesioginės ir išsklaidytos spinduliuotės energijos dienos sumos Berlyne (Brooks, Dunlop, 2012)	13
1.5 pav. Pagrindinės saulės baterijų sistemų rūšys (DGS, 2008).....	14
1.6 pav. Skirtingi saulės baterijų prijungimo būdai (EPIA, 2011).....	15
1.7 pav. „Sharp NA–F128(GK)“ I–V ir P–V priklausomybė nuo apšvietos (Sharp, 2011)	15
1.8 pav. I–V charakteristikos esant skirtingoms modulio temperatūroms (Brooks, Dunlop, 2012)...	16
1.9 pav. I–V ir P–V kristalinio silicio saulės baterijos charakteristikos (Solmetric, 2011)	17
1.10 pav. Užpildo koeficientas voltamperinėje charakteristikoje (Solmetric, 2011).....	17
1.11 pav. Fotovoltinio elemento sudėtis (Aldous, Yewdall, Ley, 2012)	18
1.12 pav. Skirtingų puslaidininkių medžiagų draustinės juostos plotis (Goetzberger, Hoffmann, 2005)	19
1.13 pav. Įvairių saulės elementų našumai, pasiekti laboratorijose (NREL, 2013).....	20
1.14 pav. Monokristalinių elementų galimos formos (DGS, 2008).....	21
1.15 pav. Monokristalinis modulis ir elemento struktūra (NREL, 2013)	21
1.16 pav. Polikristalinis saulės modulis (DGS, 2008)	22
1.17 pav. Saulės elemento puslaidininkinės medžiagos storio palyginimas, medžiagų sąnaudos ir energijos poreikis gaminant plonaplėvelines (kairėje) ir kristalinio silicio (dešinėje) baterijas (DGS, 2008)	23
1.18 pav. „Uni-Solar“ 3 sluoksnių fotovoltinių modulių technologija (Uni-Solar, 2007).....	25
1.19 pav. „Uni-Solar“ 3 sluoksnių fotovoltinių modulių sugeriamos šviesos spektras (Uni-Solar, 2007)	25
1.20 pav. a–Si efektyvumo įgijimas/praradimas esant skirtingai modulio temperatūrai (Schwabe, Jansson, 2009).....	26
1.21 pav. Kadmio telūrido modulio sandara (Meyers, Peter V, 2006)	27
1.22 pav. Skirtingų technologijų baterijų santykinis saulės spektro panaudojimas (AUOptronics, 2011)	28
1.23 pav. Draustinės juostos plotis skirtinguose fotovoltinių modulių technologijose (Gerngrob, Revere, 2011).....	29
1.24 pav. CIGS modulio sandara ir molekulinė struktūra (Gerngrob, Revere, 2011)	29
2.1 pav. „SMA Sunny Boy 2500HF“ naudingumo kreivės (SMA, 2013).....	31

2.2 pav. Tiriamos sistemos struktūrinė schema	33
2.3 pav. Saulės kelias virš horizonto skirtingais mėnesiais (Oregon University, 2008).....	34
2.4 pav. Saulės baterijų optimalaus posvyrio kampo diagrama su vidutine mėnesine apšvieta Vilniuje, 2012 metais	35
2.5 pav. Saulės baterijų energijos generavimas kWh/kW _p esant skirtingam posvyrio kampui (pietinė orientacija)	36
2.6 pav. Saulės baterijų energijos generavimas kWh/kW _p esant skirtingam posvyrio kampui (šiaurinė orientacija)	37
2.7 pav. Metinis energijos generavimas kWh/kW _p , esant skirtingam posvyrio kampui (minusinis kampas reiškia masyvai yra orientuoti į šiaurę, teigiamas kampas reiškia pietinę orientaciją).....	38
2.8 pav. Apšvietos parametrų registravimo įrangos sutrikimai	39
2.9 pav. 2012 m. Gegužės mėn. apšvieta Wh/m ² , 0° posvyrio kampas.....	40
2.10 pav. 2013–02–25d apšvieta iš 2 jutiklių, duomenų registravimo intervalas 5 min.....	41
2.11 pav. Mėnesinė skirtingų saulės baterijų santykinė energijos gamyba ir apšvieta, kai modulių posvyrio kampas 0°	43
2.12 pav. Mėnesinė skirtingų saulės baterijų santykinė energijos gamyba ir apšvieta, kai modulių posvyrio kampas 35°	44
2.13 pav. Saulės baterijų specifinė metinė energijos gamyba kWh/kW _p (2012-05-01 – 2013-04-30) (posvyrio kampas 35°)	45
2.14 pav. Skirtingų gamintojų saulės baterijų masyvų sistemų efektyvumai, esant 0° laipsnių posvyrio kampui.....	46
2.15 pav. Saulės baterijų masyvų sistemų efektyvumai, esant 10° ir 20° posvyrio kampui. „Schuco MPE 90 Al“ baterijų posvyrio kampas 10°, kitų modulių 20°	47
2.16 pav. Saulės baterijų masyvų sistemų efektyvumai, esant 35° posvyrio kampui.....	47
2.17 pav. Schuco saulės baterijų masyvų sistemos efektyvumai prie skirtingų posvyrio kampų.(-10° reiškia, kad masyvas orientuotas į šiaurę).....	48
2.18 pav. Skirtingų masyvų našumo rodikliai, esant 0° posvyrio kampui.....	49
2.19 pav. Skirtingų masyvų našumo rodikliai, esant 20° posvyrio kampui („Schuco MPE 90 Al“ masyvo posvyrio kampas 10°)	50
2.20 pav. 2013-02-25 d. masyvų generuojamos nuolatinės įtampos, posvyrio kampas 35°	51
2.21 pav. 2013-02-25 d. baterijų masyvų keitiklių efektyvumai, posvyrio kampas 35°	51
2.22 pav. „Sharp NA-F128(GK)“ baterijų masyvo, srovės priklausomybė nuo apšvietos, kai posvyrio kampas 35°	52
2.23 pav. Generuojamos galios priklausomybė nuo apšvietos	52

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Rinkoje esančių skirtingų technologijų modulių našumai (EPIA, 2011).....	20
2.1 lentelė. Įrengtų fotovoltinių saulės elementų techniniai parametrai (AVANCIS, 2011; Sharp, 2011; Schuco, 2010; Solartechnics, 2010).....	30
2.2 lentelė. Keitiklio pagrindiniai parametrai (SMA, 2013).....	31
2.3 lentelė. Įrengti moduliai prie skirtingų posvyrio kampų.....	32
2.4 lentelė. „Sunny Webbox“ registruojami keitiklių matavimo kanalai (SMA, 2013)	32
2.5 lentelė. „Sensorbox“ apšvietos matavimo įrenginio techniniai parametrai (SMA, 2010).....	39

IVADAS

Fotovoltinė industrija pastarąjį dešimtmetį sparčiai plėtojama Europoje. Pastaraisiais metais ši atsinaujinančios energetikos rūšis atsirado ir Lietuvoje. Norint vystyti šią energetikos rūšį, reikalingi tikslūs duomenys apie meteorologinių sąlygų įtaką fotovoltinių jėgainių našumui Lietuvoje. Taip pat svarbu žinoti, kokius našumus galima pasiekti saulės jėgainėse šiomis sąlygomis.

UAB „Arginta“ viena iš pirmųjų įmonių Lietuvoje, pradėjusių tirti ir plėsti atsinaujinančios energijos galimybes. „Argintoje“ šiuo metu įrengta ir veikia 150 kWp galios saulės elektros jėgainė, veikianti kaip industrinė saulės elektros laboratorija. Nuo 2010 m. rugsėjo 9 d. pagal sutartį su „Lesto“ ji atiduoda saulės elektrą į Lietuvos elektros tinklą.

Šiuo metu industrinę laboratoriją sudaro:

- 6 skirtingų gamintojų saulės baterijos;
- 12 skirtingų tipų fotovoltiniai moduliai;
- sumontuoti ant 7 skirtingų rūšių montavimo sistemų;
- 7 saulę sekančių sistemų;
- viso 34 skirtingos fotovoltinės sistemos.

Laboratorijoje sumontuotos šių žinomų gamintojų saulės baterijos: „Schuco“, „Avancis“, „Sharp“, „Uni-Solar“, „Saint-Gobian“, „Solartechnics“. Todėl atsivėrė unikali galimybė ištirti plonaplėvelinių fotovoltinių modulių, pagamintų naudojant a-Si, CIS, α -Si/ μ -Si technologijas, eksploatacijos efektyvumą Lietuvos sąlygomis. Tai buvo pagrindinis šio magistro darbo tikslas. Buvo ištirti atskiri saulės baterijų masyvai, sudaryti iš šių modulių: „Schuco MPE 90 Al“, „Avancis PowerMax Smart 120“, „Sharp NA-F128(GK)“ ir „SolarTechnics SN44“.

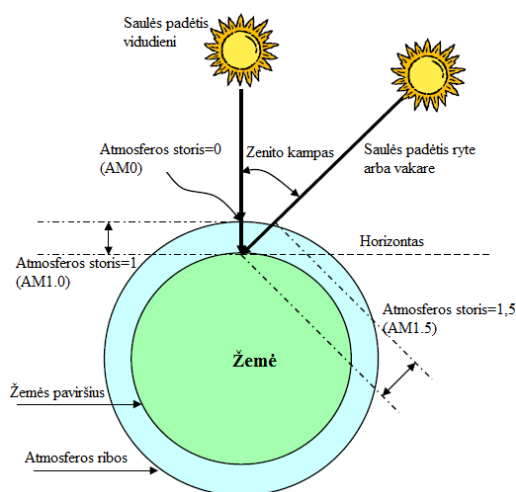
Tyrimai buvo atliekami su 4 saulės baterijų masyvais kurių kiekvienas buvo sudarytas iš vienos rūšies modulių. Visų vieno gamintojo masyvų bendra galia buvo vienoda, o tyrimai atlikti esant 4 skirtingiems posvyrio kampams. Duomenys buvo gaunami iš specialiai laboratorijoje įrengtos saulės baterijų ir metrologinių duomenų registravimo sistemos, kurio pagalba buvo registruojama modulio ir aplinkos temperatūra, masyvų pagamintas energijos kiekis bei jų momentinės galios. Jie buvo panaudoti analizuojant masyvų našumą esant skirtingai apšvietai, įvertinti sistemos galios nuostoliai, nustatyti našumo rodikliai.

Pagrindinis duomenų šaltinis buvo www.sunnyportal.com portalas, kuris automatiškai būdu kaupia duomenis iš saulės elektrinės SMA gamintojo keitiklių ir kuriame buvo sukaupti visų metų saulės elektrinės duomenys esant 1 valandos fiksavimo intervalui. Sistemos efektyvumo skaičiavimuose buvo panaudoti duomenys, gauti tiesiogiai iš keitiklių trumpo laikotarpio metu esant 5 min registravimo intervalui.

1. INFORMACINIŲ ŠALTINIŲ APŽVALGA

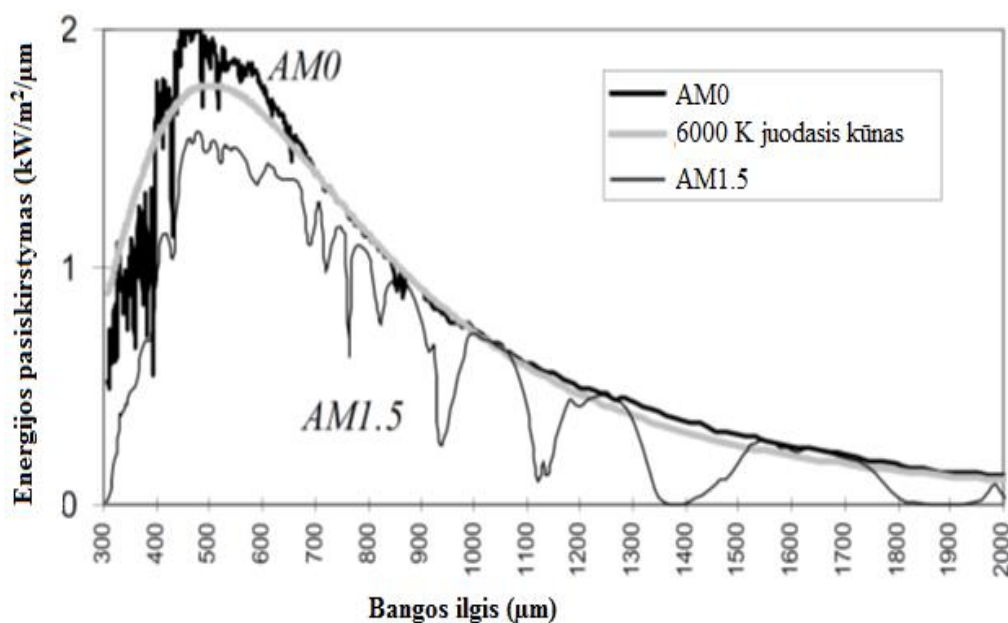
1.1. Saulės energija

Žemę saulės spinduliuojama energija daugiausiai pasiekia kaip elektromagnetinės bangos, kurių ilgiai apima diapazoną nuo $0,2 \mu\text{m}$ iki $3 \mu\text{m}$. Už atmosferos ribų tų bangų galios tankis yra apie 1400 W/cm^2 , o jų pasiskirstymas atitinka vadinamąjį AM0 spektrą. Atmosferoje spinduliuotė yra sklaidoma ir sugerama, todėl žemės paviršių pasiekęs jos spektras pasikeis ir priklausys nuo vietovės geografinės platumos bei jos aukščio virš jūros lygio. Lietuvoje Saulės spinduliuotės spektras atitinka vadinamąją AM 1.5 priklausomybę (žiūrėti 1.1 pav.). Spinduliuotei tenka pereiti oru kelių apytikriai lygų 1,5 atmosferos storio, o žemės paviršių pasiekiantis galios tankis – apie 1000 W/m^2 (Krotkus, 2008).



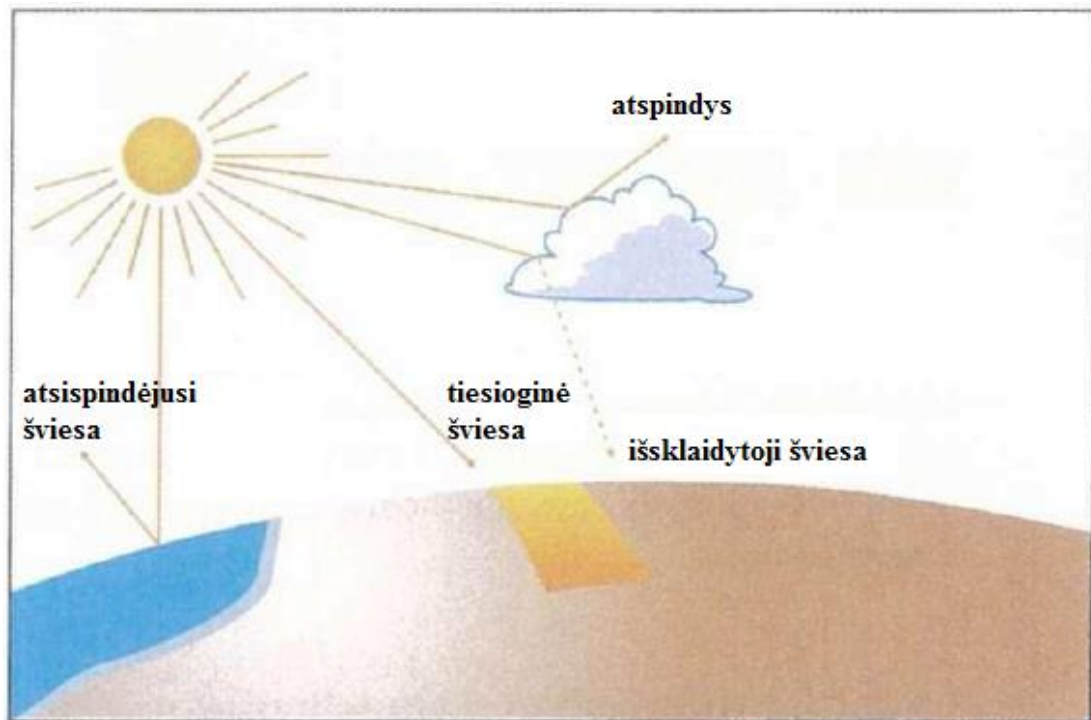
1.1 pav. Atmosferos storis AM1 ir AM1.5 (Brooks, Dunlop, 2012)

Žemę pasiekiantys saulės spinduliuojamų elektromagnetinių bangų spektrai yra pavaizduoti 1.2 pav.



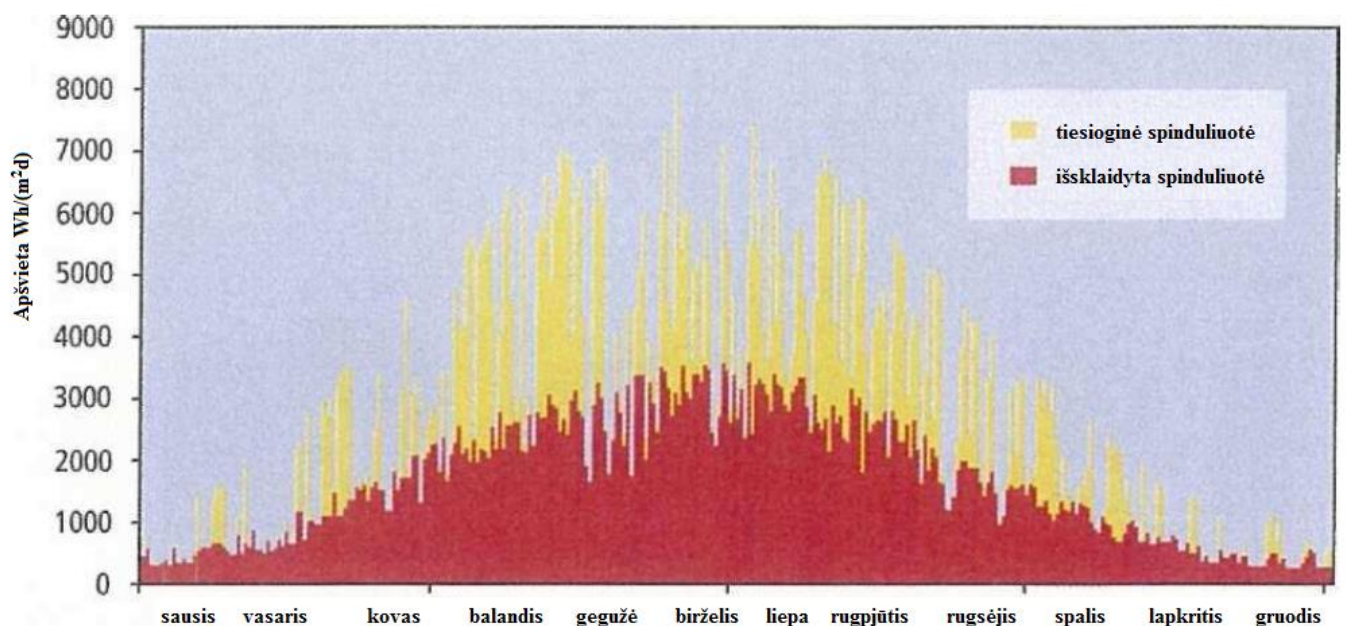
1.2 pav. Saulės spinduliuotės spektras Žemės orbitoje už jos atmosferos ribų (AM0) ir jai praėjus pusantros atmosferos storio sluoksniui (AM1.5) (Nelson, 2007)

Žemę pasiekę spinduliai yra 2 rūšių (žr. 1.3 pav.): tiesioginė ir išsklaidyta šviesa. Tiesioginė šviesa sukelia apšviesto objekto šešėlį, o išsklaidyta – neturi pastovios krypties, nes yra atsispindėjusi nuo atmosferos, debesų (Brooks, Dunlop, 2012).



1.3 pav. Šviesos kelias per atmosferą (DGS, 2008)

Priklausomai nuo debesuotumo ir saulės padėties (valandos), spinduliuojama galia ir santykis tarp tiesioginės bei išsklaidytos šviesos gali labai smarkiai skirtis.



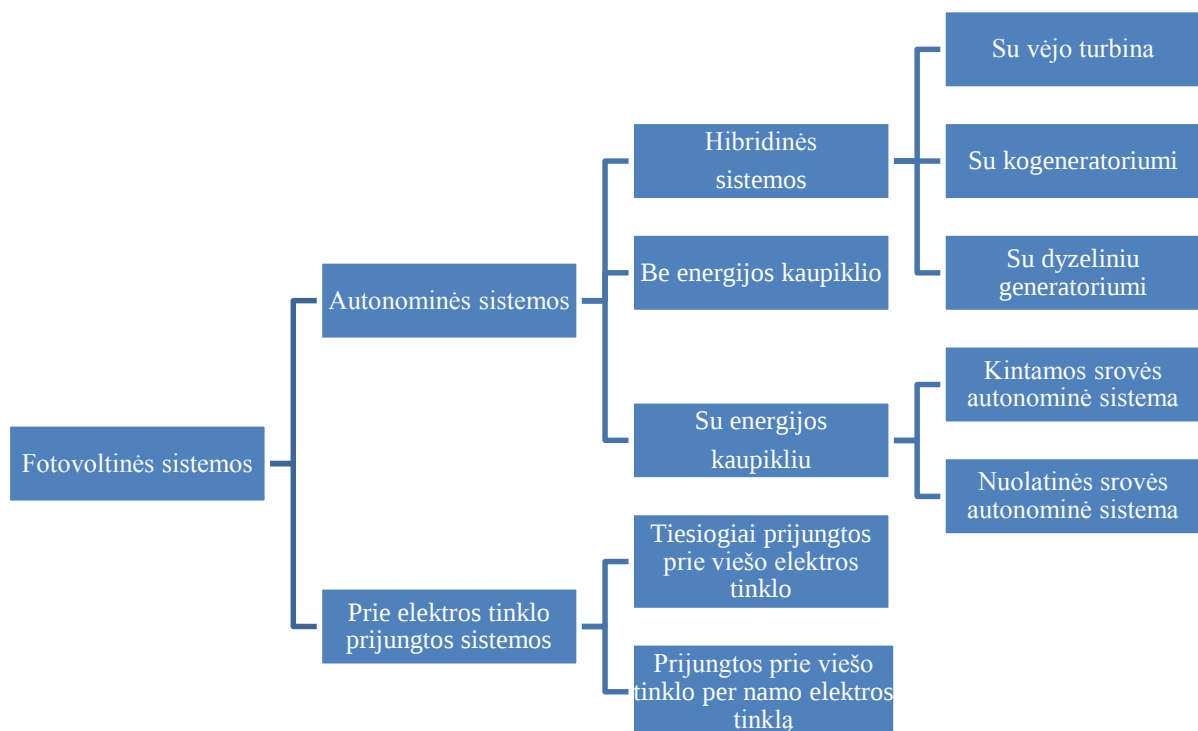
1.4 pav. Tiesioginės ir išsklaidytos spinduliuotės energijos dienos sumos Berlyne (Brooks, Dunlop, 2012)

1.4 pav. pavaizduoti tiesioginės ir išsklaidytos spinduliuotės dieninius energijos kiekius 1 metų laikotarpyje – Berlyne. Esant giedram orui, tiesioginė saulės spinduliuotė sudaro didžiąją dalį visos krintančios saulės energijos. Esant dideliame debesuotumui (žiema), apšvietos pagrindiniu šaltinis tampa išsklaidyta šviesa. Vokietijoje, 60 proc. apšvietos sudaro būtent išsklaidytoji apšvieta. Lietuvoje šis skaičius turi būti panašus, dėl panašių klimatinių sąlygų. Tokiomis sąlygomis tikslinga parinkti saulės baterijas, kurios efektyviausiai sugeba perdirbti išsklaidytą saulės energiją į elektrą (DGS, 2008).

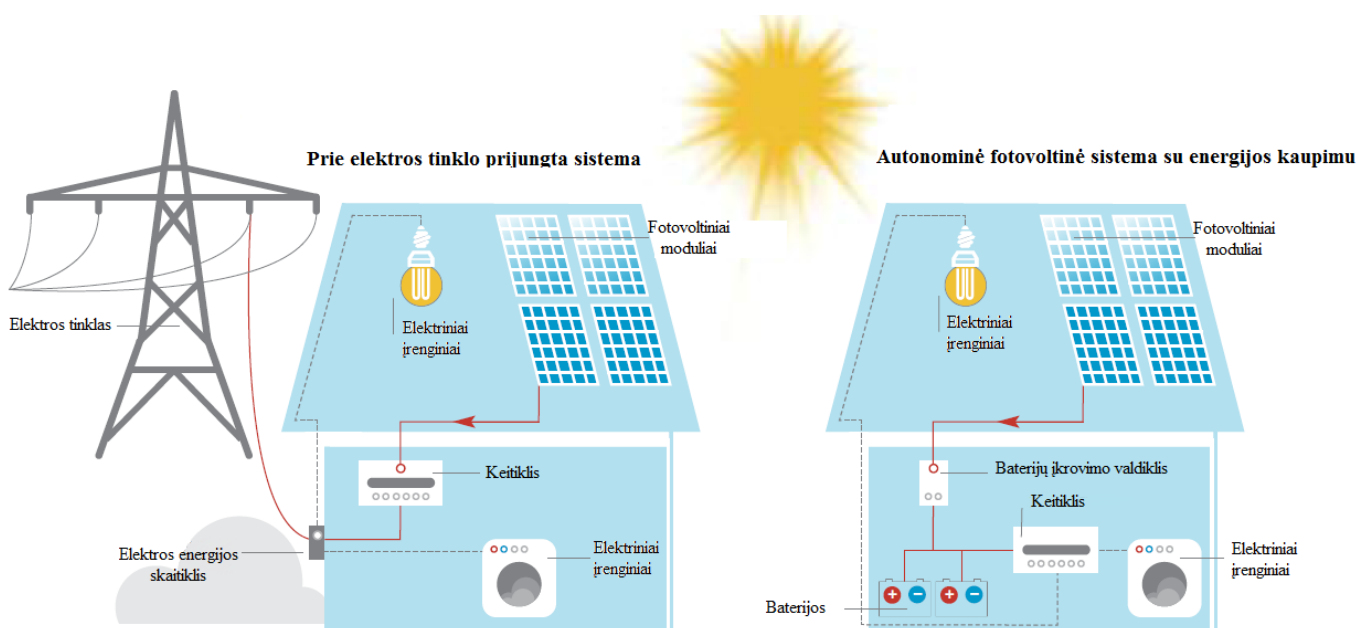
1.2. Saulės baterijų charakteristikos

Saulės baterijų sistemos gali būti skirstomos į 2 kategorijas: autonominės sistemos (t.y. neprijungtos prie elektros tinklo) ir sistemos prijungtos prie bendro elektros perdavimo tinklo. Autonominės sistemos gali būti integruotos kartu su kitais energijos šaltiniais, tokiomis kaip vėjo turbinomis arba dyzeliniu generatoriumi. Dėl to jos dažnai vadinamos hibridinėmis. Energijos akumuliacija yra pagrindinis tokių sistemų skirtumas. Hibridinėje arba autonominėje sistemoje energija gali būti saugoma baterijose. Bendras elektros energijos perdavimo tinklas atlieka energijos saugojimo ir perdavimo funkcijas prijungtai fotovoltinei jėgainei.

Fotovoltinės elektrinės gali aprūpinti elektros energija individualius namus, kaimus, atokiose vietose įrengtas vandens siurbines ir vandens valymo įrenginius (DGS, 2008). 1.5 pav. pateikta tokių sistemų klasifikacija.



1.5 pav. Pagrindinės saulės baterijų sistemų rūšys (DGS, 2008)

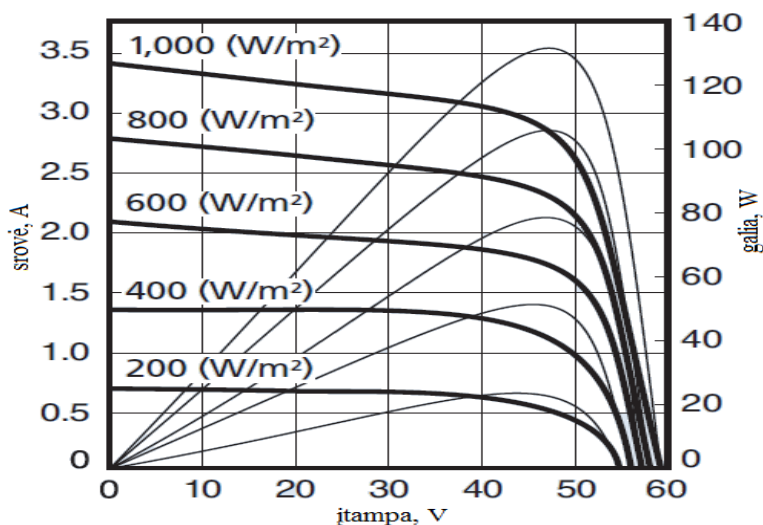


1.6 pav. Skirtingi saulės baterijų prijungimo būdai (EPİA, 2011)

1.6 pav. pateikti 2 skirtingi saulės baterijų pagrindiniai prijungimo būdai. Planuojant įrengti saulės baterijų sistemas, svarbu teisingai parinkti fotovoltinius modulius. Reikia atsižvelgti į plotą, kurį užims sistema ir ar įmanoma sistema įrengti optimaliu posvyrio kampu.

• Apšvietos poveikis

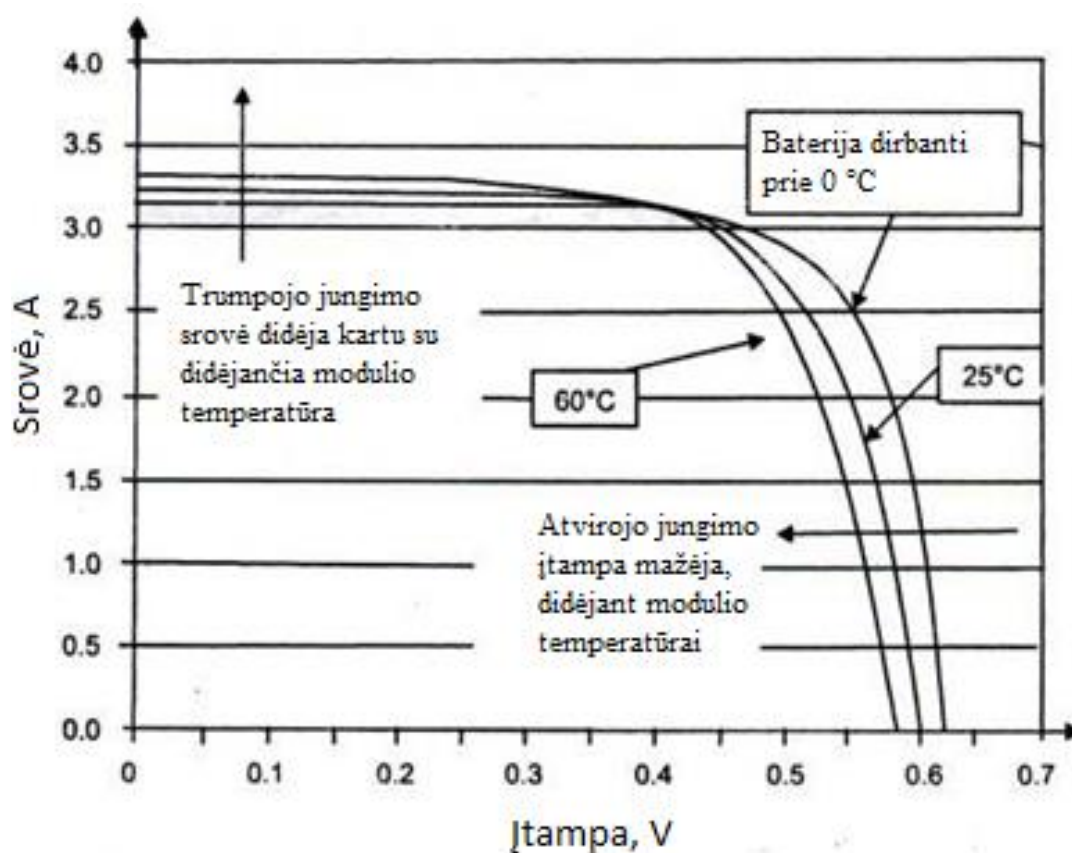
Fotovoltinio modulio generuojama galia priklauso nuo krintančios apšvietos į modulio paviršių, kuri apskaičiuojama kaip šviesos galios į ploto vienetą ir matuojama W/m^2 . Modulio trumpojo jungimo srovė (I_{sc}) yra tiesiogiai proporcinga apšvietai. Atvirojo jungimo įtampa (V_{oc}) didėja eksponentiškai link maksimalios reikšmės. V_{oc} kinta nežymiai kintant šviesos intensyvumui (Woodbank, 2006). Tokia priklausomybė pavaizduota 1.7 pav.



1.7 pav. „Sharp NA-F128(GK)“ I-V ir P-V priklausomybė nuo apšvietos (Sharp, 2011)

- **Temperatūros poveikis**

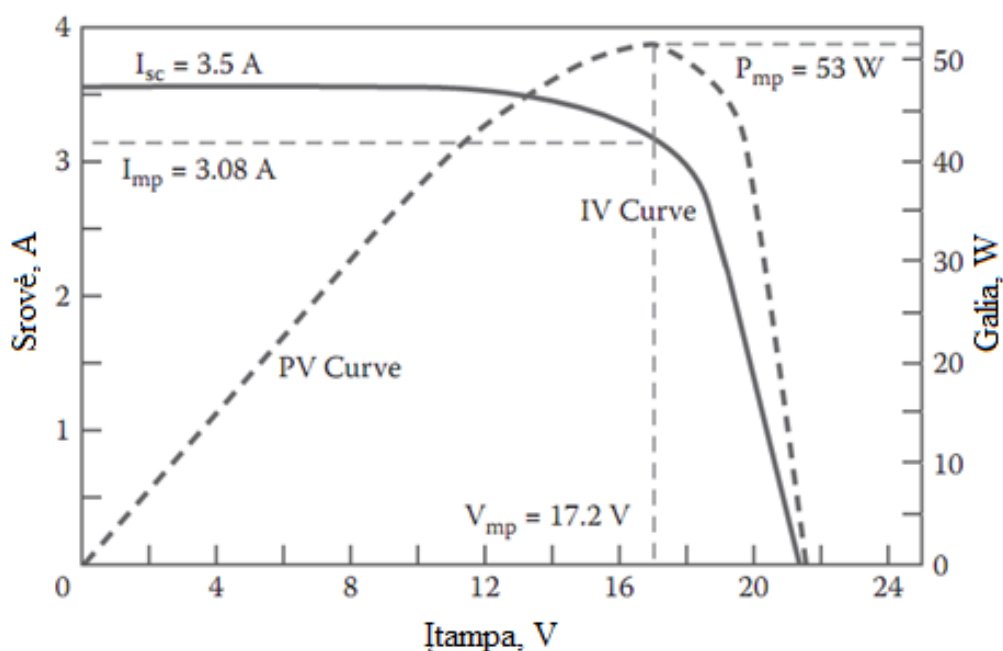
Fotovoltinio modulio temperatūra pagrįsde priklauso nuo aplinkos temperatūros. Trumpojo jungimo srovė šiek tiek padidėja, kai modulio temperatūra viršija standartinę modulio testavimo temperatūrą. Saulės baterijų gamintojai nurodo visas elektrines modulio charakteristikas esant 25 °C temperatūrai. Priešingai elgiasi atvirojo jungimo įtampa (V_{oc}), kuri yra stipriai paveikiama viršijus 25 °C modulio temperatūrą. Didėjanti temperatūra padidina „tamsinės srovės“ vertę ir todėl sumažina V_{oc} . Srovės padidėjimas yra daug kartų mažesnis, negu įtampos sumažėjimas. Dėl šios priežasties krinta saulės baterijos galingumas be to sumažėja ir modulio efektyvumas bei gyvavimo laikotarpis (Woodbank, 2006; Brooks, Dunlop, 2012).



1.8 pav. I–V charakteristikos esant skirtingoms modulio temperatūroms (Brooks, Dunlop, 2012)

- **Maksimalios galios taškas**

Volt–amperinė (I – V) saulės baterijų masyvo arba modulio charakteristika apibūdina jo energijos konvertavimo galimybes esant tam tikro momento apšvietai ir temperatūrai. I priklausomybės nuo V kreivė susieja įtampą ir srovę, taip parodydama masyvo galimybę generuoti elektros energija, jeigu išlaikoma pastovi apšvieta ir temperatūra. 1.9 pav. parodyta standartinė I – V kreivė ir jai atitinkanti P – V (čia P –galia) kreivė.

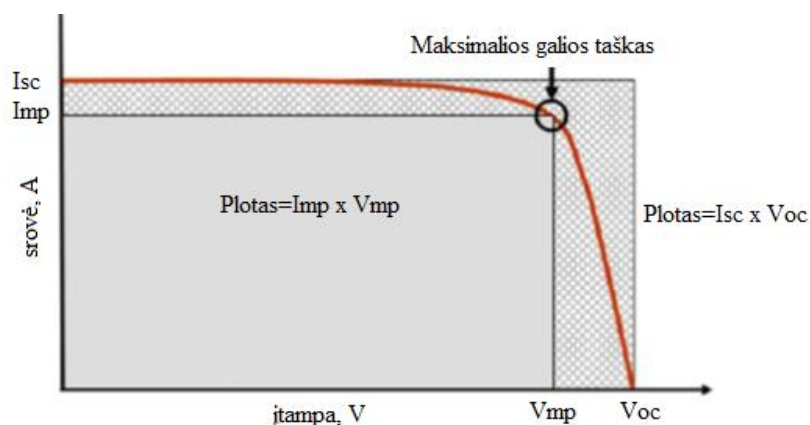


1.9 pav. I–V ir P–V kristalinio silicio saulės baterijos charakteristikos (Solmetric, 2011)

I – V kreivė prasideda nuo trumpojo jungimo srovės (I_{sc}) esant labai mažai įtampai (praktiškai lygiai 0) ir baigiasi ties atviro jungimo įtampa (V_{oc}), esant labai mažai srovei. I – V charakteristikos maksimalios galios taškas yra sankirtoje tarp I_{mp} ir V_{mp} . Veikiančioje fotovoltinėje elektrinėje siekiama visada likti tam tikrame I – V kreivės taške, kuriame yra gaunama maksimali DC galia (Solmetric, 2011). Viena iš pagrindinių keitiklio užduočių yra nuolatos keisti apkrovą taip kad ši sąlyga būtų išpildyta.

- **Užpildo koeficientas**

Užpildo koeficientas (FF) yra svarbus saulės baterijų parametras. Šis parametras apibūdina didžiausią kvadrato plotą, kuris telpa po fotovoltinio modulio voltamperine kreive. Šis dydis tiesiogiai susietas su generuojamo galingumo verte. Kuo didesnis koeficientas, tuo didesnis - modulio/masyvo galingumas. 1.10 pav. iliustruoja užpildo koeficientą, kuris yra apibrėžiamas kaip dviejų galių santykis:



1.10 pav. Užpildo koeficientas voltamperinėje charakteristikoje (Solmetric, 2011)

$$FF = \frac{I_{mp} \cdot V_{mp}}{I_{sc} \cdot V_{oc}}; \quad (1.1)$$

Čia: I_{mp} ir V_{mp} – didžiausia srovė ir įtampa, prie maksimalaus galingumo;
 I_{sc} ir V_{oc} – trumpojo jungimo srovė ir atvirojo jungimo įtampa.

- **Fotovoltinio modulio efektyvumas (η_{PV})**

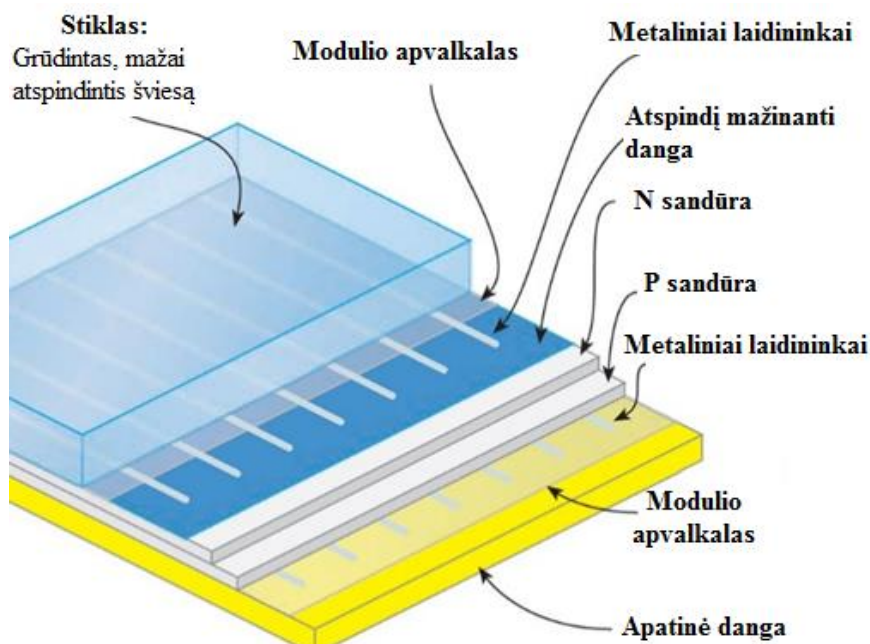
Saulės elemento, modulio efektyvumas parodo pajėgumą paversti saulės spindulius į elektros energiją. Efektyvumo vertė ypač svarbi jėgainėse, kurios yra montuojamas ant pastatų stogų. Didesnis efektyvumas leidžia išgauti didesnę elektrinės galią esant tam pačiam modulių plotui. Matematiškai tai yra išreiškiama kaip elektrinės generuojama galia esant tam tikram modulių paviršiaus plotui (Honsberg, Bowden, 2012). Šis dydis gali būti apskaičiuojamas pasinaudojus 1.2 formule:

$$\eta_{PV_{max}} = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{G \cdot A} \cdot 100\%; \quad (1.2)$$

Čia: G – apšvieta, esant standartinėmis testavimo sąlygomis, yra 1000 W/m^2 ;
 A – Fotovoltinio modulio plotas.

1.3. Fotovoltinių elementų technologija

Fotovoltiniai elementai gaminami iš puslaidininkių sukuriant p–n sandūrą. Daugiausia saulės elementų gamyboje yra naudojamas silicis.



1.11 pav. Fotovoltinio elemento sudėtis (Aldous, Yewdall, Ley, 2012)

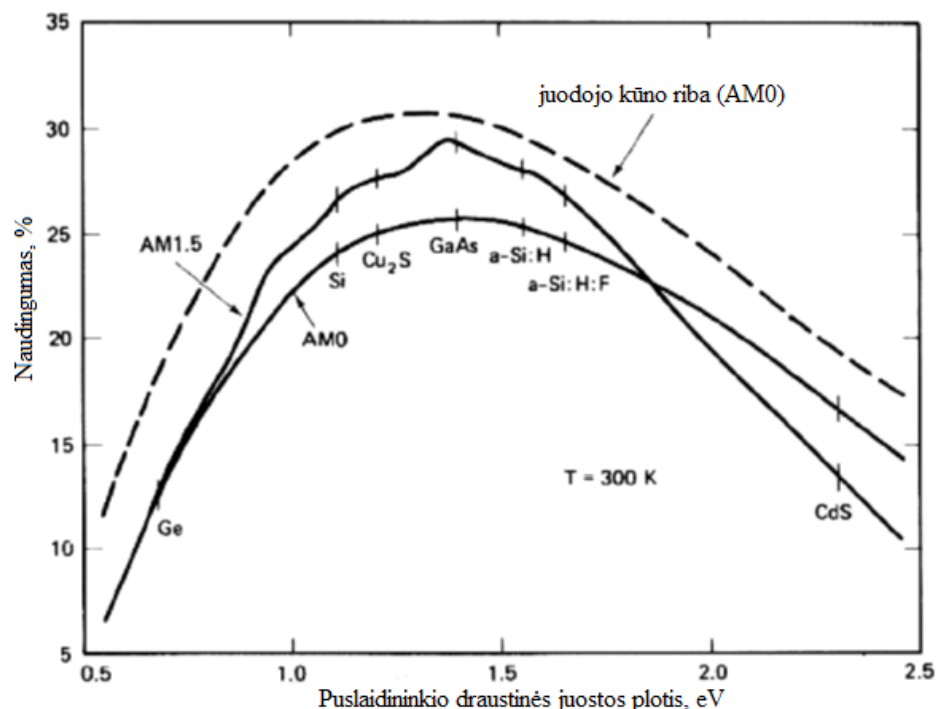
Šie elementai gali būti dviejų rūšių: tūriniai kristalinio silicio arba plonaplėveliniai. Gali būti ir elementai sudaryti iš kelių sandūrų. Ši technologija leidžia padidinti elementų efektyvumą ir pagerinti sugeriamo spektro ruožo plotį. Technologija leidžia konvertuoti beveik visą saulės spinduliuotės spektro ruožą į elektros energiją (Honsberg, Bowden, 2012; Aldous, Yewdall, Ley, 2012).

1.11 pav. pavaizduotos tipinio saulės elemento dalys.

- **Viršutinė danga:** gaminama iš stiklo, kuris turi labai mažą atspindžio koeficientą.
- **P–N sandūra:** pagrindinė saulės elemento dalis, kuri generuoja elektros energiją.
- **Modulio apvalkalas:** naudojama siekiant tvirtai surišti saulės baterijos elementus, taip suteikiant mechaninį atsparumą. Apvalkalas turi būti atsparus temperatūros svyravimams, skaidri, atspari vandeniui.
- **Apatinis paviršius:** galinė elemento dalis, kuri gali būti gaminama iš „Tedlar“ polimero arba stiklo. Šis paviršius turi turėti mažą šiluminę varžą.

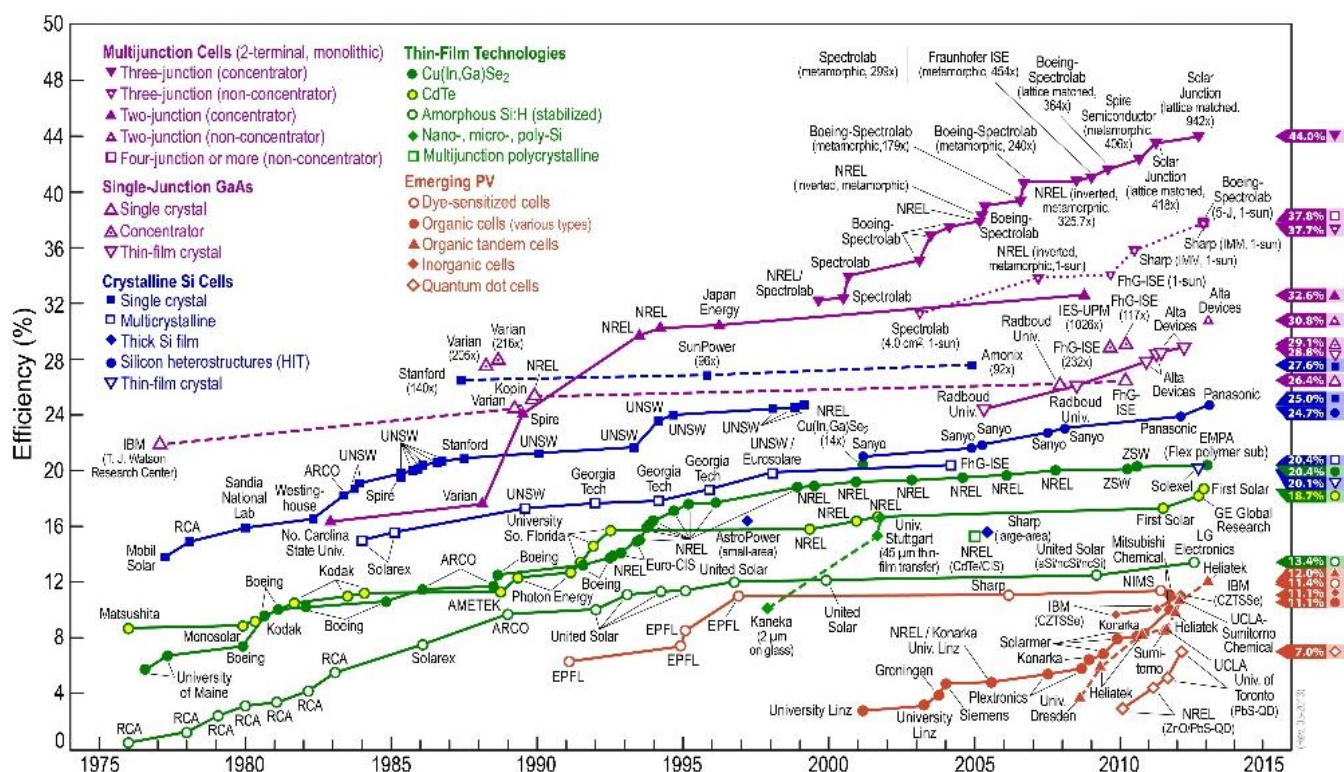
1.4. Silicio saulės elementai

Kadangi Saulės spinduliuotės spektras yra gana platus, todėl iš bet kurios puslaidininkinės medžiagos pagamintos p–n sandūros į elektrą šviesa bus efektyviausiai konvertuojama tik iš tam tikros, palyginti siauros, spektro dalies, kurioje fotonų energija nedaug viršys tos medžiagos draustinių energijų juostų tarpą (Goetzberger, Hoffmann, 2005).



1.12 pav. Skirtingų puslaidininkinių medžiagų draustinės juostos plotis (Goetzberger, Hoffmann, 2005)

1.12 pav. matyti, kad didžiausius našumus (η) galima pasiekti naudojant puslaidininkius, kurių draustinės juostos plotis yra tarp 1,3 ir 1,5 eV. Tokias vertes turi puslaidininkiai Cu_2S ar GaAs , kurių efektyvumas siekia 27 – 30 proc. Tačiau silicis nedaug tenusileidžia aukščiau išvardintų medžiagų efektyvumui, bet yra gerokai pigesnės ir turi geriau išvystytą gamybos technologiją. Silicio saulės elementai šiuo metu užima didžiausią fotovoltinių prietaisų rinkos dalį. Jie yra gaminami iš įvairių rūšių silicio (monokristalinis, polikristalinis, amorfinis). Eksperimentiniai našumai tokių modulių, pasiekti įvairiose laboratorijose pateikti 1.13 pav. Kaip matyti iš diagramos, didžiausias efektyvumas pasiektas monokristalinio silicio pagrindu pagamintais moduliais ir siekia 27,6 proc.



1.13 pav. Ivairių saulės elementų našumai, pasiekti laboratorijose (NREL, 2013)

1.1 lentelė. Rinkoje esančių skirtingų technologijų modulių našumai (EPIA, 2011)

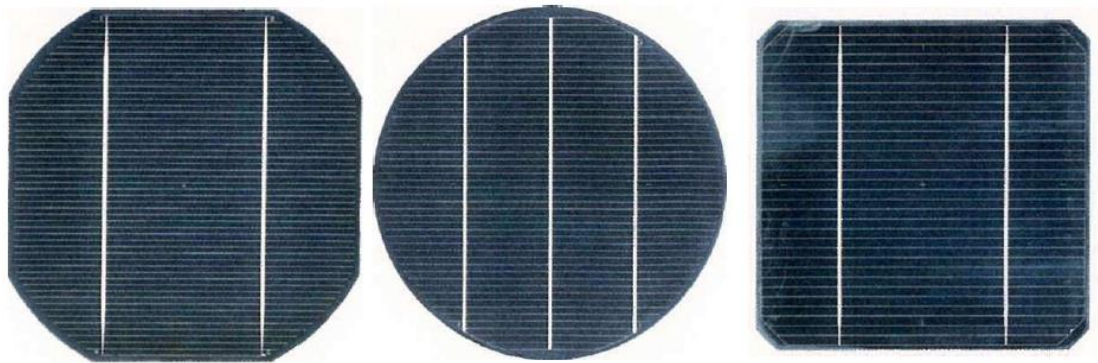
Technologija	Plonaplėvelinė					Kristalinio silicio	
	(a-Si)	(CdTe)	Cl(G)S	a-Si/ μ c-Si	Dažų pagrindu pagaminti elementai	Mono	Poli
Elemento našumas	4–8 proc.	10–11 proc.	7–12 proc.	7–9 proc.	2–4 proc.	16–22 proc.	14–18 proc.
Modulio našumas						13–19 proc.	11–15 proc.
Reikalingas plotas moduliams, išgauti 1 kW ₀	~15 m ²	~10 m ²	~10 m ²	~12 m ²	–	~7 m ²	~8 m ²

Rinkoje esančių modulių efektyvumai gerokai nusileidžia laboratorijose pasiektiems rezultatams. Didžiausia kliūtis yra sudėtinga ir brangi įranga. Ekonomiškai ne visais atvejais apsimoka didelės investicijos, kad rinkai pateikti keliais proc. efektyvesnes saulės baterijas.

1.5. Monokristaliniai saulės elementai

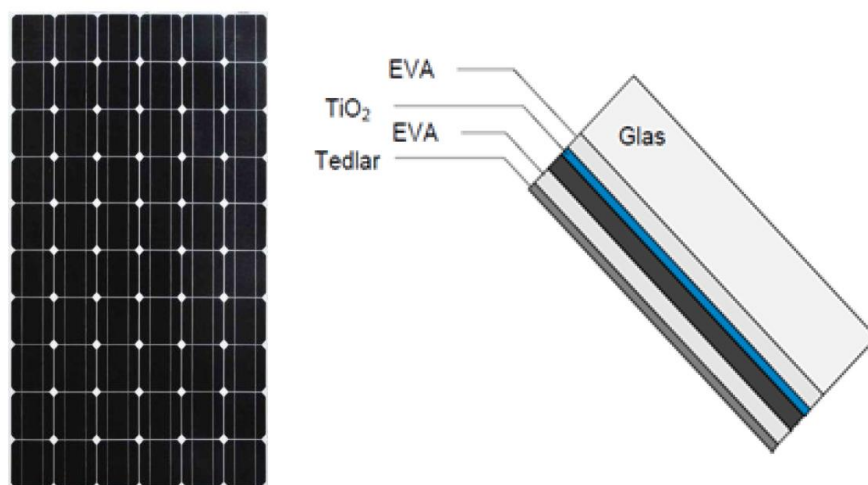
Monokristaliniai saulės elementai rinkoje pasirodė pirmieji, jie taip pat pasižymi vienu iš didžiausių efektyvumu. Maksimalūs laboratorijose pasiekti našumai yra gaunami naudojant „Czochralskio“ metodu užaugintas monokristalinio silicio plokšteles – iki 25 proc. (Alchemie, 2013).

Monokristaliniai elementai gaminami įvairių formų 1.14 pav. (apvalūs, pusiau apvalūs arba kvadrato), kurių storis siekia nuo 0,2 mm iki 0,3 mm.



1.14 pav. Monokristalinių elementų galimos formos (DGS, 2008)

Apvalūs elementai yra pigesni lyginant su pusiau apvaliais, kvadrato formos. Bet tokios formos elementai yra retai naudojami, nes jie neefektyviai išnaudoja modulio plotą. Tokios formos elementai gali



1.15 pav. Monokristalinis modulis ir elemento struktūra (NREL, 2013)

būti naudojami į pastatus integruojamose sistemose arba sistemose, kur reikalingas tam tikras permatomumas (DGS, 2008).

Pagrindinės tokio modulio savybės (NREL, 2013):

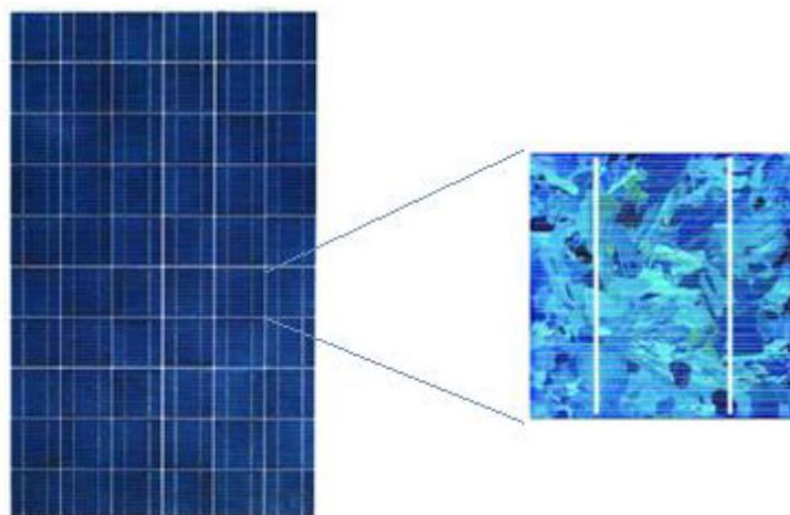
- Naudingumas: 15 – 18 proc. (Czochralskio metodas);
- Forma: apvalus, pusiau apvalus arba kvadrato formos;
- Sluoksnio storumas: 0,2 – 0,3 mm;
- Spalva: tamsiai mėlynas, juodas.

1.6. Polikristaliniai saulės elementai

Polikristaliniai moduliai pasižymi geresniu kainos santykiu per ploto vienetą, lyginant su monokristaline technologija. Pačio modulio struktūra yra panaši į tą kuri naudoja monokristalinę medžiagą. Siekiant padidinti bendrą modulio naudingumą, yra naudojami didesnio ploto elementai. Taip yra sumažinamas elementų skaičius modulyje, leidžiantis atpiginti gamybos išlaidas. Šios technologijos elementai gali būti dviejų rūšių: multikristaliniai ir mikrokristaliniai (EPIA, 2011).

Pirmieji yra gaminami iš perlydytų ir greitai kristalizuotų monokristalinio silicio prietaisų gamybos atliekų. Tokio proceso metu susidaro stambūs (kelių milimetrų ar net centimetrų dydžio) blokai, visas ruošinys pjaustomas į 0,5 mm storio plokšteles ir toliau naudojama monokristalinio silicio saulės elementų gamybos technologija.

Mikrokristaliniai Si saulės elementai gaminami naudojant modifikuotą amorfinio silicio sluoksnių gamybos technologiją (Krotkus, 2008).



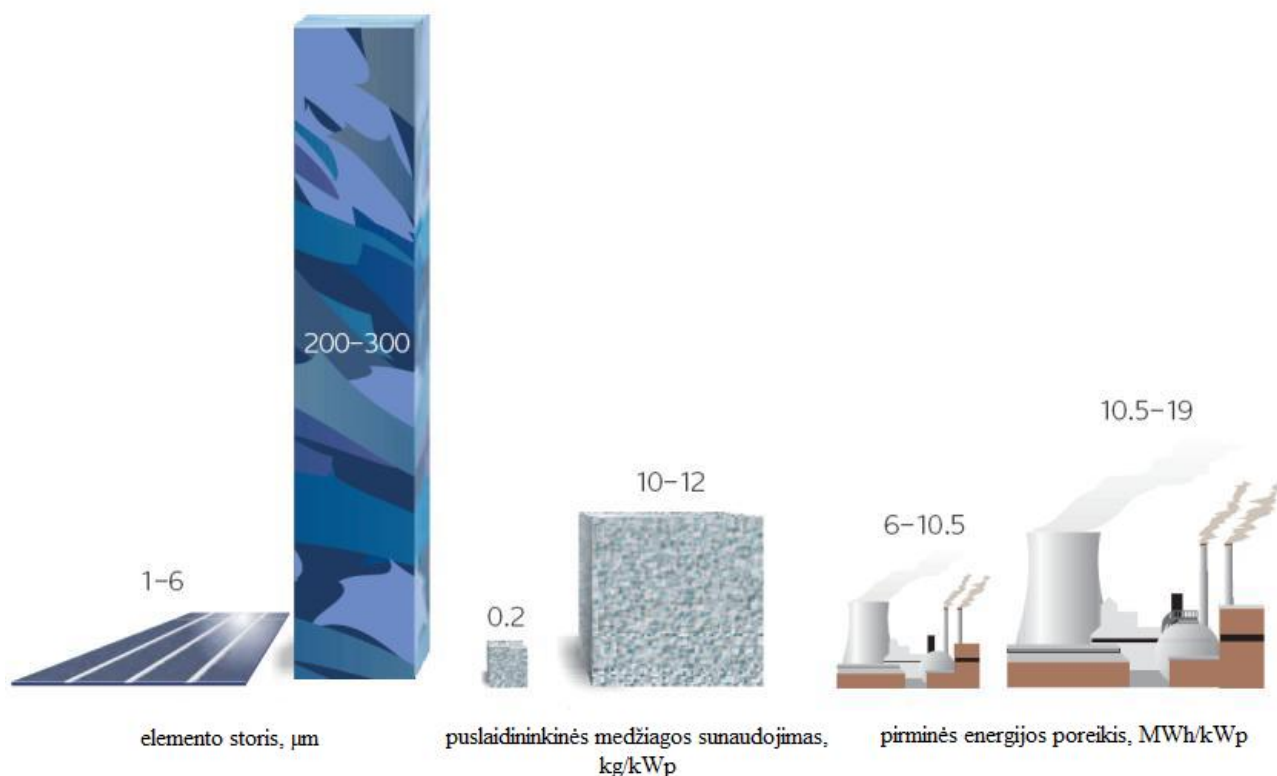
1.16 pav. Polikristalinis saulės modulis (DGS, 2008)

Pagrindinės tokio modulio savybės (NREL, 2013):

- Naudingumas: 13 – 16 proc.;
- Forma: apvalus;
- Sluoksnio storumas: 0,24 – 0,3 mm;
- Spalva: mėlyna, ruda.

1.7. Plonaplėveliniai saulės elementai

Dideli gamybos kaštai gaminant kristalinio silicio paviršius (kurie sudaro iki 40 – 50 proc. galutinės fotovoltinio modulio kainos), skatino ieškoti naujų medžiagų, kurios yra pigesnės ir jų gamyba yra ekonomiškesnė. Amorfinis silicis, vario indžio selenitas, kadmio telūridas yra naudojami, kaip puslaidininkė medžiaga. Šios medžiagos pasižymi didele šviesos sugertimi, todėl fotovoltiniai moduliai yra gaminami padengiant plonu sluoksniu (iki 0,001 mm) ant įvairių paviršių. Dažniausiai tas paviršius būna pagamintas iš stiklo. Terminas „plona plėvelė“ nusako kiekį puslaidininkinės medžiagos, kuris yra panaudotas elemento gamybai. Apibendrintai galime sakyti, kad plonaplėvelinė fotovoltiniu modulių technologija gerokai atpigino gamybą ir yra intensyviai tobulinami siekiant geresnio efektyvumo (DGS, 2008; Stonecypher, 2011). 1.17 pav. pavaizduotas plonaplėvelinė ir kristalinio silicio elementų palyginimas.



1.17 pav. Saulės elemento puslaidininkinės medžiagos storio palyginimas, medžiagų sąnaudos ir energijos poreikis gaminant plonaplėvelines (kairėje) ir kristalinio silicio (dešinėje) baterijas (DGS, 2008)

Egzistuoja keletas skirtingų plonaplėvelinių modulių technologijų (Stonecypther, 2011):

- Amorfinio silicio (a-Si) ir kiti;
- Kadmio telūrido (CdTe);
- Vario indžio selenidžio (CIS arba CIGS).

Vienas pagrindinių technologijos minusų yra palyginus mažas efektyvumas lyginant su kitomis technologijomis. 1.13 pav. pateikti skirtingų modulių pasiekti efektyvumai laboratorijose. Šie duomenys gauti didžiausioje pasaulyje atsinaujinančios energetikos laboratorijoje NREL (National renewable energy laboratory), JAV. Duomenys rodo, kad plonaplėvelinių fotovoltinių modulių didžiausias pasiektas efektyvumas yra 22 proc., o rinkoje parduodamų modulių vidutinis efektyvumas tik apie 10 proc.

Nepaisant mažo efektyvumo, plonaplėveliniai moduliai turi eilę privalumų prieš kristalinio silicio technologiją (Luque, Hegedus, 2003):

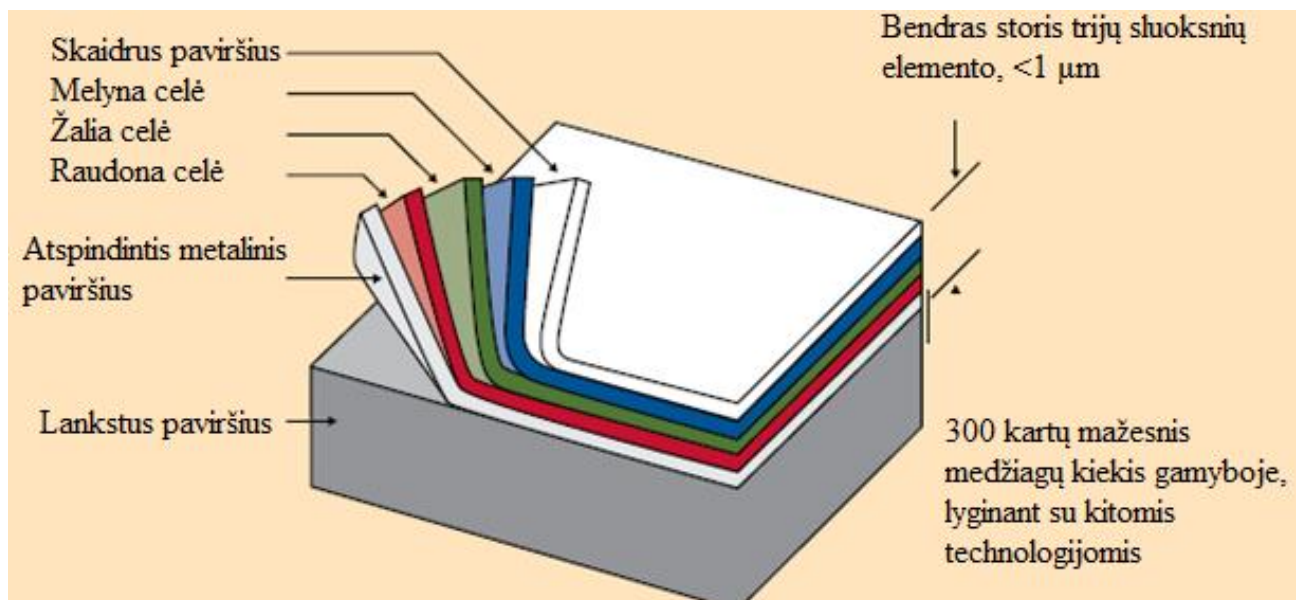
- Geresnis išsklaidytos ir mažo intensyvumo šviesos panaudojimas;
- Mažiau jautrus didesnei modulio paviršiaus temperatūrai;
- Energijos generavimas esant tam tikromis sąlygomis yra didesnis lyginant su kristalinio silicio baterijomis.

1.8. Amorfinio silicio (a-Si) technologija

Amorfinis silicis (a-Si) pasižymi netvarkinga atomų išsidėstymo struktūra, o ši technologija viena iš geriausiai išvystytų plonaplėvelinių fotovoltinių modulių technologija. Rinkoje šio tipo moduliai yra daugiau nei 15 metų ir plačiai buvo pritaikyti nešiojamuose skaičiuotuose (Alchemie, 2013).

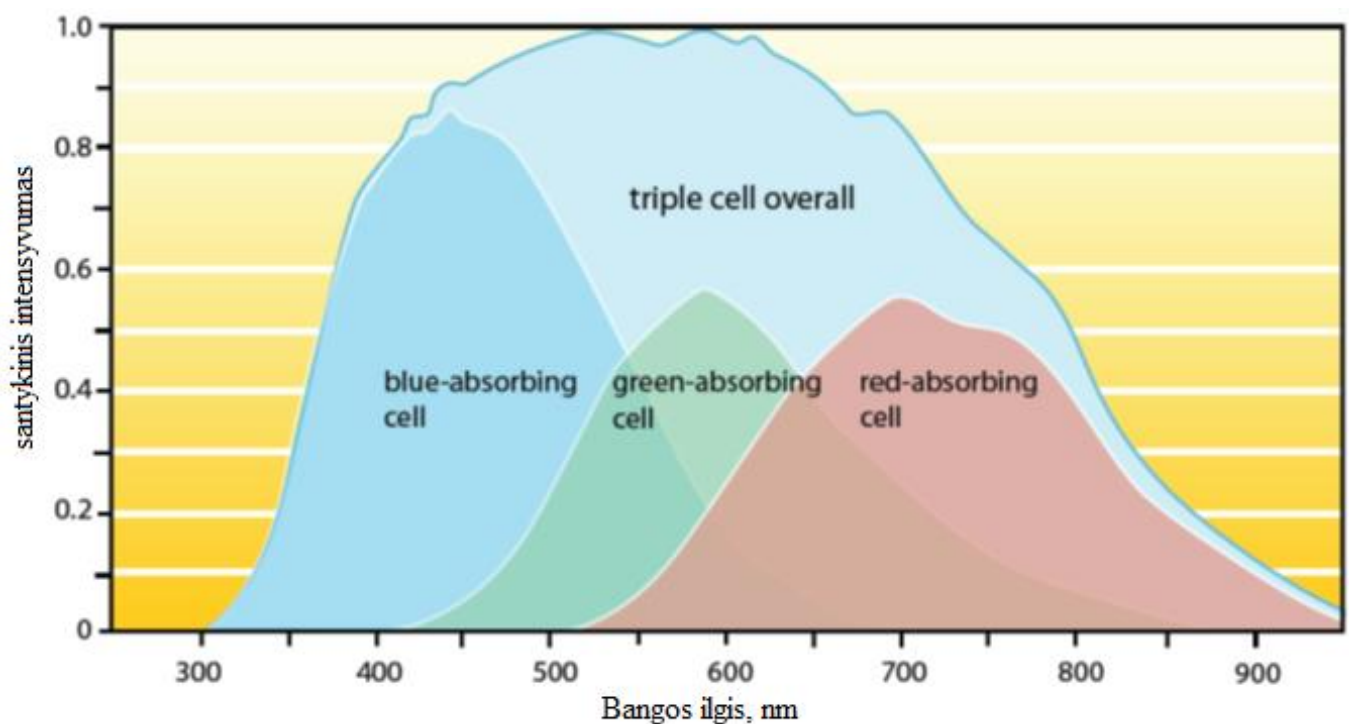
Amorfinio silicio (a-Si) moduliai, kurių storis siekia tik 1 μm yra gaminami garų nusodinimo ant paviršių metodu. Šis sluoksnis suformuojamas dažniausiai ant stiklinio arba metalinio paviršiaus. Silicio sluoksnis garu metodu gali būti suformuotas prie 75 °C. Todėl galima silicio sluoksni suformuoti netik ant stiklo ar metalo, bet ir ant plastiko. Paprastoje formoje elementas turi 1 eilės p-i-n sluoksnį. Tačiau vieno sluoksnio elementas patiria gana didelį elektros energijos atidavimo pablogėjimą (15 – 35 proc.), kai yra apšviečiamas saulės. Pasireiškia „Staebler–Wronski“ efektas. Norint pasiekti geresnį stabilumą ir sumažinti „Staebler–Wronski“ efektą, reikia naudoti plonesnius sluoksnius, taip yra padidinamas elektrinio lauko stiprumas medžiagoje (Alchemie, 2013; Wronski, Pearce, Ferlauto, 2002).

Tačiau toks sluoksnio storio mažinimas turi ir neigiamų pasekmių, nes gerokai sumažėja šviesos sugėrimas ir bendras modulio efektyvumas. Todėl buvo sukurti „tandeminiai“ ar net 3 sluoksnių moduliai, kurie turi p-i-n struktūros celes išdėstytas vienas ant kito (Uni-Solar, 2007; Kolodziej, 2004). Trijų sluoksnių modulių pradininkė yra kompanija „Uni-Solar“, kurios moduliai optimizuoti sugerti pilną saulės šviesos spektrą 1.18 pav.



1.18 pav. „Uni-Solar“ 3 sluoksnių fotovoltinių modulių technologija (Uni-Solar, 2007)

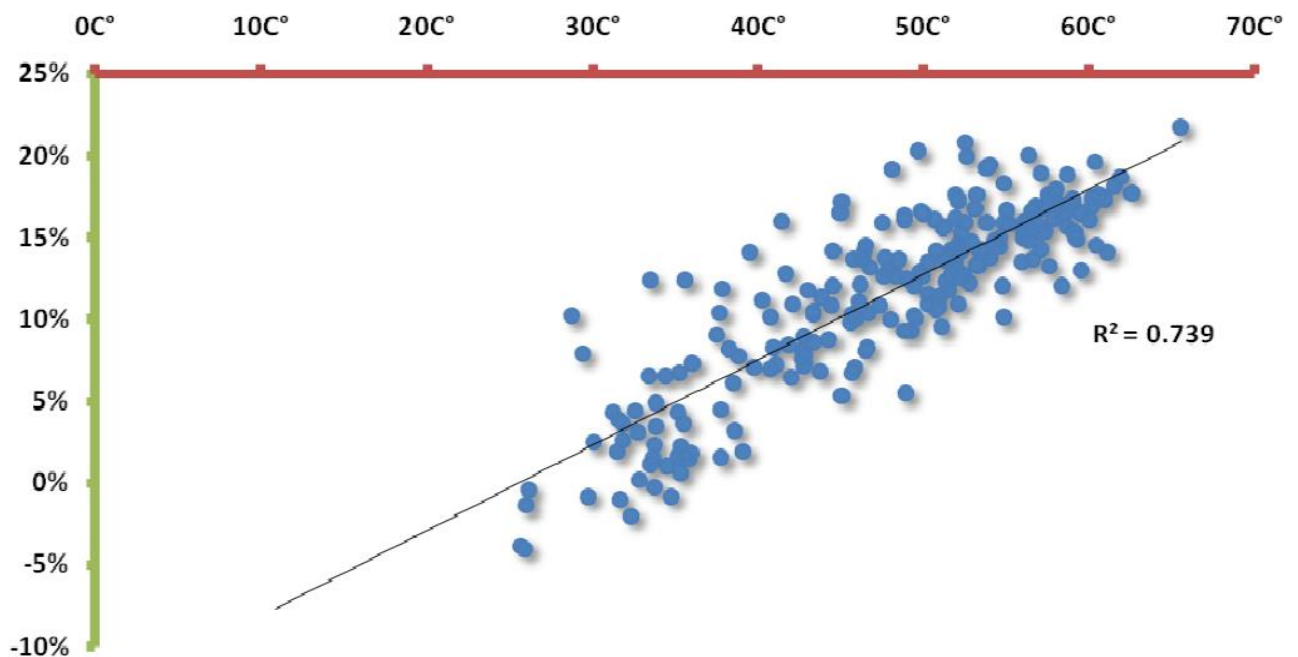
Tačiau net ir panaudojus tokią technologiją, šių modulių efektyvumas nėra labai didelis ir siekia tik 7 – 10 proc. a-Si modulių didžiausias privalumas yra pigi gamyba. Būtent dėl palyginti žemos kainos jie stipriai konkuruoja su kitomis fotovoltinių modulių technologijomis. Amorfinis silicis gali būti pagamintas įvairių formų pavyzdžiui kertuotas, apvalus ar ovalus. Dėl to lengvai gali būti pritaikomas įvairiuose nešiojamuose įrenginiuose, kuriems nereikalingas didelis kiekis elektros energijos pvz. nešiojami laikrodžiai, skaičiuotuvai, sodo šviestuvai ir tt.



1.19 pav. „Uni-Solar“ 3 sluoksnių fotovoltinių modulių sugeriamos šviesos spektras (Uni-Solar, 2007)

Žmogaus akys reaguoja į šviesą, kurios bangos ilgis 400 – 700 nm. Amorfinio silicio moduliai irgi reaguoja į panašų šviesos bangos ilgį kaip ir žmogaus akis, todėl šie moduliai gali būti panaudoti kaip šviesos jutikliai pvz. įjungti lauko apšvietimą sutemus.

Atsparumas temperatūrai yra vienas iš svarbiausių šių modulių savybių. Tyrimais nustatyta, kad didėjant temperatūrai iki tam tikros reikšmės, gaunami geresni efektyvumo parametrai. Tai aktualu didelės temperatūros klimatinėse zonose. 1.20 pav. pavaizduotas atsparumas neigiamam temperatūros poveikiui baterijos našumo rodikliams.

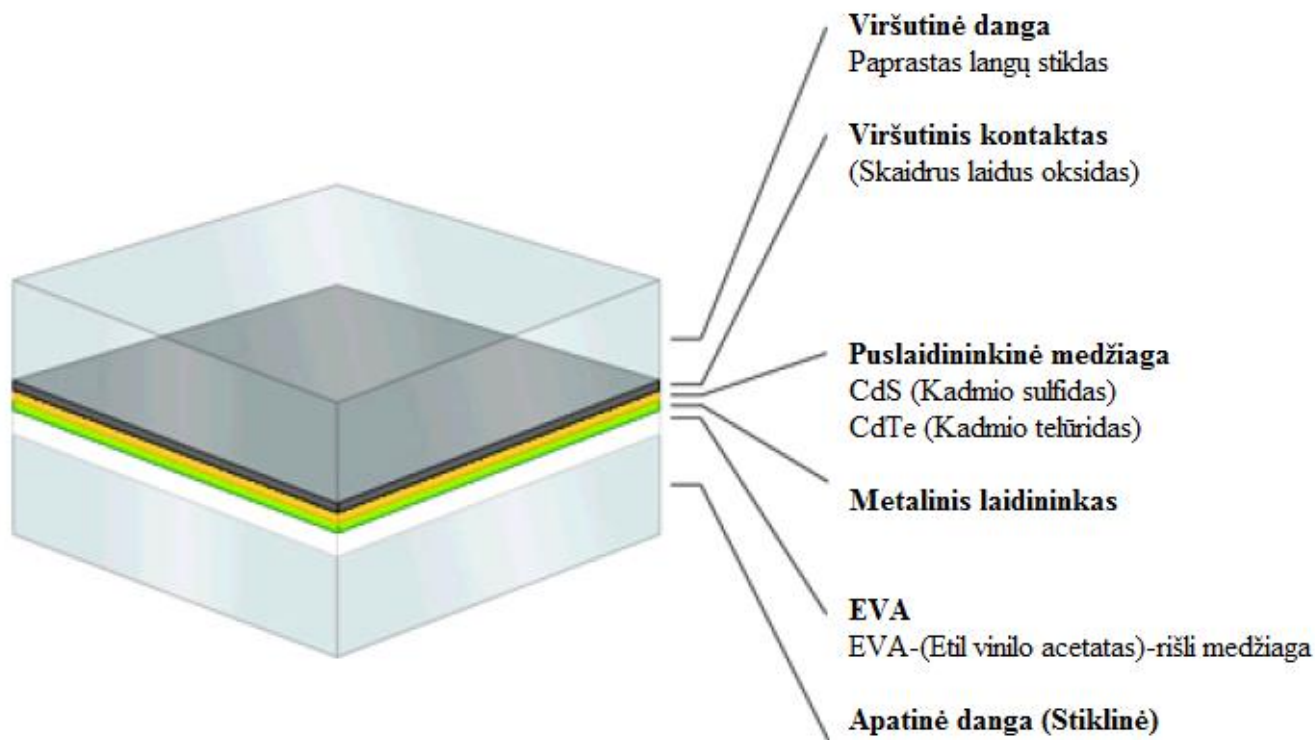


1.20 pav. a–Si efektyvumo įgijimas/praradimas esant skirtingai modulio temperatūrai (Schwabe, Jansson, 2009)

Tačiau šių modulių efektyvumas yra gerokai mažesnis už monokristalinius ir polikristalinius modulius. Bandymai padidinti efektyvumą pvz. gaminti kelių sluoksnių modulius, gamybą daro sudėtingesnę. Todėl didėja gamybos kaštai ir kainą ir išnyksta kainos pranašumas prieš kitas technologijas (DGS, 2008).

1.9. Kadmio telūrido (CdTe) technologija

Šie fotovoltiniai moduliai gaminami naudojant ploną plėvelę, pagamintą iš kadmio telūrido (CdTe). Ši technologija susilaukė didelio pripažinimo ir yra antroje vietoje pasaulyje po silicio, pagal naudojamą medžiagą – kadmio telūridą. Tačiau pirmoje vietoje išlieka silicis, plačiausiai naudojama medžiaga fotovoltinių modulių gamybos pramonėje. Fotovoltiniai moduliai, pagaminti naudojant CdTe technologiją yra pirmieji ir vieninteliai plonaplėveliniai moduliai aplenkę kristalinio silicio modulius žema kaina. Jie užima didelę dalį rinkos, pagrinde kelių kilovatų galios sistemose (Meyers, 2006).

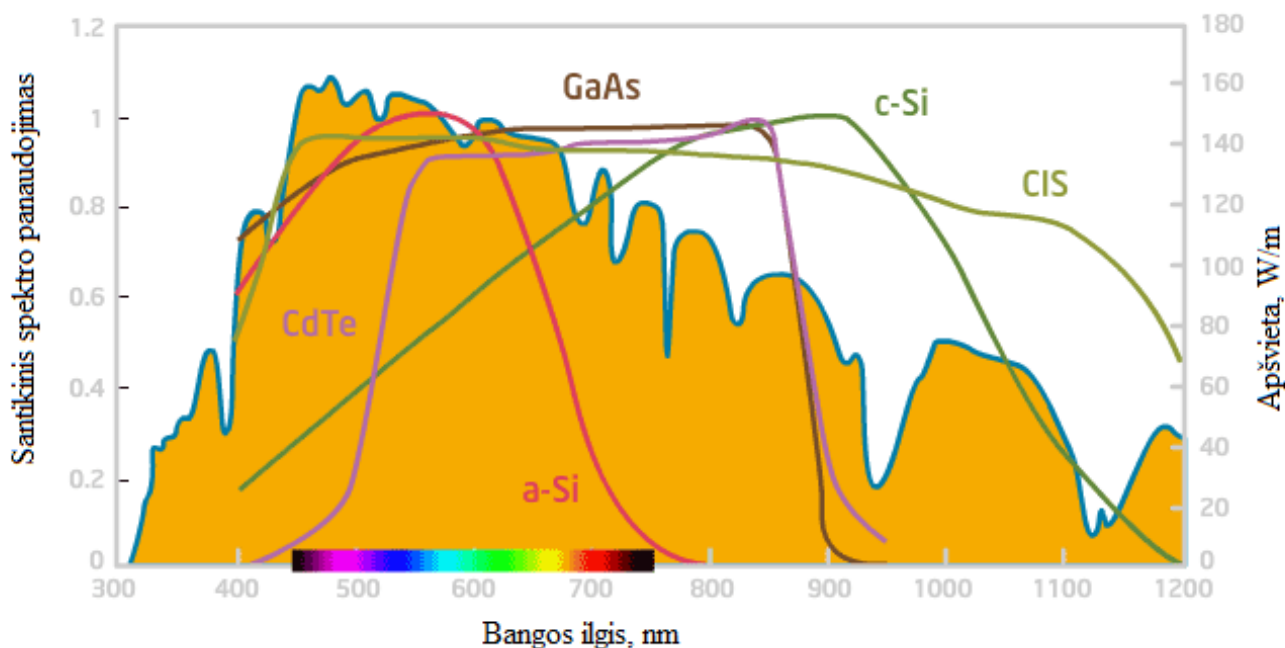


1.21 pav. Kadmio telūrido modulio sandara (Meyers, Peter V, 2006)

Pirmieji tyrimai prasidėjo 1950 m., nes ši medžiaga gerai tiko fotovoltinių modulių gamybai. Apie 1960 m. lyderiai tapo „General Electric“, „Kodak“ ir tt. Nors ši technologija fotovoltinių modulių gamybai sukurta labai seniai, bet efektyvumas augo labai lėtai. 2001 m. „NREL“ savo laboratorijose pasiekė 16,5 proc. ir šis rekordas nusistovėjęs iki šiol. Galimybės daugiau padidinti efektyvumą beveik pilnai išnaudotos. Maksimalus efektyvumas masinėje gamyboje ateityje turėtų pasiekti 20 proc. Dėl šios priežasties daugelis kompanijų nutraukė šios technologijos vystymą ir gamybą (Alchemie, 2012; Meyers, 2006).

CdTe moduliai turi keletą privalumų prieš silicio technologiją :

- **Gamybos lengvumas.** Reikiamas elektrinis laukas, kuris reikalingas versti saulės šviesą į elektrą atsiranda iš 2 kadmio molekulių rūšių: kadmio sulfido ir kadmio telūrido. Tai reiškia, kad paprastas molekulių mišinys pasiekia reikiamas savybes, stipriai supaprastindamos gamybos sudėtingumą.
- **Geras suderinamumas su saulės spektru.** Kadmio telūridas sugeria saulės spindulius 400 – 800 nm šviesos spektre (žiūrėti 1.22 pav.). Šiame ruože saulės spinduliai turi daugiausiai energijos.
- **Kadmio išteklių yra gausūs,** kadmio išgaunamas kaip šalutinis produktas pvz. vario išgavimo metu. Todėl šios medžiagos kaina rinkoje yra pastovi, ir tai yra didžiulis privalumas. Tuo tarpu silicio kainos pastaraisiais metais stipriai kilo.



1.22 pav. Skirtingų technologijų baterijų santykinis saulės spektro panaudojimas (AUOptronics, 2011)

Kaina yra didžiausias privalumas šios technologijos, bet yra ir rimtų trūkumų.

- **Mažas efektyvumas.** Dabar gaminamų modulių vidutinis efektyvumas tesiekia 10 proc.

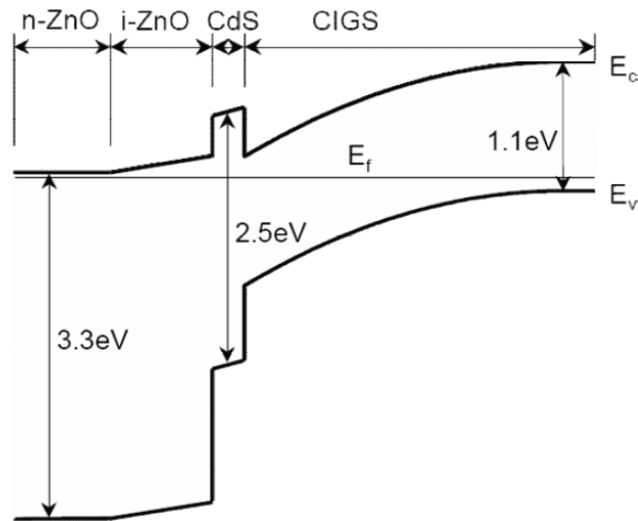
- **Telūrido pasiūla.** Kadmio atsargos yra didžiulės, ko negalima pasakyti apie telūridą. Telūridas (Te) yra labai retas elementas (1 – 5 dalys viename milijarde dalelių esančių žemės plutoje). 2009 m. šio reto elemento buvo išgauta tik 113 t (Brown, Bide, Walters, 2011). Dauguma šio metalo yra išgaunama vario apdirbimo metu. Perdirbus 500 tonų vario galima išgauti iki 0,45 kg telūrido. Norint pagaminti 1 gigavato galios fotovoltinių modulių, esant dabartiniams efektyvumui, reikia panaudoti 93 tonas telūrido. Todėl šis elementas yra vienas svarbiausių faktorių, kuris riboja metinę modulių gamybą bei gamybos augimą.

- **Kadmio toksiškumas.** Elementas kadmis patenka į šešetą toksiškiausių medžiagų pasaulyje. Tačiau pagaminti moduliai su šia medžiaga yra mažiau pavojingi. Pačių modulių utilizavimas nėra pilnai išspręstas.

1.10. Vario–indžio (CIS arba CIGS) technologija

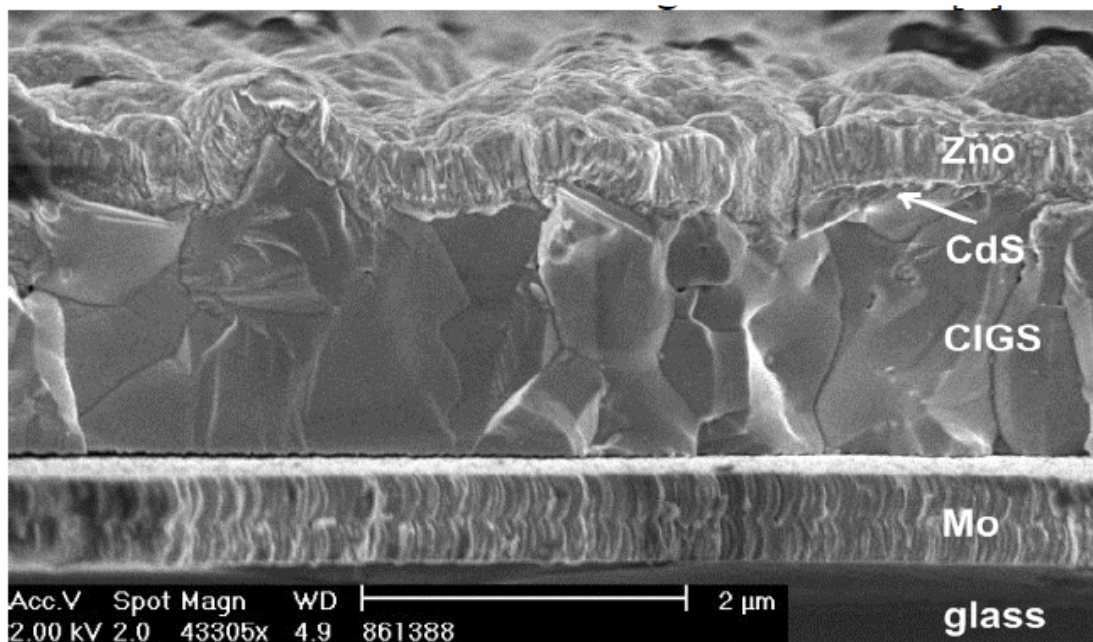
Daugiau kaip 2,3 milijardai dolerių buvo investuota į kompanijas, kurios gamina šia technologija paremtus fotovoltinius modulius. Toks didelis susidomėjimas atsirado dėl to, kad laboratorijose buvo pademonstruotas didelis modulių efektyvumas ir naudojamos medžiagos neturi kadmio. Kadmio yra vienas iš toksiškiausių žinomų elementų. Nors laboratoriniai duomenys rodė gerus rezultatus, masinė tokių fotovoltinių modulių gamyba yra labai sudėtinga. Tik kelios firmos pasaulyje gamina komercinius CIGS modulius. Beveik visos firmos, gaminančios šiuos modulius patyrė sunkumų, nes reikėjo nuolat tobulinti

ir perdirbti gamybos technologiją. Kiekvienas gamintojas turi pats gaminti visą įrangą, reikalingą fotovoltiniams moduliams gaminti. Nepaisant šių sunkumų, šiai technologijai prognozuojama gera ateitis (Kapur, 2008).



1.23 pav. Draustinės juostos plotis skirtinguose fotovoltinių modulių technologijose (Gerngrob, Revere, 2011)

Tipiška CIGS modulių sandara (lūžis) pateiktas 1.24 pav.



1.24 pav. CIGS modulio sandara ir molekulinė struktūra (Gerngrob, Revere, 2011)

99 proc. šviečiančios šviesos CIGS modulyje yra sugerama 1 mikrono storio sluoksnyje. Pats viršutinis sluoksnis CIGS'e yra gaminamas iš kadmio sulfido (CdS), bet kartais, celės permatomumui pagerinti, gali būti panaudotas ir cinkas, o pridedant mažą kiekį galio galima padidinti draustinės juostos plotį. Dėl to padidėja bendra modulio įtampa ir efektyvumas (Kapur, 2008).

2. TYRIAMOS SISTEMOS PARAMETRAI

Tyrimams buvo panaudotos šios, įmonėje įrengtos saulės baterijos: „Schuco MPE 90 Al“, „Avancis PowerMax Smart“, „Sharp NA-F128(GK)“, „SolarTechnics SN44“. Pagrindiniai šių modulių parametrai pateikti 2.1 lentelėje. Dėl nuolat tobulėjančios gaminių technologijos, efektyvumo, sunku rasti visų naudojamų modulių tikslių parametrų. Tik firmos „Schuco MPE 90 Al“ ir „SolarTechnics SN44“ modulių pateikti parametrai atitinka tuos, kurie įrengti UAB „Arginta“ jėgainėje. Kitų 2 gamintojų pateikti parametrai skiriasi nuo realiai esančių modulių.

2.1 lentelė. Įrengtų fotovoltinių saulės elementų techniniai parametrai (AVANCIS, 2011; Sharp, 2011; Schuco, 2010; Solartechinics, 2010)

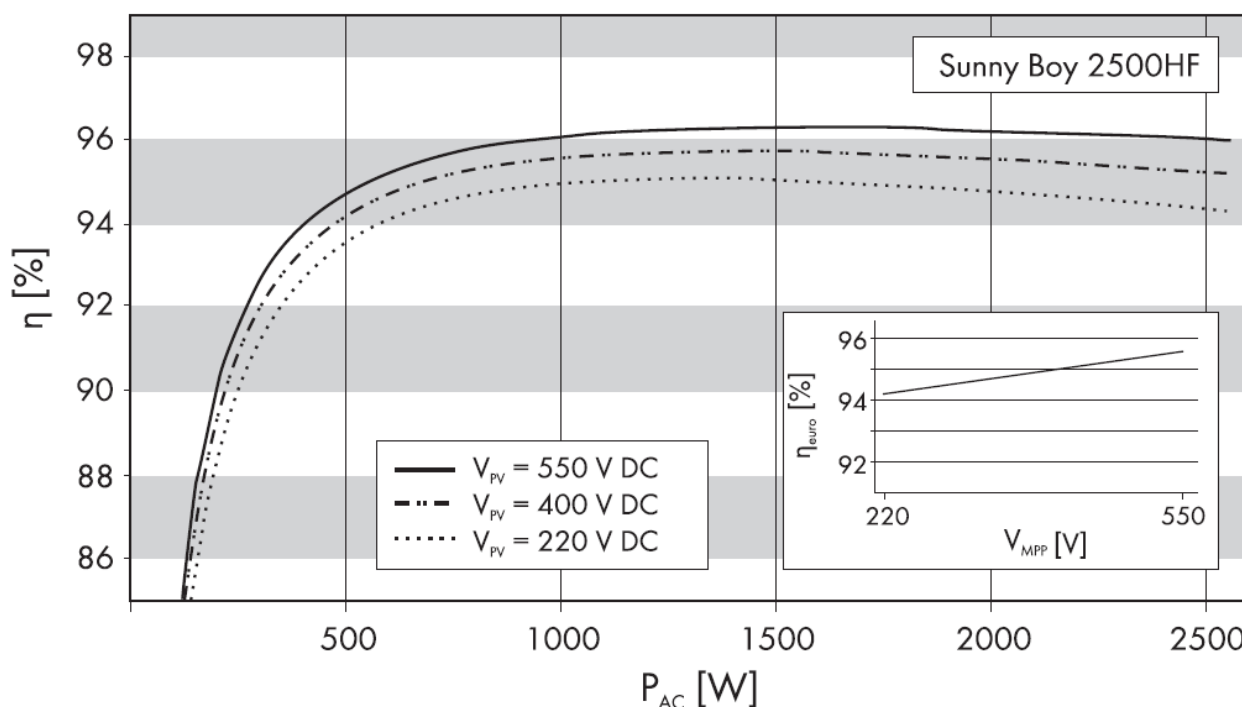
	Schuco MPE 90 Al	Avancis PowerMax Smart 120	Sharp NA-F128(GK)	SolarTechnics SN44
Nominali galia (P_{mpp})	90 Wp	120 Wp	127 Wp	44 Wp
Generuojamos galios paklaidos ribos	+5 %/-0 %	+5 %/-0 %	+10%/-5%	+5 %/-5 %
Instaliuotų modulių kiekis	25	20	20	44
Bendra masyvo galia	2250 W	2400 W	2540 W	1980 W
Technologija	a-Si	CIS	α -Si/ μ -Si	a-Si
Nominali įtampa, U_{mpp}	78,20 V	42,8 V	45,4 V	48 V
Nominali srovė, I_{mpp}	1,15 A	2,81 A	2,82 A	0,92 A
Atviros grandinės įtampa, U_{oc}	96,20 V	58,3 V	59,8 V	63 V
Trumpojo jungimo srovė, I_{sc}	1,45 A	3,22 A	3,45 A	1,08 A
Efektyvumas, %	6,30 %	11 %	9 %	5,57 %
Temperatūrinis koeficientas, (P_{mpp})	-0,12 %/ °C	-0,39 %/ °C	-0,24 %/ °C	-0,20 %/ °C
Temperatūrinis koeficientas, (I_{sc})	+0,10 %/ °C	0,1 mA/ °C	+0,07 %/ °C	+0,09 %/ °C
Temperatūrinis koeficientas, (U_{oc})	-0,20 %/ °C	-0,170 mV/ °C	-0,30 %/ °C	-0,33%/ °C
Temperatūrinis koeficientas, (I_{mpp})	+0,07 %/ °C	-	-	+0,14 %/ °C
Temperatūrinis koeficientas, (U_{mpp})	-0,18 %/ °C	-140 mV/ °C	-	-0,32%/ °C
Matmenys				
Ilgis, plotis, storis, mm	1300x1100x7.3	1587x664x37	1409x1009x46	1245x635x8
Bendras visų modulių plotas, m ²	35,75	21,07	28,43	34,78

Kiekvienas saulės baterijų masyvas, įrengtas skirtingais kampais yra prijungtas prie atskiro „Sunny Boy 2500HF-30“ keitiklio. Vienodi keitikliai yra naudojami beveik visiems masyvams, taip panaikinami nesklandumai, dėl skirtingų keitiklių naudojamų maksimalios galios taško sekimo algoritmų. Tai leidžia atlikti masyvų iš skirtingų saulės baterijų gamintojų palyginimą. Pagrindiniai šio įrenginio parametrai yra pateikti 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Keitiklio pagrindiniai parametrai (SMA, 2013)

Technical data	Sunny Boy 2500HF-30
Input (DC)	
Max. DC power (@ $\cos \phi = 1$)	2600 W
Max. DC voltage	700 V
MPP voltage range	175 V – 560 V / 530 V
Min. DC voltage / start voltage	175 V / 220 V
Max. Input current / per string	15 A
Number of MPP trackers / strings per MPP tracker	1 / 2
Output (AC)	
AC nominal power (@ 230 V, 50 Hz)	2500 W
Max. AC apparent power	2500 VA
Nominal AC voltage; range	220, 230, 240 V; 180 V – 268 V
AC grid frequency; range	50, 60 Hz; -4,5... +4,5 Hz
Max. output current	14,2 A
Efficiency	
Max. Efficiency / European weighted efficiency	96.3 % / 95.3 %

Produkto naudingumo kreivės, esant skirtingai įėjimo nuolatinei įtampai pavaizduotos 2.1 pav.



2.1 pav. „SMA Sunny Boy 2500HF“ naudingumo kreivės (SMA, 2013)

Tiriama sistema susideda iš 4 skirtingų gamintojų saulės baterijų. Kiekvieno gamintojo baterijų masyvai yra įrengti 4 skirtingais posvyrio kampais. Pagrindiniai sistemos duomenys pateikti 2.3 lentelėje.

Du fotovoltinių baterijų masyvai (a-Si) yra įrengti skirtingais posvyrio kampais, negu kitos darbe tiriamos sistemos. Dėl šios priežasties nebus įmanoma vienodai įvertinti visų masyvų esant tam pačiam posvyrio kampui našumo duomenų.

2.3 lentelė. Įrengti moduliai prie skirtingų posvyrio kampų

Sistemos Nr.	Moduliai								
				Modulių apibūdinimas					Sistemos galia, W_p
	Modulio celės tipas	Grupės/vietos kodas	Posvyrio kampas	Modulio gamintojas	Gamintojo šalis	Efektyvumas, %	Vienet o galia, W_p	Kiekis, vnt.	
1	a-Si	S 1.1.1	$\pm 3^\circ$	Schuco	Vokietija	6,30	90	25	2.250
		S 1.1.2	10°				90	25	2.250
		S 1.1.3	-10°				90	25	2.250
		E1	35°	Solartechnics	Vokietija	5,57	45	44	1.980
2	CIS	S 1.2.1	$\pm 3^\circ$	Avancis	Vokietija	10,30	120	20	2.400
		S 1.2.2	20°				120	20	2.400
		S 1.2.3	-20°				120	20	2.400
		S 2.1	35°				120	20	2.400
3	α -Si/ μ -Si	S 1.3.1	$\pm 3^\circ$	Sharp	Japonija	8,50	127	20	2.540
		S 1.3.2	20°				127	20	2.540
		S 1.3.3	-20°				127	20	2.540
		S 2.5	35°				127	20	2.540

Masyvų nuolatinės srovės, įtampos, energijos kiekiai pateikti į elektros tinklą, kintamos srovės momentinės galios buvo paimtos iš įrenginio „Sunny Webbox“ duomenų bazės. Keitiklių matavimo kanalai pateikti 2.4 lentelėje.

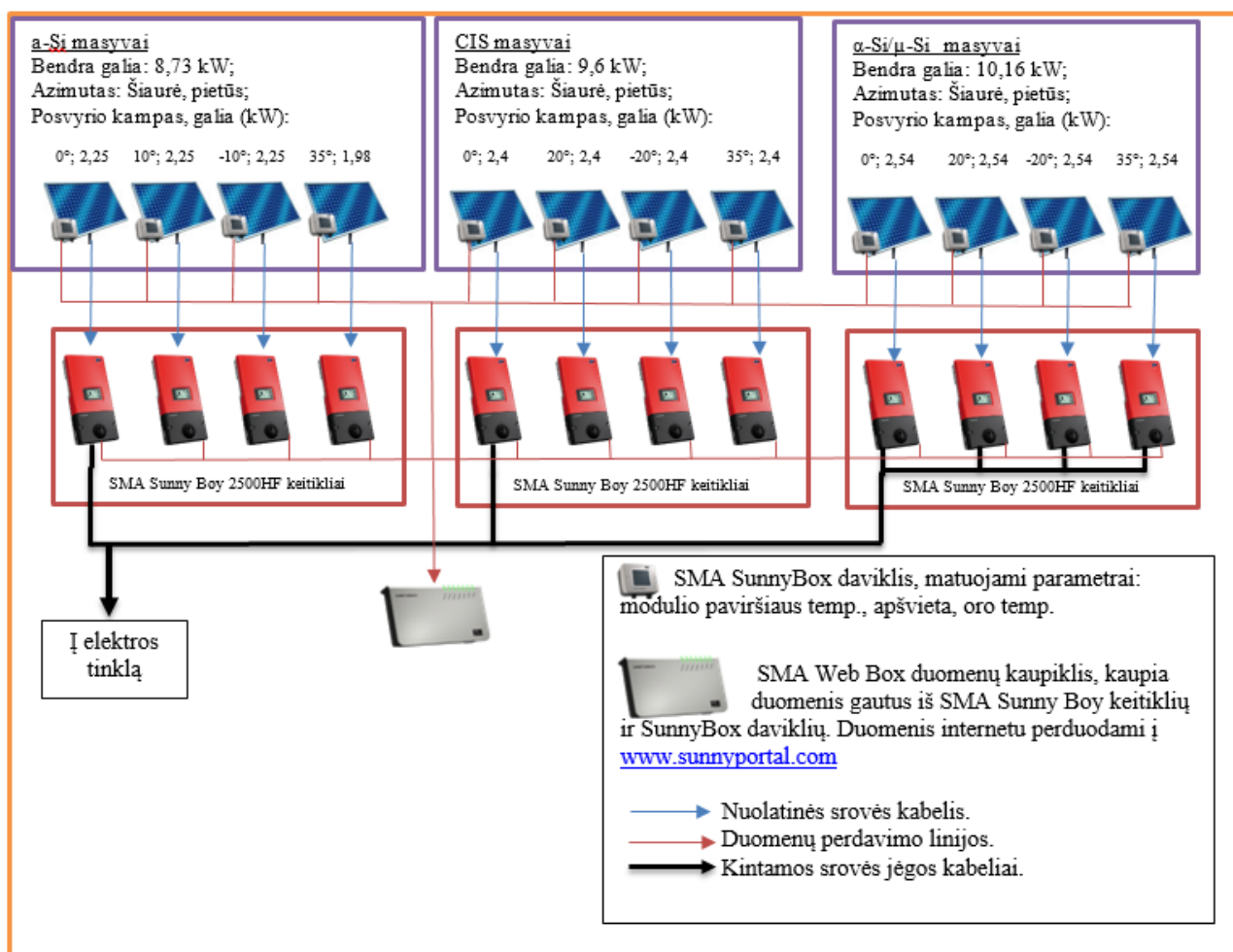
2.4 lentelė. „Sunny Webbox“ registruojami keitiklių matavimo kanalai (SMA, 2013)

Matavimo kanalas	Apibūdinimas
E-total	Bendras patiektos energijos į tinklą kiekis
I_{pv}	Nuolatinė srovė
P_{ac}	Generuojama AC galia
U_{pv}	Fotovoltinės jėgainės masyvo generuojama DC įtampa

Svarbu paminėti tai, kad keitiklio duomenų matavimo kanalai turi iki ± 4 proc. toleranciją DC matavimams ir apie ± 3 proc. AC matavimams (SMA, 2011). Šios tolerancijos nurodytos prie nominalių įrenginio sąlygų. Esant mažoms galioms (žiema, debesuotą dieną), paklaidos gali būti didesnės.

2.1. Saulės baterijų energijos generavimo priklausomybė nuo modulių posvyrio kampo

Įrengiant saulės baterijų jėgaines, svarbu teisingai parinkti modulių orientaciją ir posvyrio kampą. Nuo šių parametro labai priklauso metinis energijos generavimas. Tai ypač svarbu sistemose, kur neįmanoma keisti modulių posvyrio kampo. Neteisingai parinktas kampas, sumažins bendra sistemos našumą, kuris gali siekti keliolika procentų. Ypač šie rezultatai aktualūs tais atvejais, kuomet modulių įtvirtinimo kampas nėra didelis (tai aktualu sutabdintų stogų savininkams). Šiomis sąlygomis, aplinkos veiksniai gali turėti labai didelį žalingą poveikį FV jėgainės našumui.



2.2 pav. Tiriamos sistemos struktūrinė schema

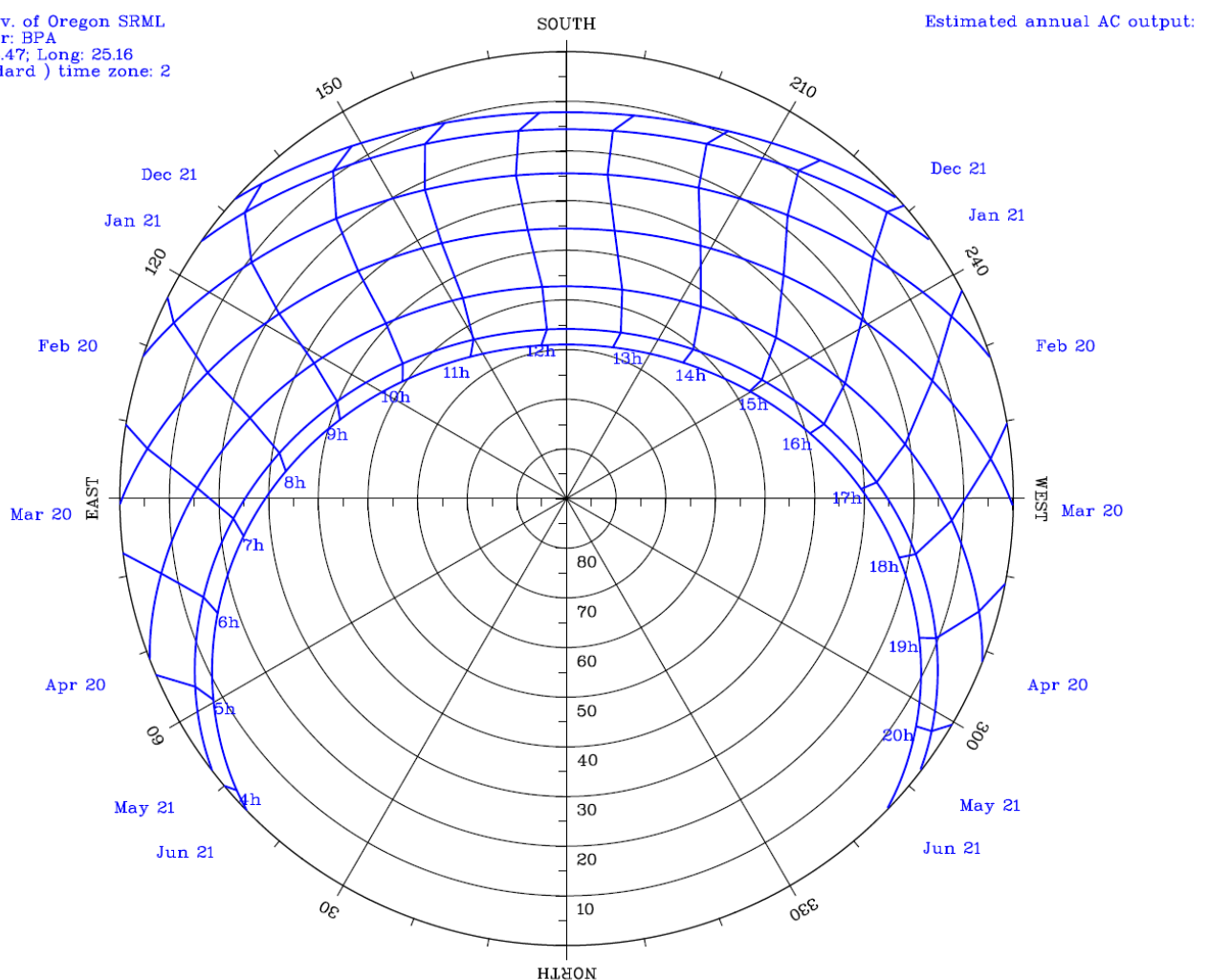
UAB „Arginta“ įrengtoje eksperimentinėje jėgainėje buvo galima įvertinti skirtingais kampais įrengtų modulių našumus 2.2 pav. pateikta struktūrinė tiriamos sistemos schema, kurioje pavaizduoti pagrindiniai sistemos parametrai ir sumontuota stebėjimo - registravimo įranga, leidžianti atlikti tyrimus.

Saulės baterijų masyvai įrengti Vilniuje, jėgainės koordinatės yra ilguma: 54° 47' 2.57", platuma: 25° 16' 35.42". Skirtingų gamintojų moduliai įrengti horizontalioje plokštumoje, pietų kryptimi (10°, 20°, 35°)

ir šiaurės kryptimi (10° , 20°). Kiekvienas masyvas prijungtas prie atskiro „SMA Sunny Boy“ 2,5 kW galios keitiklio. Beveik visi jie prijungti prie identiško keitiklio, todėl nereikia rūpintis skirtingais maksimalios galios taško sekimo algoritmais. Išskirti reikėtų masyvą a–Si, 35° . Jis prijungtas prie mažesnės galios keitiklio, „SMA SunnyBoy“, kuris yra 1,7 kW galios.

Visi masyvai turi atskirą „SMA SunnyBox“ jutiklį, matuojanti oro, modulio temperatūras ir apšvietą. Šie duomenis matuojami kelių sekundžių intervalais ir kas 5min apskaičiuojamas vidurkis, kuris išsaugomas „Webbox“ įrenginyje. Panaši procedūra vyksta ir su keitiklio duomenimis. Ribotas atminties kiekis, įgalina išsaugoti tik 5 dienų informaciją. Todėl ši tiksli informacija šiame darbe bus pateikiama tik trumpo laikotarpio. „Webbox“ taip pat turi ryšį su internetu ir duomenis kiekvieną dieną siunčia į www.sunnyportal.com. Šiame portale yra sukaupti visų metų duomenys.

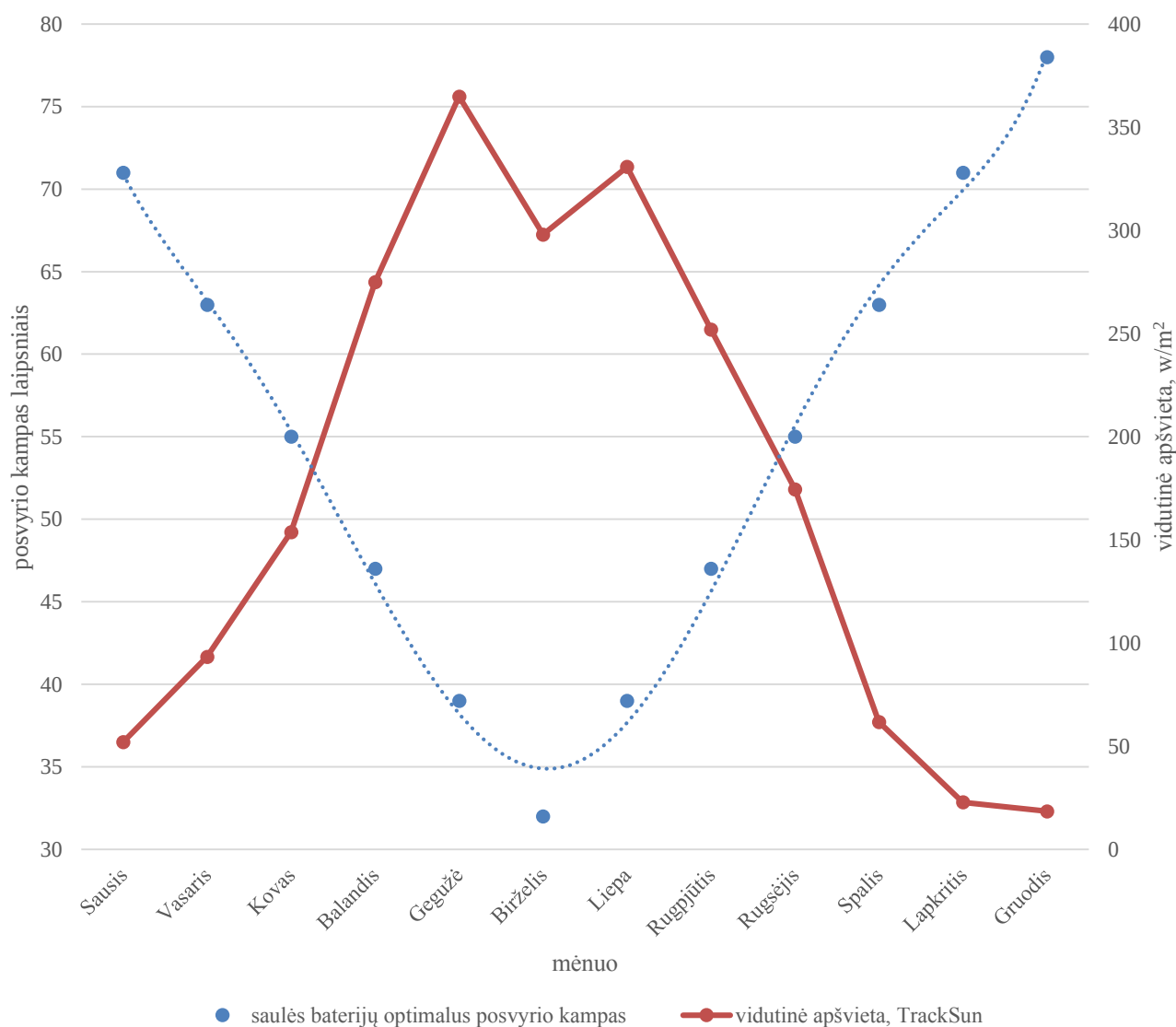
(c) Univ. of Oregon SRML
Sponsor: BPA
Lat: 54.47; Long: 25.16
(Standard) time zone: 2



2.3 pav. Saulės kelias virš horizonto skirtingais mėnesiais (Oregon University, 2008)

Kalbant apie optimalų modulių kampą, reikia žinoti apytikslį saulės aukštį virš horizonto skirtingais mėnesiais. Skirtingais mėnesiais šis kampa labai stipriai kinta. Pasinaudojau (Oregon University, 2008) sukurta internetine skaičiuokle, kuri sugeneruoja diagramą, pateikta 2.3 pav.

Joje pavaizduotas saulės kelias virš horizonto Vilniuje, kuris, kaip matyti, labai stipriai kinta metų laikotarpyje, dėl to kinta ir saulės aukštis virš horizonto. Siekiant maksimaliai konvertuoti saulės spindulius į elektros energiją, reikia kad spinduliai kristu stačiu kampu į saulės bateriją. Remiantis 2.3 pav. duomenimis buvo sukurta optimalaus posvyrio kampo diagrama, kuri pavaizduota 2.4 pav. Akivaizdu, jog didžiausia apšvieta yra vidurdienį, todėl optimaliausia būtų parinkti posvyrio kampą būtent šiam momentui. Taip būtų pasiekiamas didžiausias energijos generavimas.



2.4 pav. Saulės baterijų optimalaus posvyrio kampo diagrama su vidutine mėnesine apšvieta Vilniuje, 2012 metais

Naudojant duomenis gautus iš „SunnyBox“ jutiklio, šioje diagramoje taip pat yra pateikta ir vidutinė mėnesinė apšvieta. Jutiklis sumontuotas ant saulę sekančio įrenginio „Solar Tracker“. Šio įrenginio paskirtis nukreipti saulės baterijų masyvą optimalių kampu. Automatiškai keičiamas azimutas ir posvyrio kampas priklausomai nuo saulės padėties. Taip yra pasiekiamas maksimalus energijos generavimas,

nepriklausomai nuo saulės padėties kitimo dienos bėgyje. Šie apšvietos duomenis leidžia palyginti skirtingų mėnesių energijos generavimo potencialą.

Braižant energijos generavimo priklausomybę nuo posvyrio kampo, buvo panaudoti visų masyvų duomenys. Skirtingų gamintojų moduliai generuoja skirtingą energijos kiekį esant toms pačioms sąlygoms, todėl buvo apskaičiuojami vidutiniai dydžiai. Taip buvo sumažinta skirtingų parametrų modulių įtaka rezultatams.

a-Si, CIS, α -Si/ μ -Si masyvai yra įrengti skirtingų galingumų (2,25; 2,4; 2,54 kW). Generuojamas skirtingas energijos kiekis, neleidžia palyginti skirtingų sistemų našumo duomenų. Norint atlikti palyginimą, būtina našumo duomenis suvienodinti. Todėl buvo panaudota ši formulė:

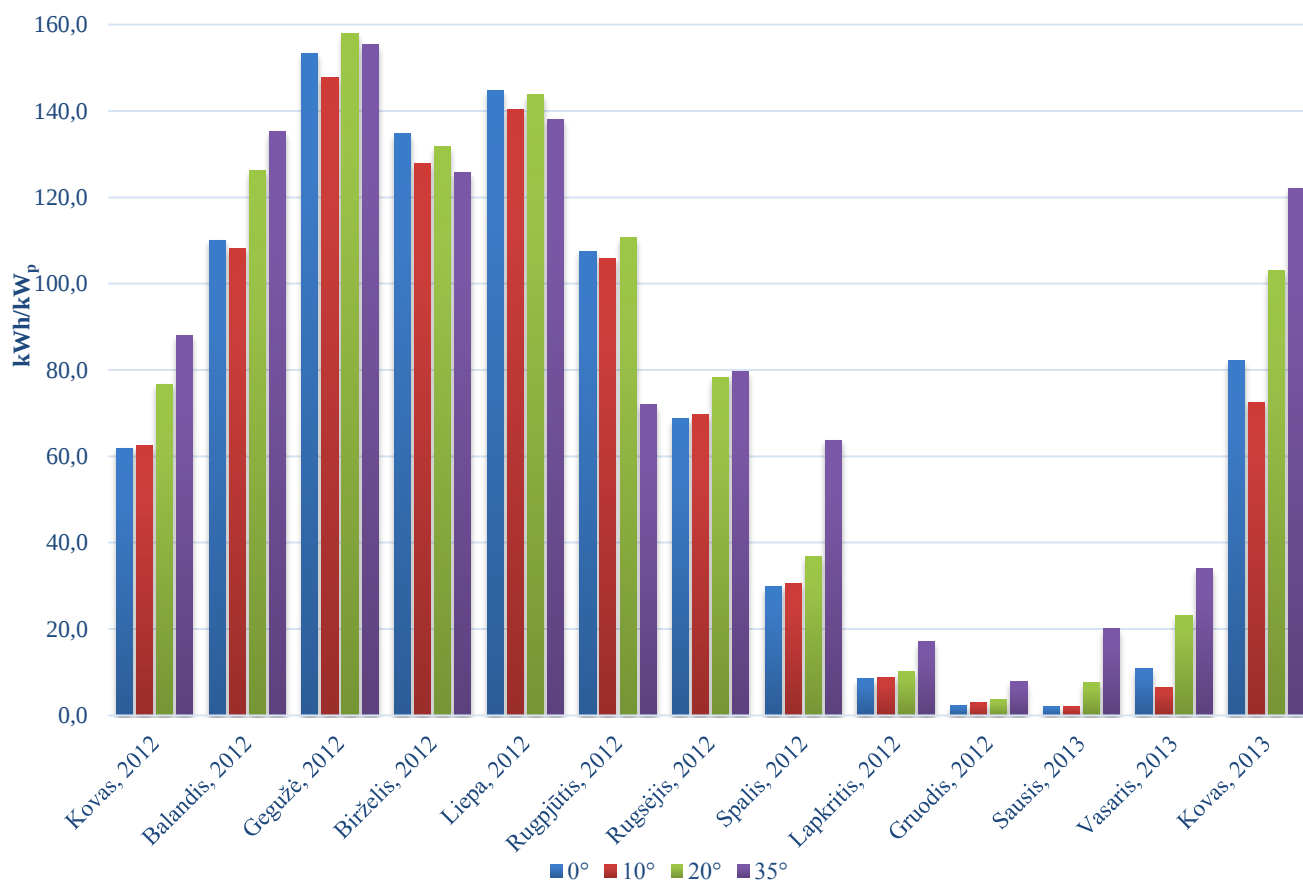
$$Y_F = \frac{E}{P_0}; \quad (2.1)$$

Čia: Y_F –energijos generavimas iš įrengtos 1 kW galios sistemos, kWh/kW_p;

E –patiektas energijos kiekis į elektros tinklą, kWh;

P_0 – saulės baterijų galia, prijungta prie keitiklio, kW.

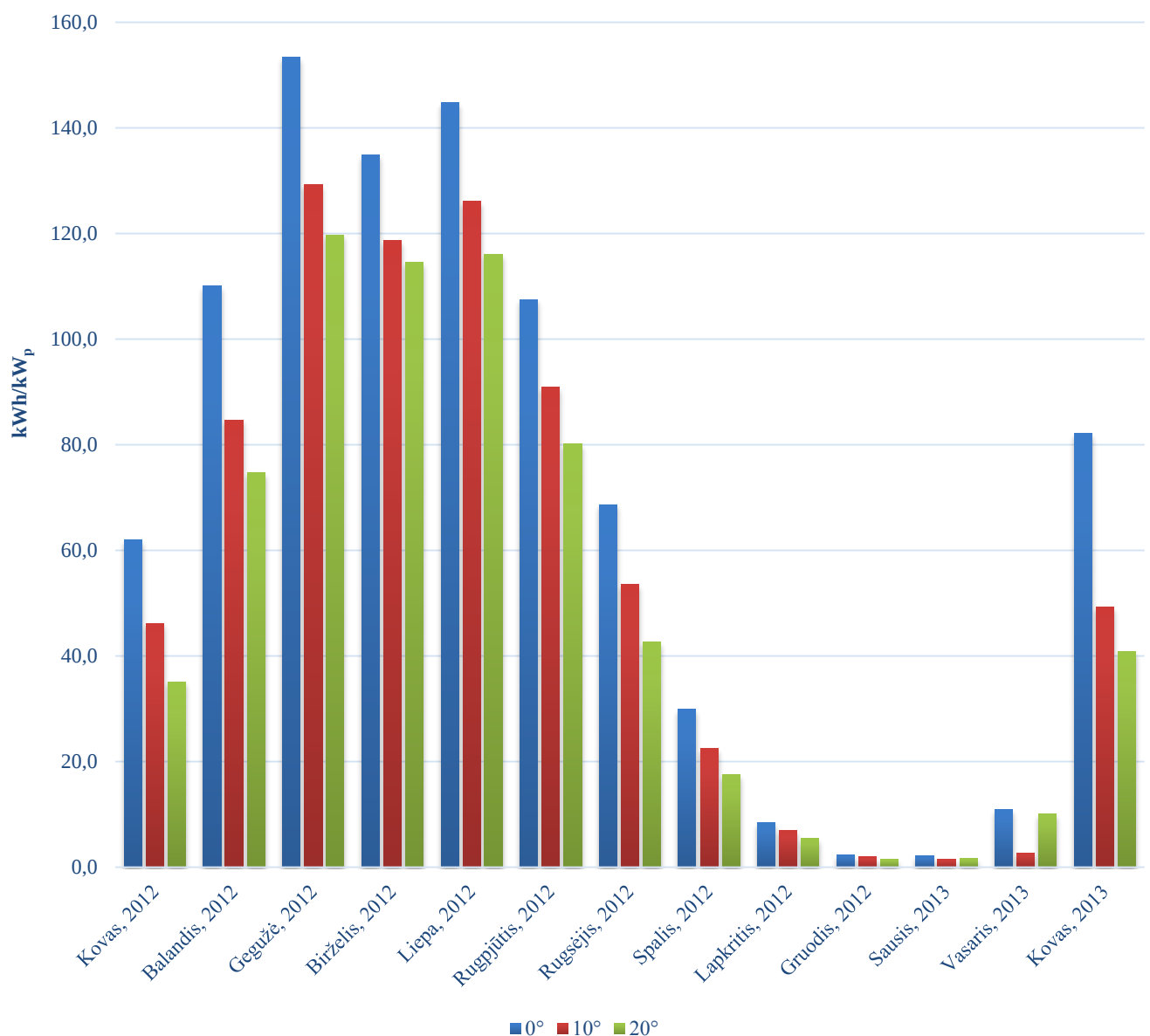
Skirtingų galių sistemos našumo rodikliai yra pateikiami atžvilgiu 1 kW galios sistemos.



2.5 pav. Saulės baterijų energijos generavimas kWh/kW_p esant skirtingam posvyrio kampui (pietinė orientacija)

2.5 pav. gautas grafikas parodo teisingai parinkto posvyrio kampo reikšmę energijos generavimui. Vasaros metu yra pagaminama didžioji dalis metinės energijos. Todėl naudinga optimalų posvyrio kampą nustatyti būtent šiam laikotarpiui. Birželio 21 d. saulės trajektorija yra maksimume (žr. 2.3 pav.), sekančiais mėnesiais trajektorijos kampas su horizontalia mažėja. Vasaros mėnesiais (gegužę, birželį, liepą, rugpjūtį), pranašumą turi moduliai, įrengti mažu posvyrio kampu. Didesnio posvyrio kampo privalumas atsiranda rugsėjį, nes saulės trajektorijos kampas sumažėja. Aukščiau esančiame grafike matyti, kad 35° posvyrio kampu įrengtas masyvas (lapkritį, gruodį, sausį) generuoja beveik dvigubai daugiau energijos, lyginant su 0° kampu įrengtais moduliais.

Labai didelę reikšmę posvyrio kampas turi sistemoms, kurios orientuotos į šiaurę. Tai vizualiai galime matyti 2.6 pav.

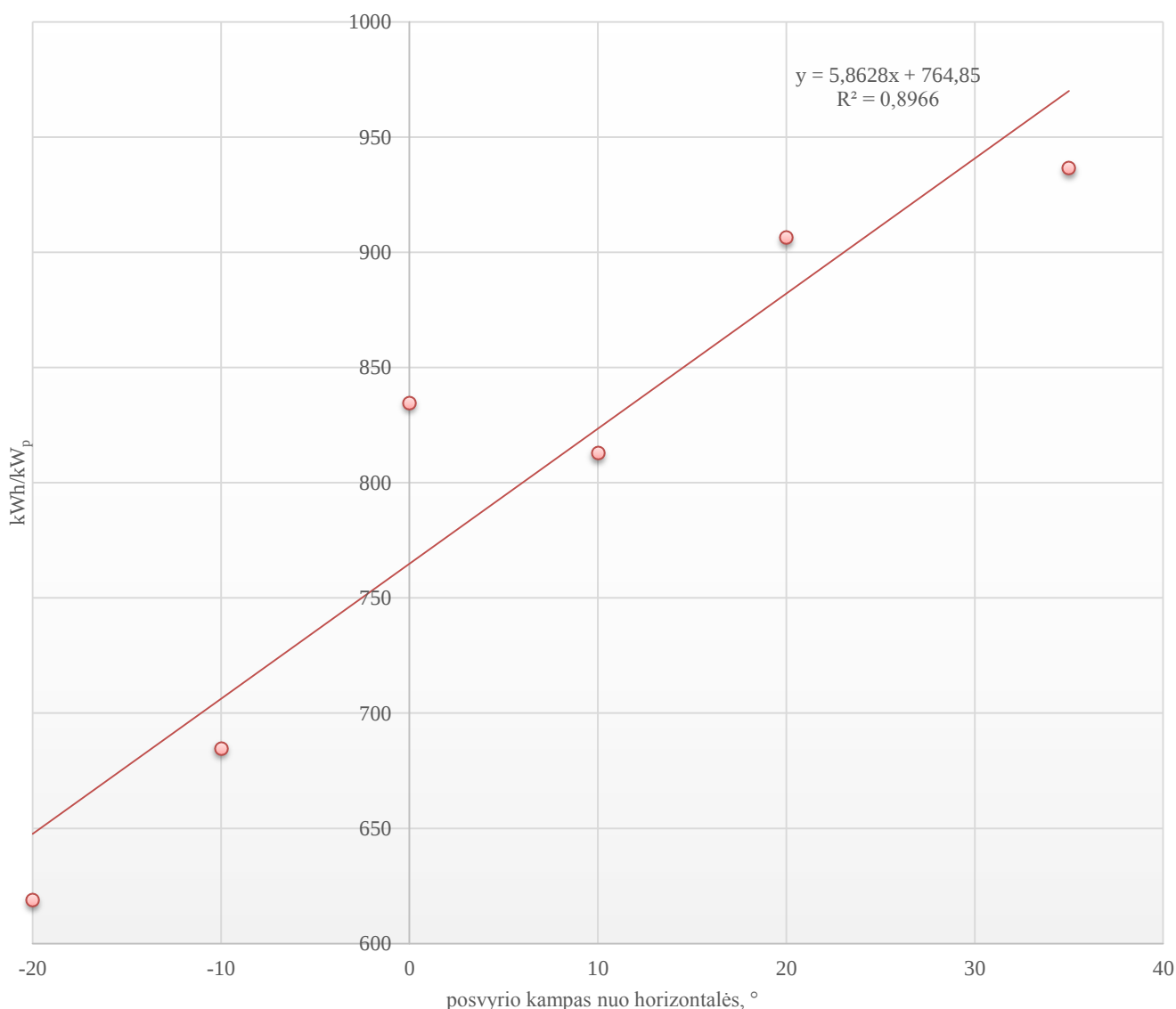


2.6 pav. Saulės baterijų energijos generavimas kWh/kW_p esant skirtingam posvyrio kampui (šiaurinė orientacija)

Esant tokiai saulės baterijų masyvų orientacijai, nedidelis posvyrio kampo didinimas stipriai sumažina metinę generuojamą energiją. Įrengus masyvus 10° kampu vietoj 0° , metinis energijos generavimas sumažėja 22 proc., o esant 20° kampui, prarandame 35 proc. generuojamos elektros energijos, lyginant su 0° įrengtu saulės baterijų masyvu.

Išnagrinėti vienerių metu saulės baterijų duomenys rodo, kad Lietuvos sąlygomis geriausia saulės baterijas įrengti 35° kampu. 1 kW galios sistema esant tokiam posvyrio kampui, generuos apie 940 kWh per metus. Tai yra 10,8 proc. daugiau lyginant su sistema, įrengta 0° kampu, kuri generuotu apie 830 kWh per metus.

Gauti metiniai saulės baterijų masyvų duomenys pavaizduoti 2.7 pav. Tiesė šiame pav. vaizduoja 1 kW įrengtos galios jėgainės energijos generavimo potencialą esant skirtingam sistemos posvyrio kampui.

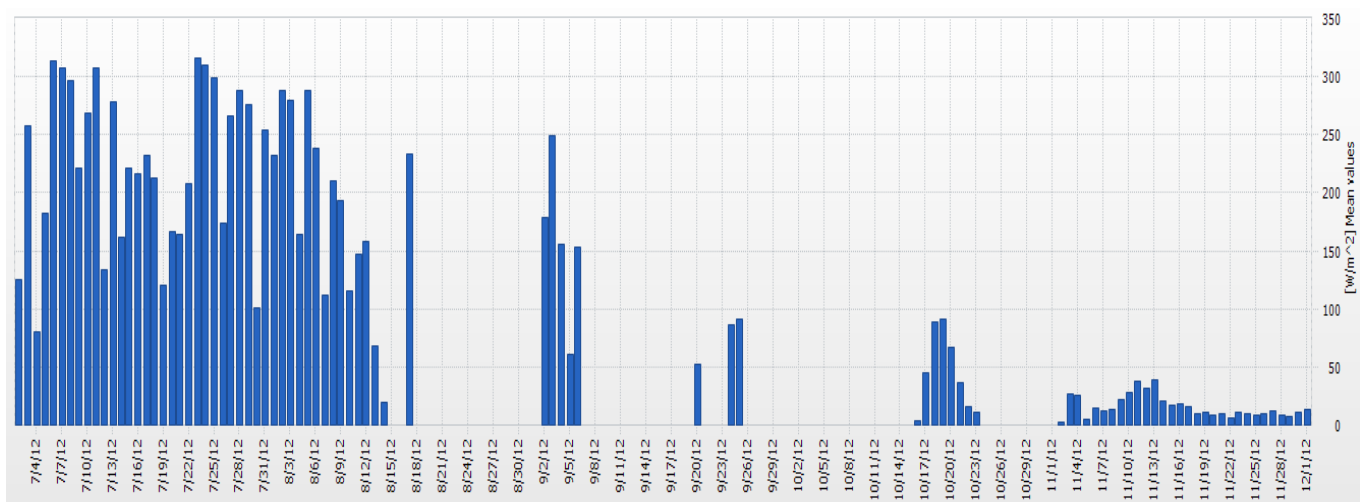


2.7 pav. Metinis energijos generavimas kWh/kW_p, esant skirtingam posvyrio kampui (minusinis kampas reiškia masyvai yra orientuoti į šiaurę, teigiamas kampas reiškia pietinę orientaciją)

2.2. Apšvietos matavimai

Apšvietos matavimai buvo atlikti „SensorBox“ įrenginiu, o visų metų apšvietos duomenys 1 valandos intervalais paimti iš www.sunnyportal.com. Reikia pažymėti, kad šioje duomenų bazėje nebuvo visų metų duomenų, nes būta registravimo įrangos sutrikimų, todėl trūksta kai kurių mėnesių duomenų. 2.8 pav. grafike galime matyti laikotarpius, kada buvo sutrikęs duomenų registravimas. Taigi, galime laikyti, kad nuo 2012-08-15 iki 2012-11-02 neturime apšvietos duomenų. Dėl šios priežasties bus gaunami nekorektiški saulės baterijų našumo skaičiavimai ateityje. Todėl šių mėnesių našumo skaičiavimai tolesniuose skyriuose nebus įtraukti.

Taip pat darbe panaudoti duomenis gautus tiesiai iš „SensorBox“ įrenginių. Parametrai šiuo atveju registruojami kas 5 min. Deja dėl „Webbox“ įrenginio atminties trūkumo, visų „Argintoje“ įrengtų



2.8 pav. Apšvietos parametrų registravimo įrangos sutrikimai

sistemų duomenis užpildo atmintį per 5 d. ir nauji duomenys užrašomi ant esamu.

2.5 lentelė. „Sensorbox“ apšvietos matavimo įrenginio techniniai parametrai (SMA, 2010)

	Sunny Sensorbox sensor
Jutiklio tipas	amorphous silicon (a-Si)
Matavimo ribos	0 W/m ² ... 1,500 W/m ²
Matavimo tikslumas	± 8 %
Rezoliucija	1 W/m ²

Duomenys, kurie buvo registruojami kas 5min, galima perskaičiuoti į paros apšvietą naudojantis šia formule:

$$G_{dieninė} = \sum_{i=1}^n (G_1 \cdot \frac{5}{60} + G_2 \cdot \frac{5}{60} \dots + G_n \cdot \frac{5}{60}); \quad (2.2)$$

Čia: G_1 – apšvieta, W/m^2 ;

G_n – apšvieta, kas 5 min, W/m^2 .

Kadangi apšvietos duomenys bus svarbūs tolesniems našumo rodiklio, efektyvumų skaičiavimams, todėl svarbu žinoti gautu duomenų tikslumą. 2012 m. Gegužės mėn. buvo didžiausia vidutinė apšvieta, todėl buvo nutarta palyginti šio mėnesio apšvietos parodymus iš 3 vienodu jutiklių, pritvirtintų prie 3 skirtingų saulės baterijų masyvų. Visi trys masyvai įrengti 0° posvyrio kampų. Masyvo su CIS saulės baterijomis jutiklio parodymai prieinami ne viso Gegužės mėnesio, o tik 23 d.



2.9 pav. 2012 m. Gegužės mėn. apšvieta Wh/m^2 , 0° posvyrio kampas

2.10 pav. pateikti gauti duomenys. Esant mažai apšvietai, visų 3 jutiklių parodymai yra beveik identiški. Didesni duomenų skirtumai gaunami esant didelei apšvietai.

Nors visi 3 jutikliai įrengti identiškomis sąlygomis, CIS masyvo jutiklis registravo didžiausias apšvietas. Susumavus skirtingų jutiklių 23 d. parodymus paaiškėjo, kad CIS masyvo jutiklio parodymai bendrai buvo 8,8 proc. didesni už a-Si ir 3,4 proc. už α -Si/ μ -Si masyvo jutiklio. CIS ir a-Si parodymai skyrėsi 7,2 – 14,1 proc. ribose, o CIS ir α -Si/ μ -Si jutiklių skirtumas buvo 2 – 9,5 proc. ribose.



2.10 pav. 2013–02–25d apšvieta iš 2 jutiklių, duomenų registravimo intervalas 5 min

2.10 pav. pateiktas apšvietos grafikas, 2013–02–25d. Duomenų registravimo intervalas 5 min, todėl galime tiksliau matyti apšvietos kitimą dienos bėgyje. Čia pavaizduoti tik 2 jutiklių esančių ant a–Si ir α –Si/ μ –Si masyvų duomenys. α –Si/ μ –Si masyvo jutiklio duomenys visais atvejais buvo didesni už a–Si. Parodymai svyravo 2 – 18,8 proc. ribose.

Toks netikslumas matavimuose galėjo atsirasti dėl jutiklių netobulumo gamyboje ir didelių klaidų duomenų registravimo įrangoje. Gauta matavimų paklaida atitinka gamintojo nurodytas vertes.

2.3. Saulės baterijų energijos gamybos ir efektyvumų tyrimas

Siekiant palyginti skirtingo dydžio fotovoltines elektrines, tiesiogiai negalime lyginti masyvų sugeneruotus energijos dydžius. Todėl fotovoltinėje pramonėje, yra naudojamas našumo rodiklis. Tai svarbiausias rodiklis, kuris leidžia įvertinti jėgainės efektyvumą. Šis rodiklis yra santykis tarp sugeneruotos ir teoriškai esamos energijos. Dydis nepriklauso nuo masyvo orientacijos, instaliuotos galios. Dėl to galima palyginti jėgaines, esančias skirtingose vietovėse ir skirtingo dydžio (SMA, 2010).

$$PR = \frac{E_{AC}}{(G_i \cdot A) \cdot \eta_{mod}}; \quad (2.3)$$

- Čia:
- E_{AC} – į elektros tinklą patiektas energijos kiekis, kWh;
 - G_i – mėnesinė apšvieta, matuojama su ant masyvo esančiu jutikliu, kWh/m²;
 - A – fotovoltiniame masyve esančių modulių plotas, m²;
 - η_{mod} – modulių energijos konversijos naudingumas, proc.

Kuo šio parametro vertė yra arčiau 100 proc., tuo jėgainė dirba efektyviau. Našumo parametras negali būti didesnis arba lygus 100 proc., nes neišvengiamai sistemoje atsiranda nuostoliai. Didelio našumo jėgainės gali pasiekti net 80 proc. rodiklį.

Kiti naudingi parametrai:

- Santykinė išeiga,

$$Y_r = \frac{G_i}{G^*}; \quad (2.4)$$

Čia: G^* – apšvieta prie standartinių testavimo sąlygų, 1000 W/m².

- Masyvo našumas,

$$Y_a = \frac{E_{DC}}{P_M}; \quad (2.5)$$

Čia: E_{DC} – energija, sugeneruota saulės baterijų ir patiekta į keitiklį, kWh;
 P_M – saulės baterijų masyvo instaliuota galia, kW.

- Sistemos našumas,

$$Y_f = \frac{E_{AC}}{P_M}; \quad (2.6)$$

Bendri nuostoliai (L_c) dažniausiai atsiranda dėl aukštos modulio temperatūros esant mažai apšvietai, atsirandančiai nuo šešėlių, sniego arba ledo, o taip pat nuostoliai laiduose ar apsauginiuose dioduose.

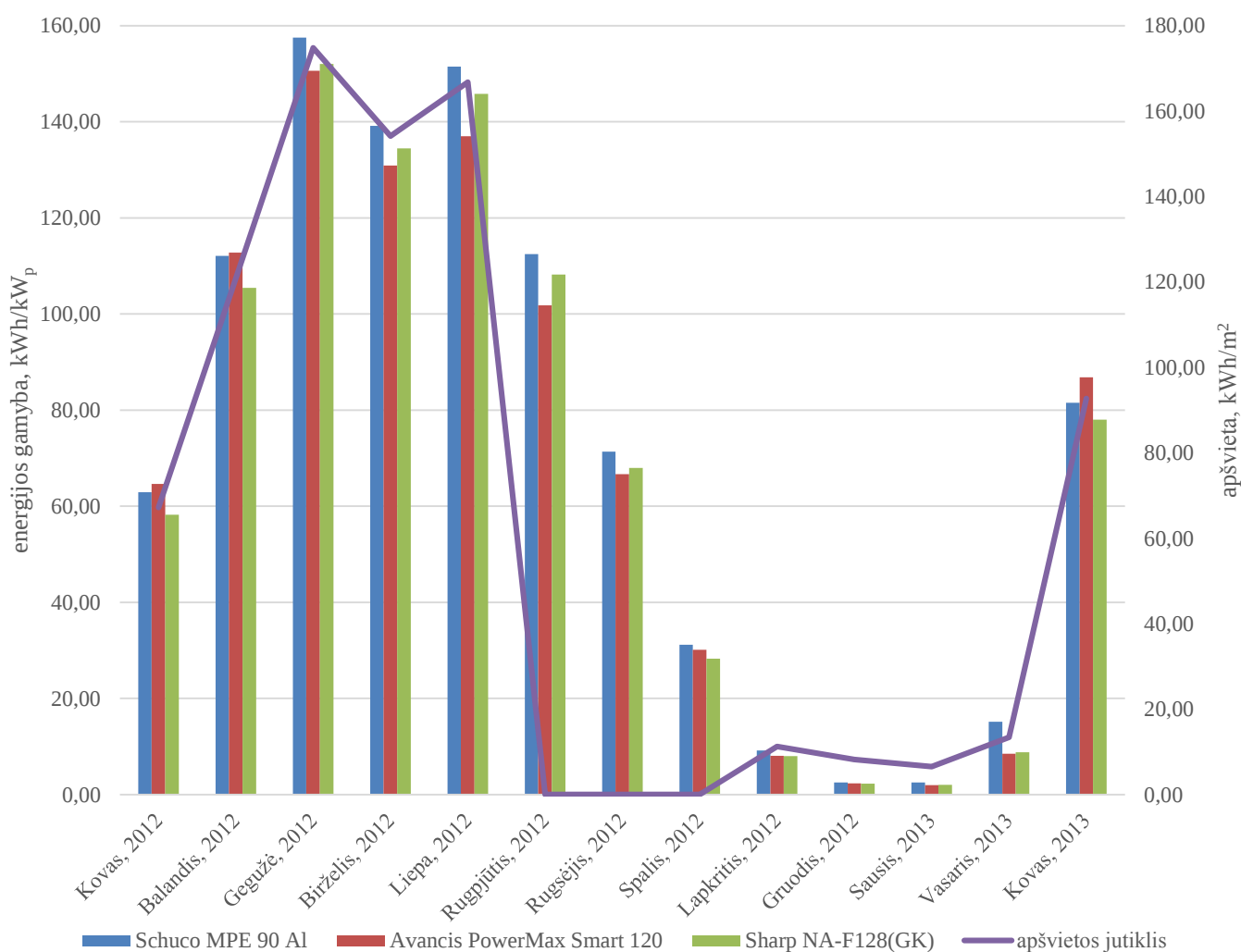
$$L_c = Y_r - Y_a; \quad (2.7)$$

Sistemos nuostoliai (L_s), atsirandantys keitiklyje:

$$L_s = Y_a - Y_f; \quad (2.8)$$

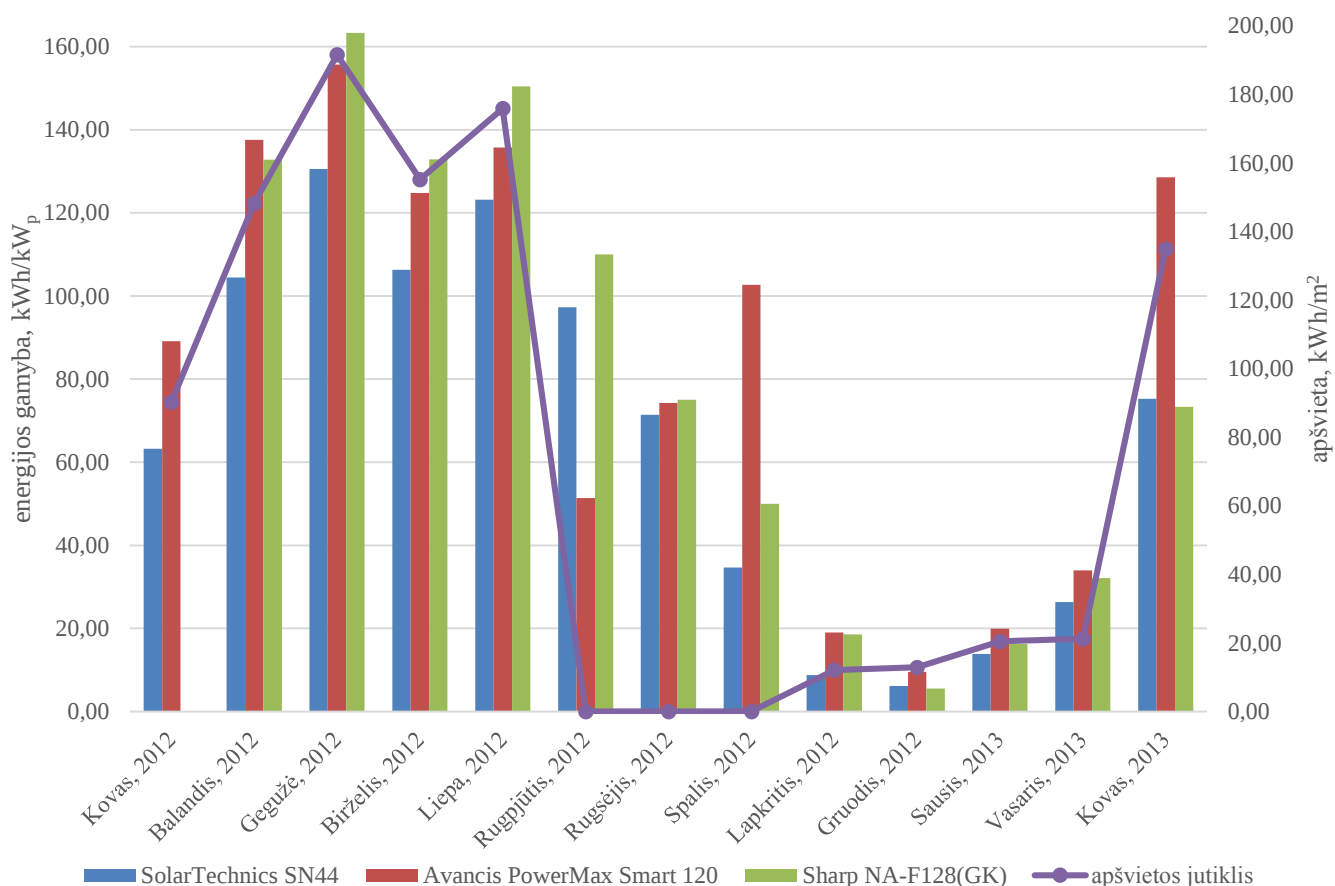
Instaliuotos masių galios paimtos iš 2.3 lentelės.

2.11 pav. „Schuco MPE 90 Al“ modulių energijos gamyba yra didesnė už kitų 2 gamintojų baterijas. Šis pranašumas aiškiai matomas gegužės, birželio, liepos, rugpjūčio mėnesiais, kuriais „Schuco“ moduliai vidutiniškai 8 proc. generuoja santykinai daugiau energijos negu „Avancis“ ir 7,8 proc. daugiau nei „Sharp“ moduliai.



2.11 pav. Mėnesinė skirtingų saulės baterijų santykinė energijos gamyba ir apšvieta, kai modulių posvyrio kampas 0°

Per metus „Schuco“ moduliai sugeneravo 4,9 proc. daugiau energijos už „Avancis“ ir 5,2 proc. už „Sharp“ saulės baterijas.



2.12 pav. Mėnesinė skirtingų saulės baterijų santykinė energijos gamyba ir apšvieta, kai modulių posvyrio kampas 35°

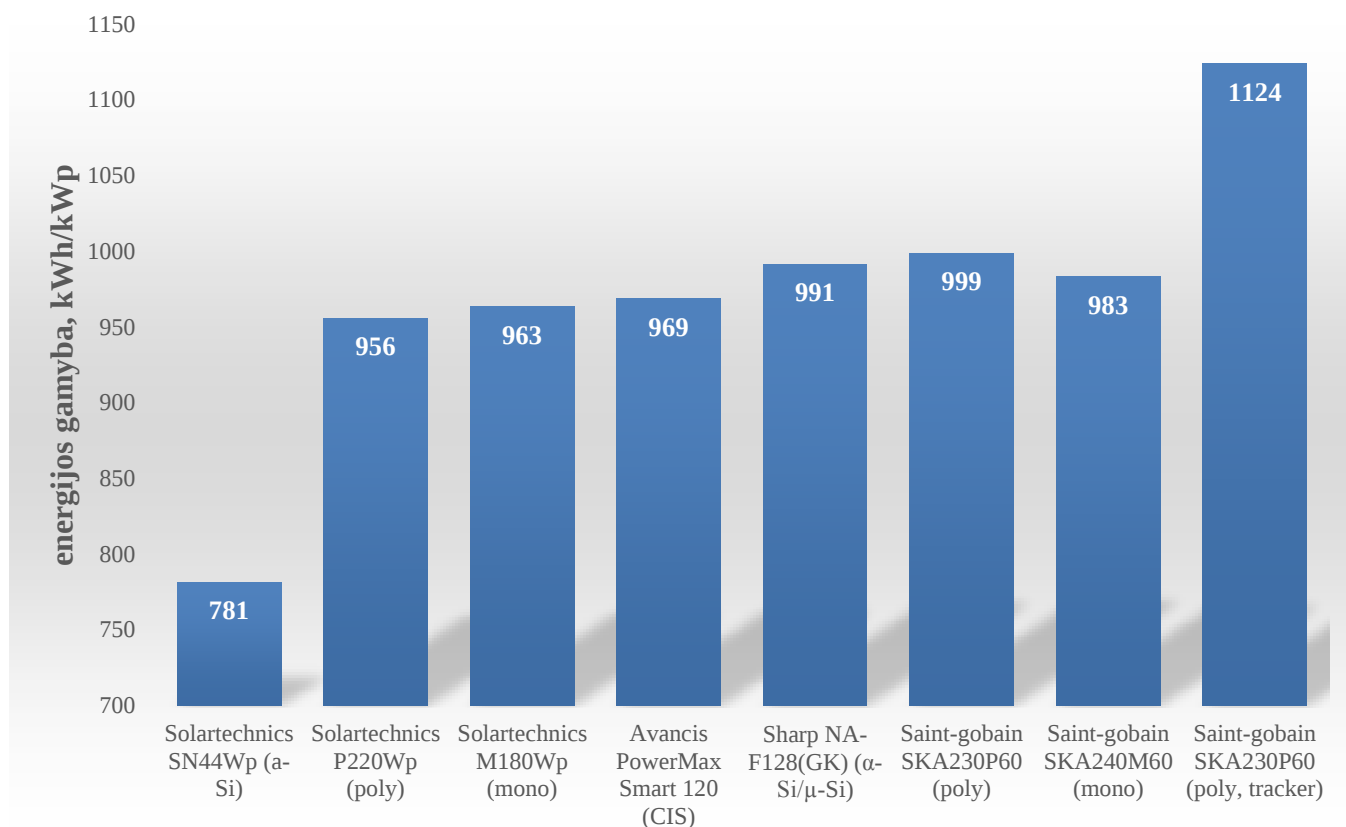
Esant optimaliam saulės baterijų masyvų kampui Lietuvos sąlygomis 35° (2.1 skyrius), didesnę santykinę našumą pasiekia „Sharp NA-F128(GK)“ baterijos. 2.12 pav. yra pavaizduoti 3 gamintojų baterijų santykiniai našumai esant 35° posvyrio kampui. 2012 Kovo mėn. nebuvo registruojami „Sharp“ masyvo duomenys, todėl jie nėra parodyti aukščiau esančiame grafike.

„Sharp“ baterijų pranašumas ypač didelis gegužės, birželio, liepos mėnesiais. Tai galima paaiškinti α -Si/ μ -Si modulio struktūra. Tokia technologija turi mažą temperatūrinį koeficientą ir sugeria labai platų spektro ruožą. Kas leidžia esant didelei apšvietai ir aukštai modulių temperatūrai pasiekti aukštus našumo rodiklius. Vidutiniškai per šiuos 3 mėn. „Sharp“ moduliai santykinai sugeneravo 19,4 proc. daugiau energijos už „SolarTechnics“ ir 6,3 proc. už „Avancis“ gamintojo modulius. Lyginant 10 mėnesių (2012-04-01 iki 2013-02-01) skirtingų gamintojų modulių santykinius našumus, „Sharp“ baterijos pagamino 18,5 proc. energijos už „SolarTechnics“ ir 2,2 proc. už „Avancis“ modulius.

Reikėtų atkreipti dėmesį į žiemos mėnesius, kai yra santykinai maža apšvieta. Tuo atveju, pranašumą įgauna „Avancis“ saulės baterijos, pagamintos CIS technologijos pagrindu. Ši technologija geba efektyviau perdirbti išsklaidytą ir mažos apšvietos saulės spinduliuotę. Šis pranašumas žiemos laikotarpiu nesuteikia persvaros prieš kitus 2 skirtingus baterijų tipus lyginant metinę generuojamą energiją. Nes žiemos metu

gaminama elektros energija yra menka lyginant su vasaros, rudens laikotarpiu. Todėl metinis generuojamas santykinės energijos kiekis yra „Sharp“ gamintojo modulių naudai.

Įdomu palyginti ir kitų technologijų modulių metinius našumus su šiame darbe tiriamomis fotovoltinėmis sistemomis. UAB „Arginta“ yra įrengtos sistemos su kitų gamintojų ir technologijų saulės baterijomis. Tai „Solartechnics“ ir „Saint-gobain“ monokristalinės ir polikristalinės sistemos. 2.13 pav. pateikti šių skirtingų sistemų metinė specifinė energijos gamyba.

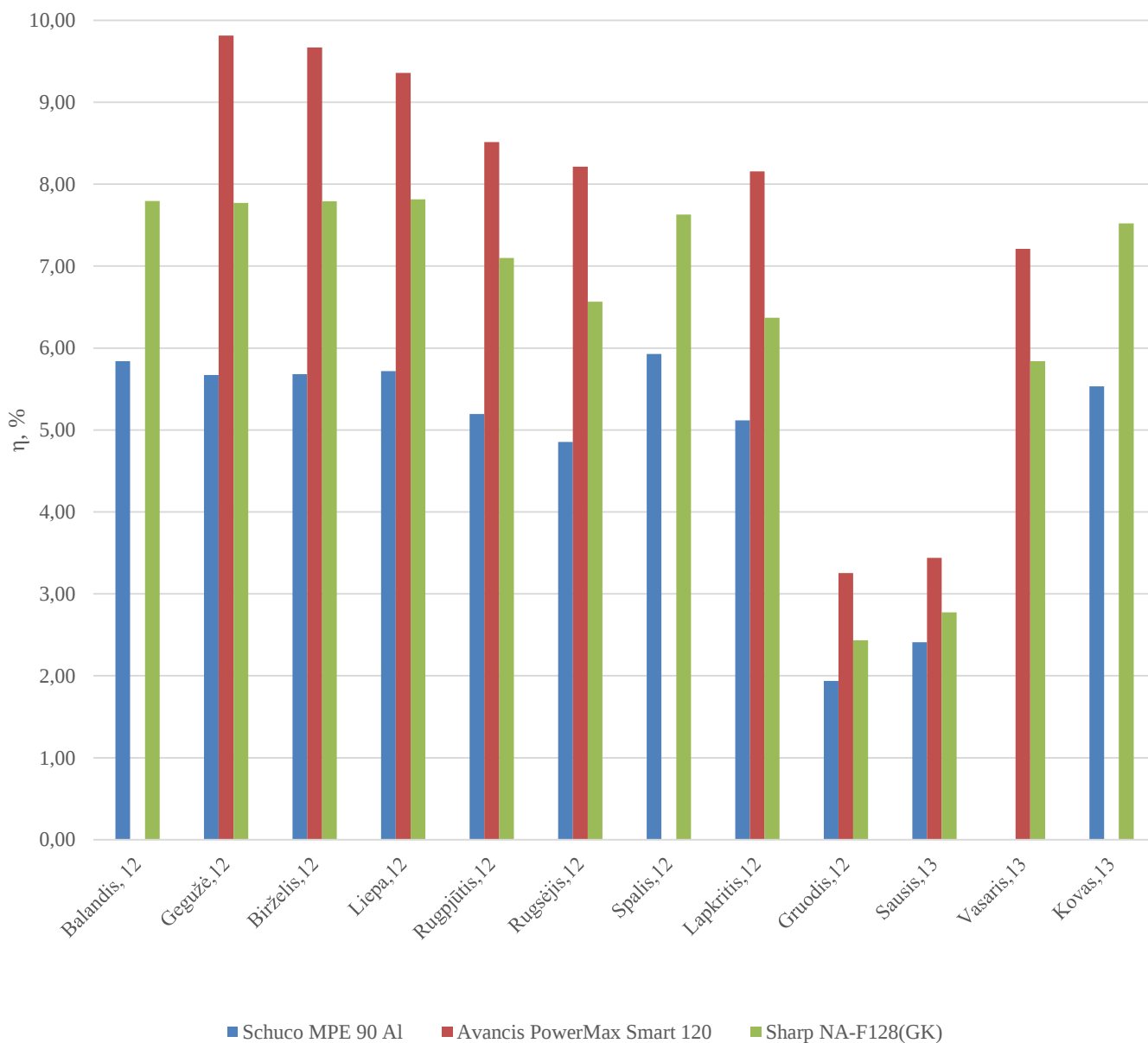


2.13 pav. Saulės baterijų specifinė metinė energijos gamyba kWh/kW_p (2012-05-01 – 2013-04-30) (posvyrio kampas 35°)

Dėmesį atkreipti reikėtų į „Saint-gobain SKA230P60“ (poly, tracker) masyvą. Moduliai yra sumontuoti ant kintamo kampo rėmo, todėl šios sistemos specifinė energijos išeiga yra gerokai didesnė už kitų pavaizduotų sistemų. Išskirti taip pat reikėtų „Solartechnics“ (a-Si) masyvą, kurio specifinė išeiga tėra 781 kWh/kW_p. Šie duomenys atitinka 2.12 pav. pavaizduotais šio tipo baterijų masyvo prastais energijos gamybos duomenimis. Tokia pačia (a-Si) technologija pagaminti „Schuco“ baterijų masyvai nesant optimaliam posvyrio kampui (0°, 10°) pasiekia didesnę specifinę išeigą. Neskaitant sistemos su kintamo posvyrio kampo sistema, „Sharp“ baterijos užima 2 vietą pagal specifinę išeigą, esant 35° posvyrio kampui. Pirmoje vietoje lyderė yra sistema, generavusi 999 kWh/kW_p ir susidedanti iš „Saint-gobain SKA230P60“ polikristalinių modulių. Nedaug atsiliko iš „Sharp NA-F128(GK)“ (α -Si/ μ -Si) modulių sudaryta sistema, kuri per metus sugeneravo 991 kWh/kW_p.

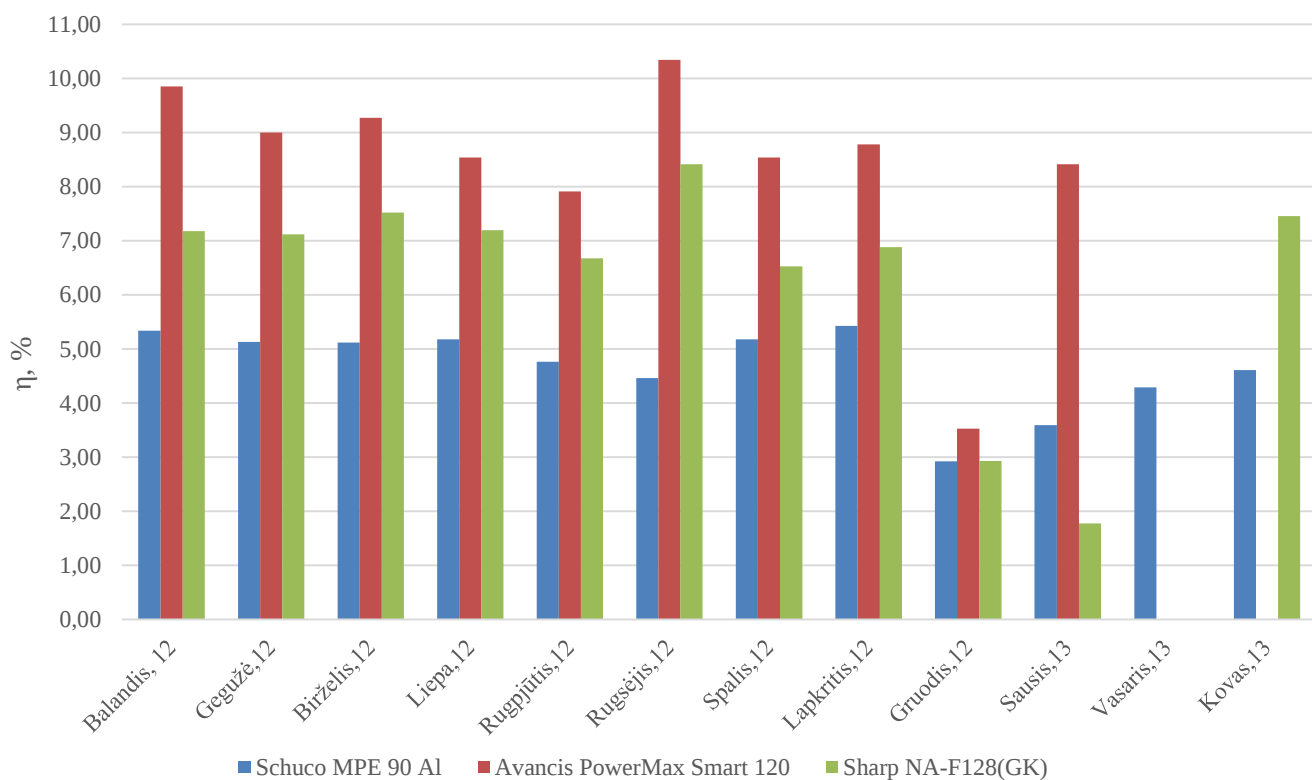
Kaip matyt iš šiame darbe ištirtų 4 gamintojų 3 skirtingų technologijų, plonaplėveliniai fotovoltiniai moduliai beveik nenusileidžia monokristaliniams ir polikristaliniams moduliams.

Kitas įdomus parametras skirtingų masių bendras sistemos naudingumo koeficientas ir jo kitimas skirtingais mėnesiais. Į šį dydį įeina keitiklio ir saulės baterijų nuostoliai.

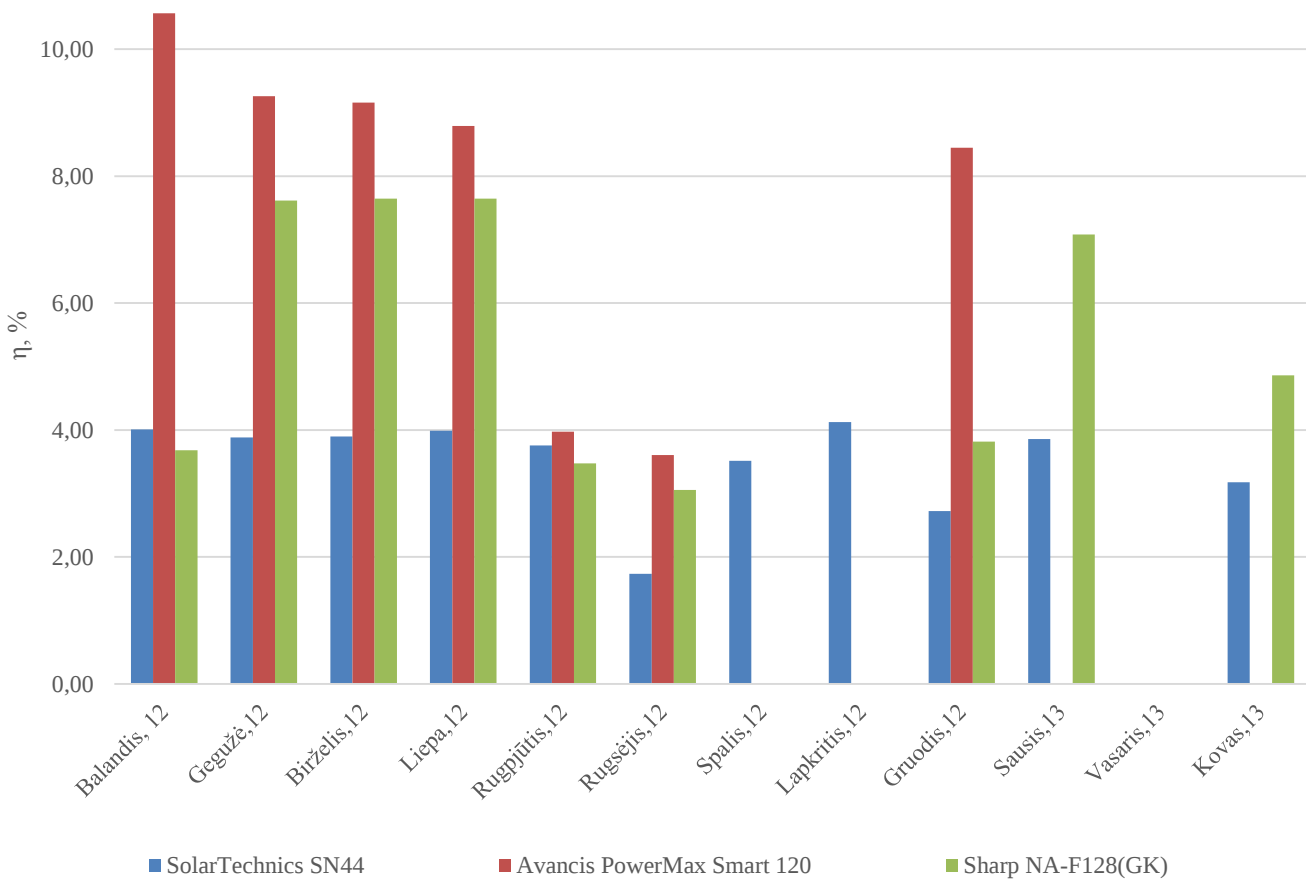


2.14 pav. Skirtingų gamintojų saulės baterijų masių sistemų efektyvumai, esant 0° laipsnių posvyrio kampui

Didžiausią efektyvumą turi „Avancis“ gamintojo fotovoltiniai moduliai. Tai akivaizdžiai matyti 2.14 pav. Maksimalus šių modulių naudingumas esant optimaliomis sąlygomis siekia 10,3 proc. Didžiausi efektyvumai pasiekiami gegužės, birželio, liepos mėnesiais. „Avancis“ saulės baterijos pasiekia 9,81 proc. gegužės mėnesi ir šis naudingumas pamažu mažėja, o gruodžio mėn. nukrenta iki 3,25 proc. Stabilesnį naudingumą skirtingais mėnesiais demonstruoja „Sharp“ saulės baterijos. Gegužės, birželio ir liepos mėnesiais šis efektyvumas kinta labai nežymiai ir siekia apie 7,8 proc.

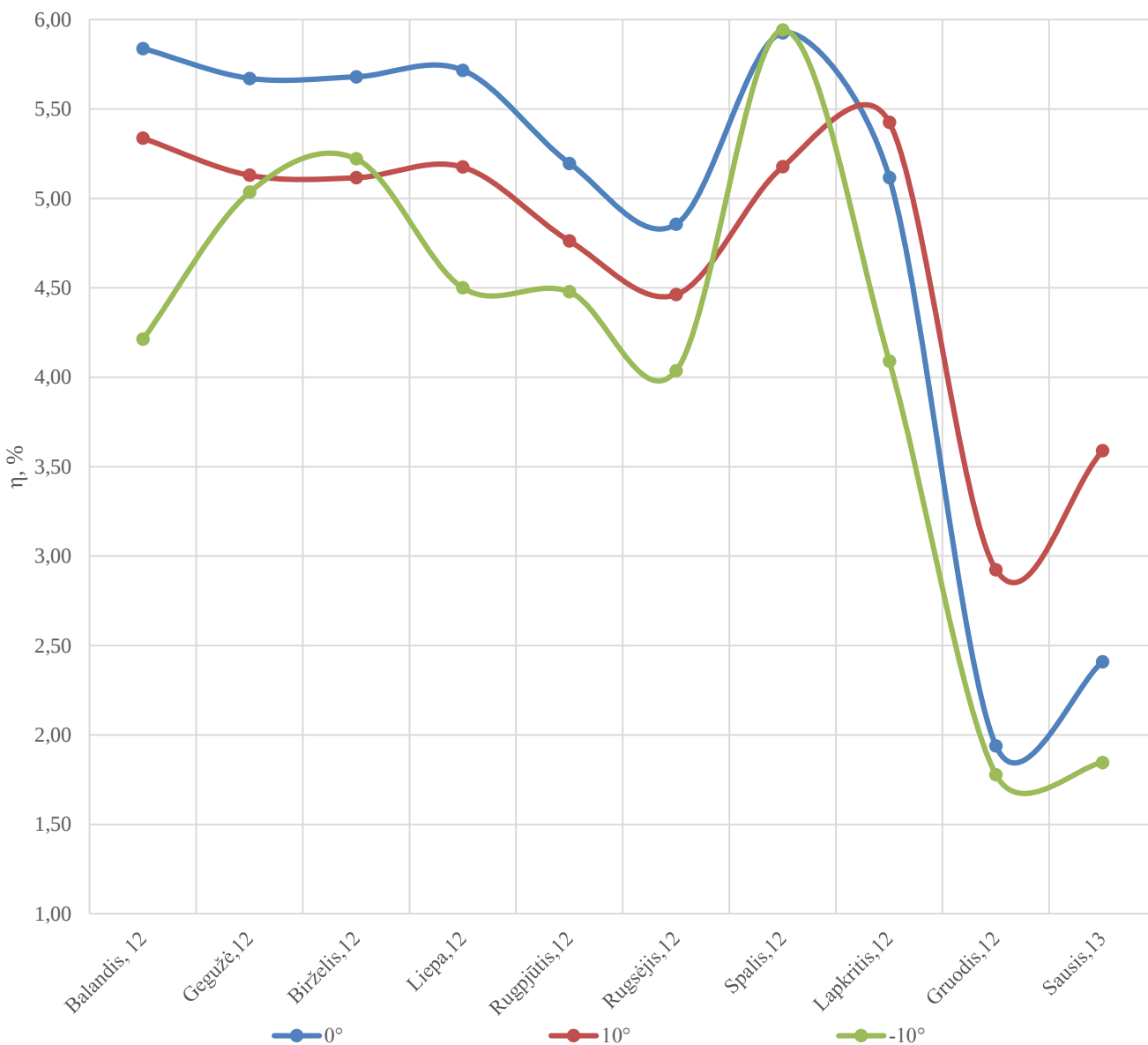


2.15 pav. Saulės baterijų masyvių sistemų efektyvumai, esant 10° ir 20° posvyrio kampui. „Schuco MPE 90 Al“ baterijų posvyrio kampas 10°, kitų modulių 20°



2.16 pav. Saulės baterijų masyvių sistemų efektyvumai, esant 35° posvyrio kampui

Daugiausia netikslumų gauta masyvuose, įrengtuose 35° posvyrio kampu. Patikimiausi skaičiavimai gauti „Schuco“ saulės baterijų masyvų, todėl jie pavaizduoti 2.17 pav.



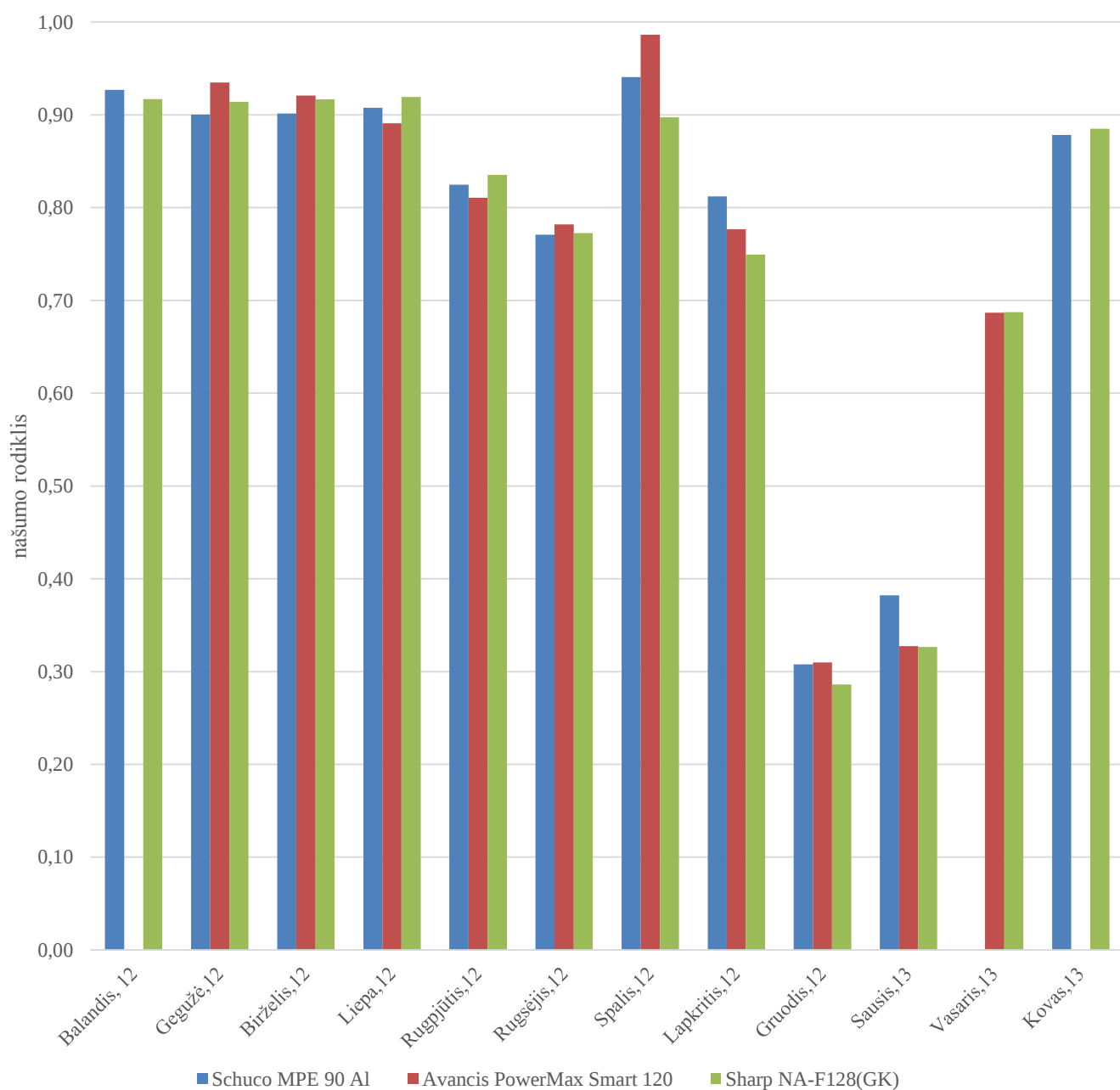
2.17 pav. Schuco saulės baterijų masyvų sistemos efektyvumai prie skirtingų posvyrio kampų. (-10° reiškia, kad masyvas orientuotas į šiaurę)

Didžiausią efektyvumą balandžio – rugsėjo mėnesiais pasiekia baterijos, įrengtos 0° posvyrio kampu. Balandį šio masyvo efektyvumas siekia 5,84 proc. ir rugsėjį krenta iki 4,86 proc. Baterijos, kurių posvyrio kampas yra 10° , geresnius rezultatus demonstruoja lapkričio – sausio mėnesiais. Lapkritį naudingumas siekia 5,43 proc. ir yra didesnis už 0° masyvo 5,12 proc. Masyvo, kuris buvo orientuotas į šiaurę, rezultatai yra prastesni už kitų 2 masyvų gautus efektyvumus.

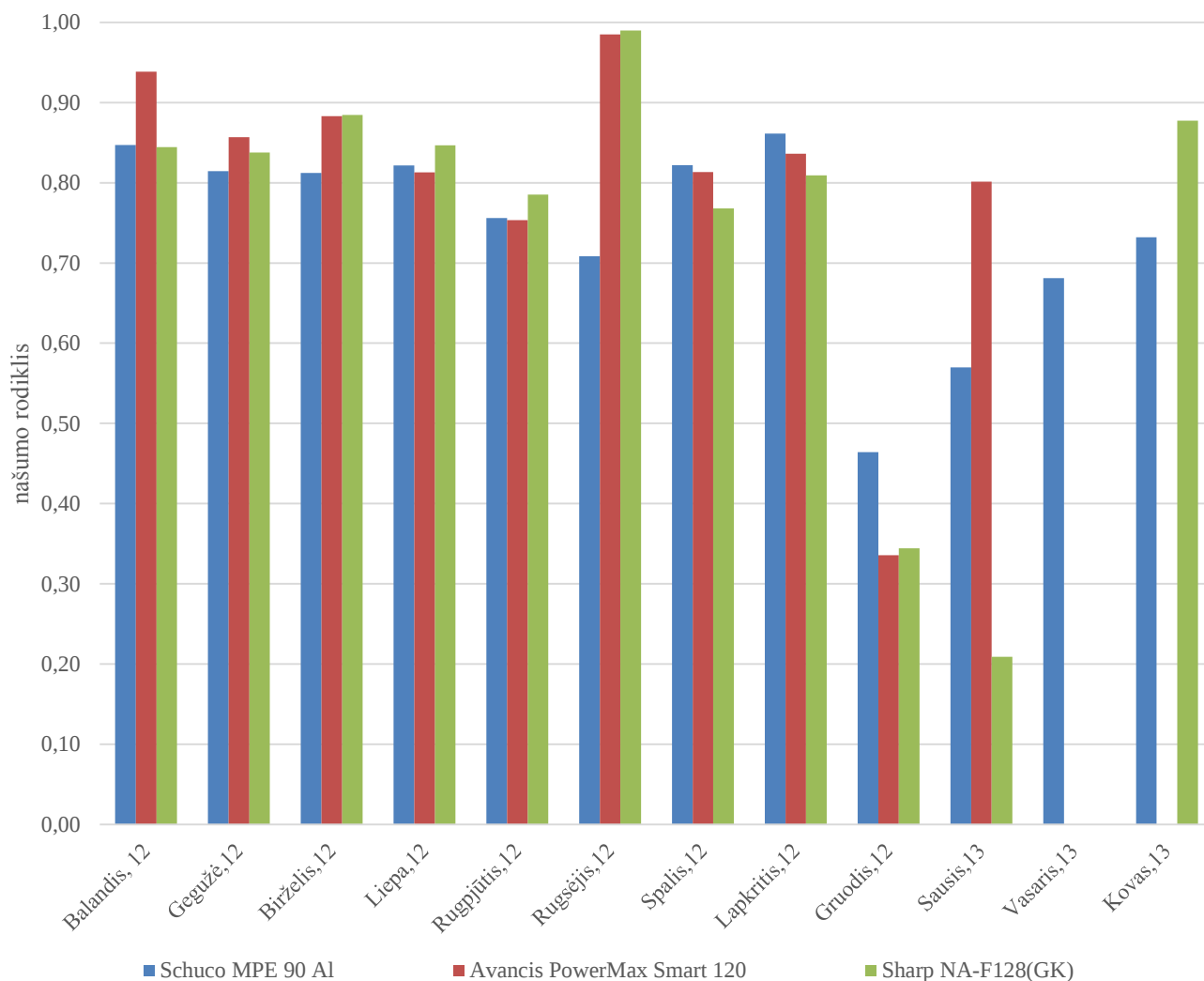
Šio skyrio pradžioje buvo aprašytas našumo rodiklio parametras, kuris leidžia palyginti skirtingas fotovoltines jėgaines. Tai geras metodas palyginti ir aptikti gedimus sistemoje.

Žemiau pavaizduoti 2.18 pav. ir 2.19 pav. grafikai su našumo rodikliais esant skirtingiems masyvų posvyrio kampams. Dėl apšvietos jutiklių duomenų trūkumo, įmanoma buvo suskaičiuoti rodiklius tik masyvų, įrengtų 0°, 10°, 20° posvyrio kampais.

Fotovoltinės sistemos esant 0° posvyrio kampui, pasiekia 0,90 našumo rodiklį balandžio – liepos mėnesiais. Rugpjūčio – spalio mėnesiais šie rodikliai yra netikslūs dėl apšvietos jutiklių duomenų registravimo sutrikimų šiais mėnesiais.



2.18 pav. Skirtingų masyvų našumo rodikliai, esant 0° posvyrio kampui

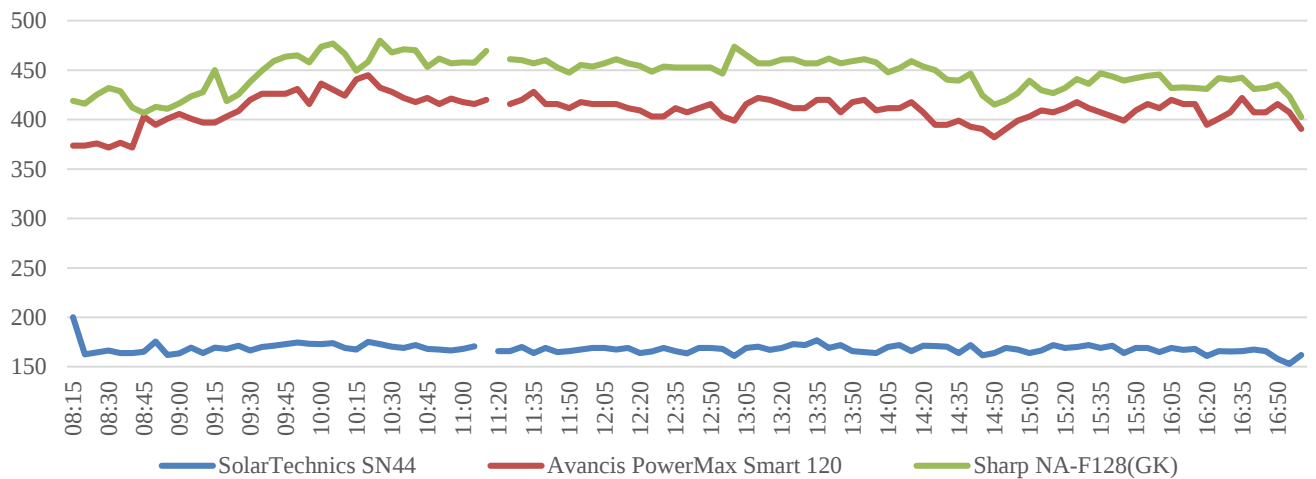


2.19 pav. Skirtingų masyvų našumo rodikliai, esant 20° posvyrio kampui („Schuco MPE 90 Al“ masyvo posvyrio kampas 10°)

Mažesni našumo rodikliai gauti masyvuose, kurie įrengti 10° ir 20° posvyrio kampais. Balandžio – liepos mėnesiais rodikliai viršija 0,80.

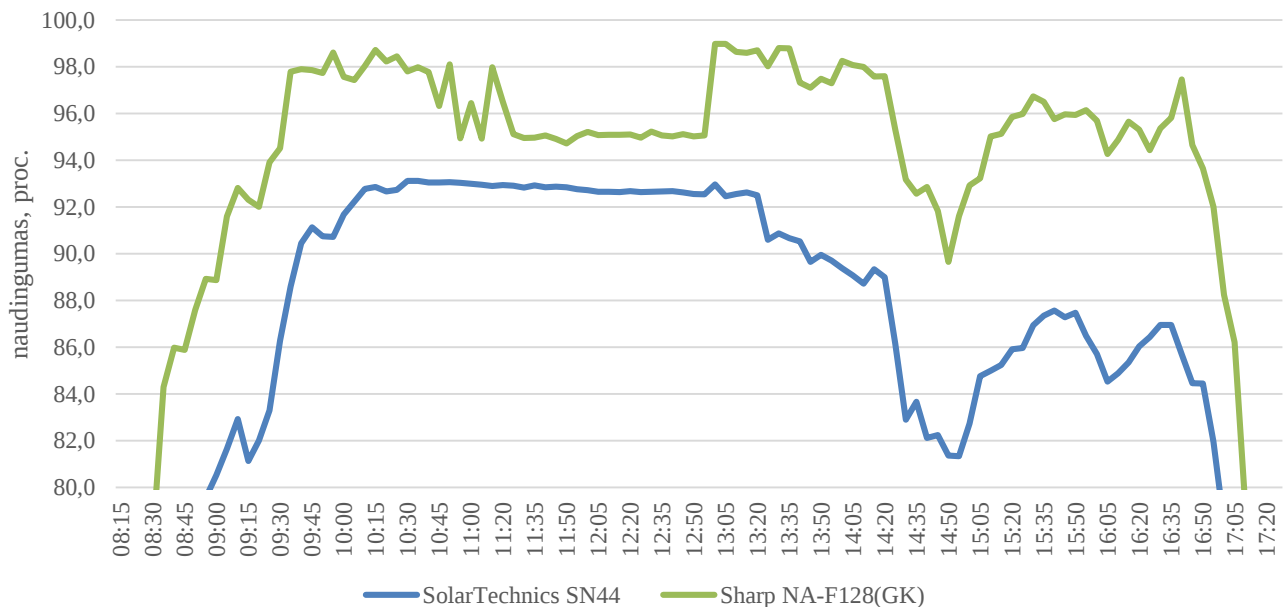
2.4. Aukštos nuolatinės įtampos poveikis keitiklio naudingumui

2.1 pav. matyti, kad keitiklio naudingumas priklauso nuo masyvo nuolatinės įtampos ir generuojamos galios. Tai ypač aktualu esant mažai apšvietai. Skirtingų technologijų baterijos turi skirtingas atviro jungimo įtampas. Todėl svarbu teisingai sugrupuoti saulės baterijas į bendrą masyvą, kad būtų pasiekama optimali nuolatinė įtampa keitiklio įėjime. 2.20 pav. esančios kreivės vaizduoja skirtingų saulės baterijų masyvų nuolatinės įtampas keitiklio įėjimuose. Kintanti apšvieta dienos bėgyje turi mažą poveikį įtampos kitimui. Didesnį poveikį šiam dydžiui turi kintanti modulio temperatūra.



2.20 pav. 2013-02-25 d. masyvų generuojamos nuolatinės įtamos, posvyrio kampas 35°

„Avancis“ ir „Sharp“ masyvų įtampa svyruoja 15 V ribose, o „SolarTechnics“ svyravimai nesiekia 10 V.

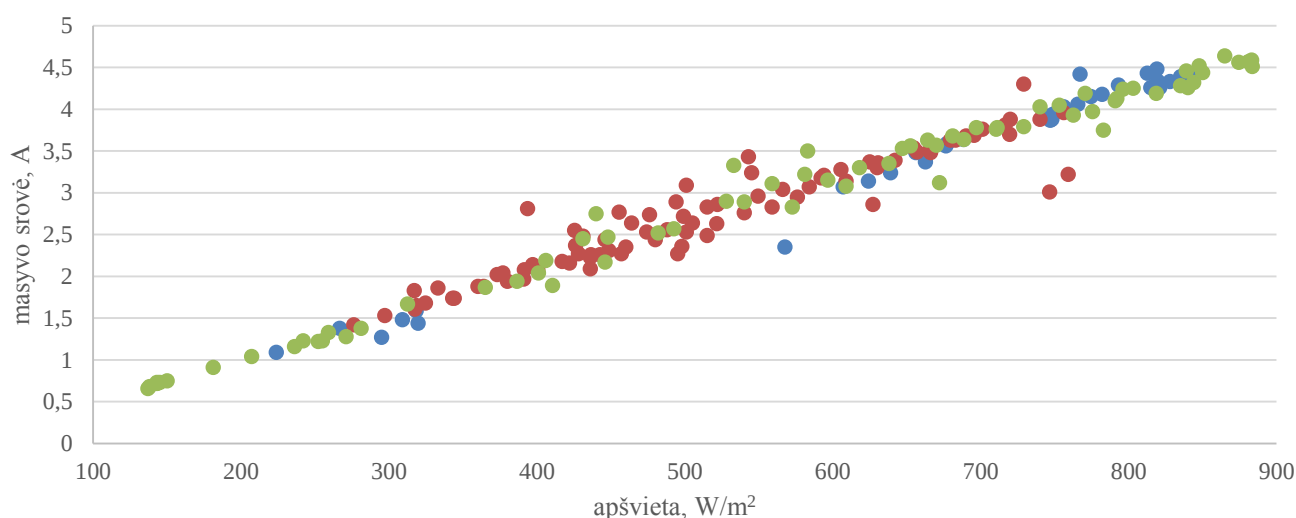


2.21 pav. 2013-02-25 d. baterijų masyvų keitiklių efektyvumai, posvyrio kampas 35°

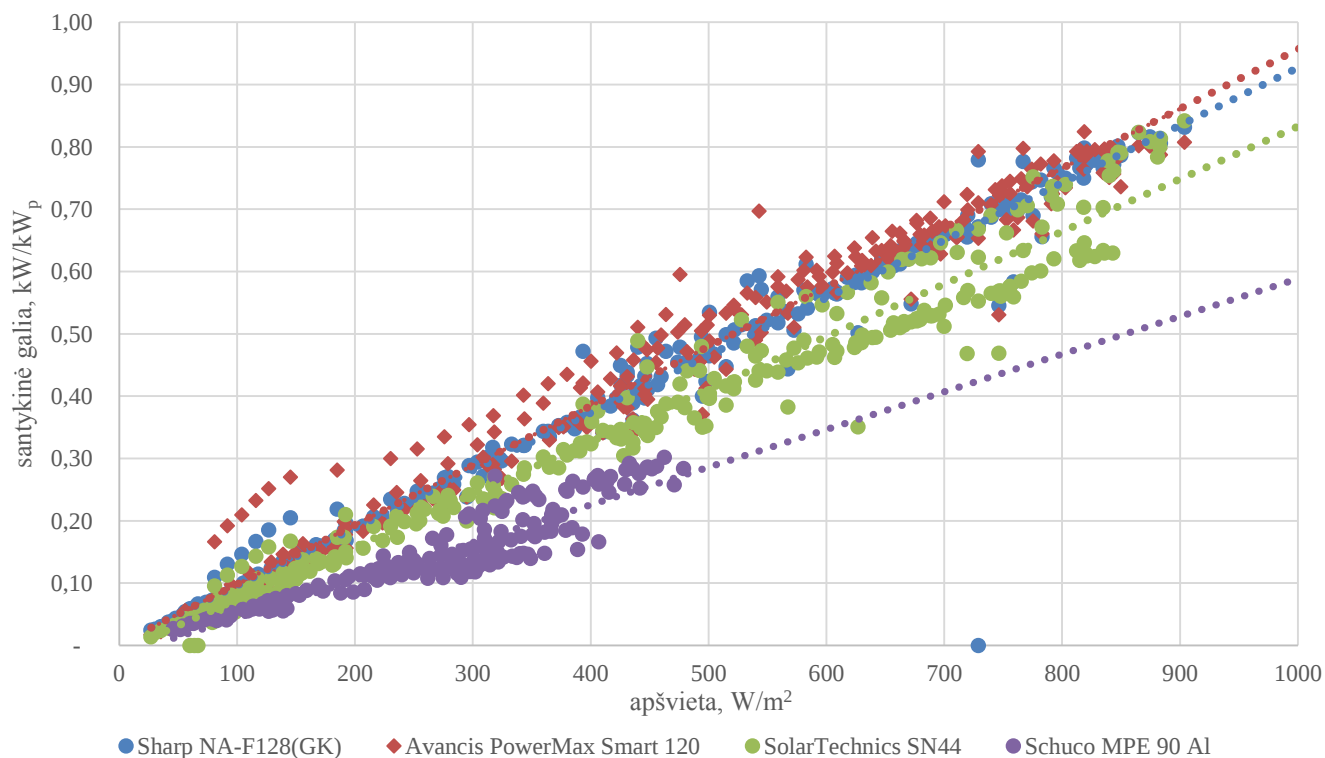
Tiriamoje sistemoje dauguma keitiklių yra „Sunny Boy 2500HF“ modelio, bet vienas masyvas prijungtas prie „Sunny Boy 1700HF“. Šių keitiklių techniniai parametrai gerokai skiriasi, didžiausias skirtumas yra jėgimo įtampa ir efektyvumas. 2.21 pav. pateiktas šių keitiklių naudingumo palyginimas prie vienodų apšvietos sąlygų. „Sharp“ masyvas prijungtas prie „Sunny Boy 2500HF“ įrenginio. Vidudienį „Sharp“ masyvo keitiklis pasiekė 95,1 proc. efektyvumą, mažesnės galios keitiklis 92,7 proc. Esant mažesnėms apšvietoms, šis skirtumas siekia 10 proc. „Sunny Boy 1700HF“ nenaudai.

2.5. Masyvų generuojamos galios priklausomybė nuo apšvietos

Kalbant apie saulės baterijas, svarbus parametras yra generuojamos galios priklausomybė nuo apšvietos. Turint šiuos duomenis, galime įvertinti, kaip skirtingi fotovoltiniai moduliai elgiasi esant labai mažai arba didelei apšvietai. Norint gauti kuo tikslesnes priklausomybes nuo apšvietos, buvo panaudoti 3 dienų duomenys t.y. 2013 m. vasario mėn. 25 d, 26 d ir 27 d. duomenys.



2.22 pav. „Sharp NA-F128(GK)“ baterijų masyvo, srovės priklausomybė nuo apšvietos, kai posvyrio kampas 35°



2.23 pav. Generuojamos galios priklausomybė nuo apšvietos

2.22 pav. pateikta „Sharp NA–F128(GK)“ masyvo srovės priklausomybė nuo apšvietos. Gautų duomenų išsibarstymas yra mažas ir tiesiškai proporcingas apšvietai. Duomenų taškai surinkti naudojantis 3d. gautais duomenimis. Reiktų atkreipti dėmesį į tai, kad šiam duomenų išsibarstymui įtaką gali turėti kintanti modulio temperatūra 3 dienų bėgyje. Srovės priklausomybė neleidžia palyginti skirtingų galių modulių masyvus. Todėl naudinga sudaryti grafiką, kuriame yra pateikta santykinės galios priklausomybė nuo apšvietos.

2.23 pav. pavaizduoti 4 skirtingų gamintojų saulės baterijų charakteristikos. „Schuco“ masyvo duomenys yra paimti esant 10° posvyrio kampui. Kitų 3 masyvų duomenys gauti iš 35° įrengtų sistemų. Dėl mažo posvyrio kampo žiemos metu, „Schuco“ masyvo santykinės galios parametrai yra prasčiausi. Taip yra dėl mažos apšvietos ir didelio duomenų taškų išsisklaidymo. Esant mažai apšvietai, geriausiai dirba „Avancis“ saulės baterijos. Šiomis sąlygomis šios baterijos demonstruoja didelį duomenų taškų išsibarstymą (dėl skirtingų modulių temperatūrų), ir šis išsibarstymas sumažėja prie didelės apšvietos. „Sharp“ baterijos demonstruoja prastesnius parametrus prie mažos ir didelės apšvietos. Bet baterijos turi mažą taškų išsisklaidymą, taip yra dėl mažo jautrumo kintančiai modulio temperatūrai.

„SolarTechnics“ baterijos rodo prastus parametrus ir didelį taškų išsimėtymą esant didelei apšvietai. Tai patvirtina ir kituose skyriuose gauti šių baterijų prasti energetiniai rodikliai.

IŠVADOS

1. Rytų Lietuvos sąlygomis tikslingiausia saulės baterijas žiemos metu įrengti 35° , o vasarą 20° kampu.
2. Orientuotos į šiaurę ir esant 10° posvyrio kampui, saulės baterijos generuoja 22 proc. mažiau energijos lyginant su 0° kampu.
3. 90 procentų metinės energijos pagaminama kovo – spalio mėnesiais.
4. „Sharp NA–F128(GK)“ baterijos esant 35° posvyrio kampui, gegužės, birželio, liepos mėnesiais generuoja 6 proc. daugiau energijos už kitų gamintojų modulius.
5. Įvairių saulės baterijų efektyvumo nuo apšvietos palyginimas parodė, kad „Avancis PowerMax Smart 120“ turi pranašumą prieš kitas darbe tiriamas baterijas esant didelei apšvietai.

LITERATŪRA

1. Alchemie. 2013. *Cadmium Telluride - The Good and Bad* [žiūrėta: 2013 03 29]. Prieiga per internetą: <<http://www.solar-facts-and-advice.com/cadmium-telluride.html>>.
2. Alchemie. 2013. *Good Reasons Why Monocrystalline Solar Panels are the Industry Standard* [žiūrėta: 2013 03 21]. Prieiga per internetą: <<http://www.solar-facts-and-advice.com/monocrystalline.html>>.
3. Aldous, S., Yewdall, Z., Ley, S. (2012). *A Peek Inside a PV Cell* [žiūrėta: 2013 03 15]. Prieiga per internetą: <<http://www.homepower.com/articles/peek-inside-pv-cell>>.
4. AUOptronics. 2011. *CIGS Thin Film Solar Module* [žiūrėta: 2013 04 01]. Prieiga per internetą: <<http://www.auo.com/?sn=192&lang=en-US>>.
5. AVANCIS. 2011. *PowerMax smart* [žiūrėta: 201 04 04]. Prieiga per internetą: <www.avancis.de>.
6. Brooks, W. P., Dunlop, J. P. 2012. *Photovoltaic (PV) Installer Resource Guide* [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <<http://www.nabcep.org>>.
7. Brown, T. J., Bide, T., Walters, A. S. 2011. *World Mineral Production 2005-2009*. Nottingham: British Geological Survey, 118 p.
8. DGS. 2008. *Planing and installing photovoltaic systems, "A guide for installers, architects and engineers"*. Berlin: LV BRB, 402 p.
9. EPIA. 2011. *Solar Photovoltaic Electricity Empowering the World* [žiūrėta: 2013 03 22]. Prieiga per internetą: <www.epia.org>.
10. Gerngrob, M. D., Revere, J. CIS/CIGS Based Thin-Film Solar Cells. University of Kiel, Germany, 2011 – 5 p.
11. Goetzberger, A., Hoffmann, V. U. 2005. *Photovoltaic Solar Energy Generation*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 100 p.
12. Honsberg, C., Bowden, S. 2012. *Solar Radiation on a Tilted Surface* [žiūrėta 2013 03 12]. Prieiga per internetą: <<http://pveducation.org/>>.
13. Kapur, V. 2008. Manufacturing of ink based CIGS solar cells/modules, in *Photovoltaic Specialists Conference*, San Diego, USA, 1–5.
14. Kolodziej, A. 2004. Staebler – Wronski effect in amorphous silicon and its alloys, in *Opto-Electronics Review* 12(1), Warsaw, Poland, 21–32.
15. Krotkus, A. *Puslaidininkų optoelektronikos sistemos ir prietaisai*. Vilnius: „Protegas“, 2008. – 192 p.
16. Lo, E. 2008. *PV Cell – Working Principle and Applications* [žiūrėta: 2013 03 25]. Prieiga per internetą: <cd1.edb.hkedcity.net/cd/science/physics/NSS/Energy01_Dec08/PhotoVoltaicsCells.pdf>.

17. Luque, A., Hegedus, S. S. (2003). Status, Trends, Challenges and the Bright Future of Solar Electricity from Photovoltaics. Chichester: John Wiley and Sons Ltd, 1138 p.
18. Meyers, Peter V. 2006. Polycrystalline CdTe Thin Film PV in Photovoltaic Energy Conversion, in *IEEE 4th World Conference. Waikoloa, HI*, 2006. 2024–2027.
19. Nelson, J. 2007. *The Physics of Solar Cells*. UK: Imperial College Press.
20. NREL. 2013. *National Center for Photovoltaics* [žiūrėta: 2013 03 21]. Prieiga per internetą: <<http://www.nrel.gov/ncpv/>>.
21. Oregon University. 2008. *Polar sun path chart program* [žiūrėta: 2013 04 08]. Prieiga per internetą: <<http://solardat.uoregon.edu/PolarSunChartProgram.html>>.
22. Schuco. 2010. *Schuco MPE modules in the AL01 series* [žiūrėta: 2013 01 06]. Prieiga per internetą: <www.schueco.de>.
23. Schwabe, U., Jansson, P. M. 2009. Performance Measurement of Amorphous and Monocrystalline Silicon PV Modules in Eastern U.S, in *Instrumentation and Measurement Technology Conference I2MTC '09. Singapore, 2009*. 1636 –1641.
24. Sharp. 2011. *Sharp NA series* [žiūrėta: 2013 04 04]. Prieiga per internetą: <www.sharp.fr/splar>.
25. SMA. 2010. *Performance ratio, Quality factor for the PV plant* [žiūrėta: 2013 04 25]. Prieiga per internetą: <files.sma.de/dl/7680/Perfratio-UEN100810.pdf>.
26. SMA. 2010. *System Monitoring SUNNY SENSORBOX Installation Guide* [žiūrėta: 2013 04 20]. Prieiga per internetą: <<http://files.sma.de/dl/4148/Sensorbox-IEN100914.pdf>>.
27. SMA. 2011. *Measurement accuracy Energy values and efficiency for PV inverter Sunny Boy and Sunny Mini Central* [žiūrėta: 2013 02 21]. Prieiga per internetą: <<http://files.sma.de/dl/7418/Messgenau-UEN092520.pdf>>.
28. SMA. 2013. *Monitoring Systems for PV plant* [žiūrėta: 2013 04 04]. Prieiga per internetą: <<http://www.sma.de/en/products/monitoring-systems/sunny-webbox.html>>.
29. SMA. 2013. *Solar inverters with transformer* [žiūrėta: 2013 03 16]. Prieiga per internetą: <<http://www.sma.de/en/products/solar-inverters-with-transformer/>>.
30. Solartechnics. 2010. *Solartechnics SN series modules*. [žiūrėta: 2013 02 15]. Prieiga per internetą: <www.solartechnics.de>
31. Solmetric. 2011. *Guide To Interpreting I-V Curve Measurements of PV Array* [žiūrėta: 2013 03 15]. Prieiga per internetą: <<http://www.solmetric.com>>.
32. Stonecypher, L. 2011. *How Thin Film Cells are Manufactured* [žiūrėta: 2013 03 23]. Prieiga per internetą: <www.brighthub.com>.
33. Uni-Solar. 2007. *Uni-Solar triple junction technology* [žiūrėta: 2013 03 27]. Prieiga per internetą: <http://www.uni-solar.com/wp-content/uploads/pdf/Energy_Production.pdf>.

34. Woodbank. 2006. *Solar Power (Technology and Economics)* [žiūrēta: 2013 03 14]. Prieiga per internetą: < http://www.mpoweruk.com/solar_power.htm>.
35. Wronski, C., Pearce, M., Ferlauto, A. 2002. Progress in Amorphous Silicon Based Solar Cell Technology, in *World Climate and Energy Event*. Rio, 2006. 67–72.