



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

# **Stacionarios saulės elektrinės inverterių ir fotovoltinių modulių tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Arnas Stapulionis**

Projekto autorius

**Doc. Tomas Deveikis**

Vadovas

---

**Kaunas, 2021**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

# **Stacionarios saulės elektrinės inverterių ir fotovoltinių modulių tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

---

**Arnas Stapulionis**

Projekto autorius

**Doc. Tomas Deveikis**

Vadovas

**Doc. Gytis Svinkūnas**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2021**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

Arnas Stapulionis

## **Stacionarios saulės elektrinės inverterių ir fotovoltinių modulių tyrimas**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Arnas Stapulionis

*Patvirtinta elektroniniu būdu*

Stapulionis, Arnas. Stacionarios saulės elektrinės inverterių ir fotovoltinių modulių tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. Tomas Deveikis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis – elektros inžinerija, studijų krypties grupė – inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: Saulės elektrinės, inverteriai, fotovoltiniai moduliai.

Kaunas, 2021, 43p.

### **Santrauka**

Saulės elektrinės inverteriai bei fotomoduliai, kaip ir visi įrenginiai, yra testuojami gamintojų tam tikroje aplinkoje veikiant tam tikriems aplinkos veiksniams. Gavę sertifikatą, šie įrenginiai yra leidžiami eksploatuoti galutiniam vartotojui. Tačiau, realybėje tiek inverteriai, tiek saulės fotomoduliai dirba prie visai kitų aplinkos sąlygų nei yra sukurti, tad jų eksploataciniai parametrai gali skirtis nuo gamyklinių. Fotomoduliai yra bene geriausi pavyzdžiai, kadangi standartinėse testavimo sąlygose jų temperatūra neviršija  $25^{\circ}\text{C}$ , o realybėje gali siekti 35 laipsnius ir netgi daugiau, o tai reiškia mažesnę galią. Taip pat, kadangi fotomoduliai stovi lauke, juos veikia ne tik saulės spinduliai, tačiau ir vėjas, kuris aušina fotomodulius ir padeda saulės elektrinei išlaikyti galią, artimesnę nominaliai, vėjuotą dieną. Inverteriai, skirti keisti nuolatinę saulės elektrinės generuojamą srovę į kintamą, taip pat turi savo technines charakteristikas, iš kurių bene svarbiausia yra jo efektyvumas. Tipinėse gamintojų pateikiamose charakteristikose inverteris turi nežymų efektyvumo skirtumą tarp darbo mažos ir darbo didelės galios sąlygose, tačiau dėl kintančių temperatūros, vėjo bei kitų veiksnių jų efektyvumas yra mažesnis. Ištyrus šių veiksnių poveikį saulės elektrinės fotomoduliams bei inverteriams galima tiksliau įvertinti jos atsipirkimą, montavimo vietą bei kitus svarbius techninius sprendimus, lemiančius projekto sėkmę.

Stapulionis, Arnas. Research on a Fixed Position Solar Power Plant's Inverters and Photovoltaic Modules. Master's Final Degree project / supervisor Assoc. Prof. Dr. Tomas Deveikis; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area : electrical engineering, engineering science.

Keywords: Solar power plants, inverters, photovoltaic modules.

Kaunas, 2021, 43p

### **Summary**

The inverters and photovoltaic modules of a solar power plant, like all appliances, are tested by the manufacturers themselves in a controlled environment with specified environmental conditions. If the appliances pass the test, they are allowed to be used by the customer. That being said, both the inverters and the photovoltaic modules are used in conditions very different than they are made to be used in. As such, their performance can differ than stated by the manufacturer. Photovoltaic modules are the best example of this, as they are tested in such an environment, that their temperature does not exceed 25 °C , while in reality it can exceed 35 degrees and more and result in lower power output. Also, due to the fact that photovoltaic modules are installed outdoors, they are subject to not only solar irradiation but wind as well, which helps cool down the modules and keep the power output closer to the one specified by the manufacturer. Inverters, which are designed to transform direct current into alternating current also have their own specific technical parameters, of which efficiency is by far the most important. Typically, manufacturers state that inverters have only a slight efficiency drop comparing performance in low power and high power scenarios, but, due to changes in temperature, windspeed and other environmental factors, the resulting efficiency is lower than stated. By exploring the effect of these environmental factors on the photovoltaic modules and inverters, it is possible to better calculate the return of investment period of the solar power plant, find a more suitable site for the powerplant and other important technical challenges that decide the success of the project.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas</b> .....	<b>7</b>
<b>Paveikslų sąrašas</b> .....	<b>8</b>
<b>Įvadas</b> .....	<b>10</b>
<b>1. Apžvalginė dalis</b> .....	<b>12</b>
1.1. Literatūros apžvalga .....	12
1.2. Objekto apžvalga .....	19
<b>2. Metodinė dalis</b> .....	<b>20</b>
2.1. Saulės elektrinė.....	20
2.1.1. Fotomoduliai.....	20
2.2. Keitikliai .....	21
2.2.1. “SMA” keitiklis Sunny Tripower 6000TL-20.....	21
2.2.2. “Ginlong” keitiklis GCI-5K-H .....	22
2.3. Matavimo įranga.....	23
2.3.1. “Metrel” MI2892 tinklo analizatorius .....	23
2.3.2. “Chauvin Arnoux” C.A 8335 matavimo įranga .....	24
2.3.3. “Schneider” EcoStruxure programinė-sisteminimo įranga .....	25
2.3.4. “SMA” hidrometeorologinė stotelė Weatherstation.....	26
2.4. Modeliavimo dalis .....	27
2.4.1. Saulės elektrinės modelio “Matlab” programoje aprašymas.....	27
<b>3. Tyrimo rezultatų dalis</b> .....	<b>29</b>
3.1.1. Tyrimo etapai.....	29
3.2. Pirmasis bei antrasis tyrimo etapas(“SMA” Tripower 6000TL-20 prijungtas prie 6 kW saulės elektrinės ir, po to, prie 3 kW saulės elektrinės.....	30
3.2.1. “SMA” inverterio Sunny Tripower 6000TL-20 efektyvumo kreivė.....	30
3.2.2. “SMA” inverterio Sunny Tripower 6000TL-20 efektyvumo priklausomybė nuo saulės elektrinės generuojamos galios.....	31
3.2.3. “SMA” inverterio Sunny Tripower 6000TL-20 efektyvumo priklausomybė nuo apšvietos bei modulių temperatūros .....	31
3.2.4. Vėjo įtaka efektyvumui, modulių temperatūrai bei ryšys su apšvieta.....	32
3.3. Trečiasis tyrimo etapas(“Ginlong“ įmonės inverteris GCI-5K-H prijungtas prie 3 kW pasukamos saulės elektrinė) .....	34
3.3.1. “Ginlong” įmonės inverterio GCI-5K-H efektyvumo kreivė.....	34
3.3.2. Efektyvumo priklausomybė nuo saulės elektrinės generuojamos galios .....	35
3.3.3. Efektyvumo priklausomybė nuo apšvietos bei modulių temperatūros.....	37
3.3.4. Vėjo įtaka efektyvumui .....	38
3.4. Ketvirtasis tyrimo etapas(tiriami “Solitek” įmonės G/G 240-250 moduliai).....	38
3.4.1. Temperatūros ir vėjo greičio įtaka saulės modulių generuojamai galiai .....	38
3.5. Saulės elektrinės simuliacinio modelio “Matlab” programoje rezultatai .....	39
3.6. Rekomendacijos dėl tyrimo pagerinimo.....	40
<b>Išvados</b> .....	<b>41</b>
<b>Literatūros sąrašas</b> .....	<b>42</b>

## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> 1,9 kWp saulės elektrinės pagamintos elektros energijos rezultatų palyginimas neįvertinant bei įvertinant vėjo įtaką [ 22].....	16
<b>2 lentelė.</b> Saulės elektrinės fotomodulių techninės charakteristikos[29] .....	20
<b>3 lentelė.</b> Keitiklio „SMA” Sunny Tripower 6000TL-20 techninės charakteristikos[ 30] .....	22
<b>4 lentelė.</b> Keitiklio „Ginlong” GCI-5K-H techninės charakteristikos[ 31].....	22
<b>5 lentelė.</b> Matavimo įrangos “Metrel” MI2892 techninės charakteristikos .....	23
<b>6 lentelė.</b> Matavimo įrangos “Chauvin Arnoux C.A8335” techninės charakteristikos[34].....	25

## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b> 1,2 bei 3 kartos inverterių palyginimas įvertinant jų galią, įtampos lygio keitimo būdą bei galios ir svorio santykį.[10] .....	12
<b>2 pav.</b> Tipinio komercinio inverterio efektyvumo priklausomybė nuo jo galios[11] .....	13
<b>3 pav.</b> „Canadian Solar“ saulės modulio „CS3K-320MS“ I-V charakteristika, parodanti sroves bei įtampas prie tam tikrų apšvietų(kairėje) bei esant 1000 W/m <sup>2</sup> apšvietai prie tam tikrų temperatūrų(dešinėje) [13] .....	14
<b>4 pav.</b> Vėjo tekmė saulės elektrinėje pagal [19] šaltinį. Matome, jog tarp modulių eilių susidaro sūkurinės srovės bei sumažėja esamo vėjo greitis .....	17
<b>5 pav.</b> KTU laboratorijos, esančios Studentų g. 48A, stogas su 3 kW pasukama ir 3 kW stacionaria saulės elektrine, sudaryta iš 24 vnt. Solitek” įmonės G/G 240-250 modelio modulių bei Sunny Tripower 6000TL-20 ir GCI-5K-H inverterių[ 28] .....	19
<b>6 pav.</b> „G/G 240-250“ voltamperinė charakteristika prie skirtingų apšvietų[29] .....	20
<b>7 pav.</b> „G/G 240-250“ galios-įtampos charakteristika prie skirtingų apšvietų[29].....	21
<b>8 pav.</b> „G/G 240-250“ voltamperinė charakteristika prie skirtingų temperatūrų[29] .....	21
<b>9 pav.</b> Keitiklio „SMA“ Sunny Tripower 6000TL-20 gamintojo techninės charakteristikos[30]....	22
<b>10 pav.</b> „Metrel“ MI2892 tinklo analizatorius, dirbantis prie saulės elektrinės tinklo[28].....	24
<b>11 pav.</b> „Chauvin Arnoux“ C.A 8335 tinklo analizatorius, dirbantis prie saulės elektrinės tinklo ..	25
<b>12 pav.</b> „Schneider“ EcoStruxure programinė sisteminimo įranga, naudojama gauti duomenis iš įvairių jutiklių bei prietaisų viename internetiniame puslapyje.....	26
<b>13 pav.</b> „SMA“ įmonės hidrometeorologinė stotelė bei jos sudedamosios dalys[36] .....	26
<b>14 pav.</b> Pilna saulės elektrinės su vienfaziu inverteriu modelio schema „Matlab“ programoje .....	27
<b>15 pav.</b> Saulės elektrinės maksimalaus galios taško sekiklio dalies simuliacinė dalis „Matlab“ programoje.....	27
<b>16 pav.</b> Tipinė maksimalaus galios taško sekimo loginė schema[37] .....	28
<b>17 pav.</b> Dalis maksimalaus galios taško nustatymo programinio kodo „Matlab“ programoje[38] ..	28
<b>18 pav.</b> Eksperimento metu gauta „SMA“ Sunny Tripower 6000TL-20 efektyvumo kreivė, kai $U_{pv} = 380$ V. ....	30
<b>19 pav.</b> „SMA“ keitiklio Sunny Tripower 6000TL-20 efektyvumo priklausomybė nuo saulės elektrinės generuojamos galios.....	31
<b>20 pav.</b> Eksperimento metu gauta „SMA“ inverterio Sunny Tripower 6000TL-20 efektyvumo priklausomybė nuo apšvietos.....	32
<b>21 pav.</b> Eksperimento metu gauta „SMA“ inverterio Sunny Tripower 6000TL-20 efektyvumo priklausomybė nuo modulių temperatūros. ....	32
<b>22 pav.</b> Saulės elektrinės inverterio efektyvumo priklausomybė nuo vėjo greičio.....	33
<b>23 pav.</b> Eksperimento metu gauta saulės modulių temperatūros priklausomybė nuo vėjo greičio ..	33
<b>24 pav.</b> Eksperimento metu gauta apšvietos priklausomybė nuo vėjo greičio priklausomybė.....	34
<b>25 pav.</b> Eksperimento metu gauta „Ginlong“ GCI-5K-H efektyvumo kreivė, kai $U_{pv} = 380$ V .....	35
<b>26 pav.</b> Panašių parametrų vienfazio inverterio „Sunny Boy 5.0“ efektyvumo kreivė[39].....	35
<b>27 pav.</b> „Ginlong“ inverterio GCI-5K-H efektyvumo priklausomybė nuo saulės elektrinės generuojamos galios .....	36
<b>28 pav.</b> Eksperimento metu gauta efektyvumo priklausomybė nuo apšvietos .....	37
<b>29 pav.</b> Eksperimento metu gauta efektyvumo priklausomybė nuo modulių temperatūros, rodanti teigiamą priklausomybę.....	37



<b>30 pav.</b> “Ginlong” inverterio GCI-5K-H efektyvumo priklausomybė nuo vėjo greičio, gauta tyrimo metu .....	38
<b>31 pav.</b> Ištirtų saulės modulių generuojamos galios priklausomybė nuo jų temperatūros.....	39
<b>32 pav.</b> Ištirtų saulės modulių generuojamos galios priklausomybė nuo vėjo greičio.....	39
<b>33 pav.</b> Saulės elektrinės modeliavimo rezultatai “Matlab” programoje. Viršuje kairėje – apšvieta, viršuje dešinėje – elektrinės srovė, apačioje kairėje – jos įtampa, apačioje dešinėje – elektrinės galia .....	40

## Įvadas

2019 metais žmonijos elektros energijos poreikiai perkopė 23 000 TWh ribą, tuo tarpu išmetamų CO<sub>2</sub> dujų kiekis jau 2017 metais viršijo 32 Mt ir vis didėja [ 1]. Atsinaujinantys energijos šaltiniai, tokie kaip vėjo, biokuro, geoterminiai ir ypač saulės tampa itin populiarūs dėl poreikio pakeisti taršius elektros energijos generavimo šaltinius tokiais, kurie į aplinką neišmestų kenksmingų dujų bei patenkintų vis didėjančią poreikį elektros energijai [ 2]. Be to, elektros energiją gaminančios iš atsinaujinančių išteklių elektrinės taip pat prisideda prie šalies ekonomikos augimo kadangi finansiniai ištekliai naudojami šalies viduje(neiškeliauja į užsienį) taip sukurdami darbo vietas, o teikiama parama instaliuotojams didžiąja dalimi grįžta į valstybės biudžetą mokesčių pavidalu[ 3]. Fotomoduliai, keičiantys tiesioginę bei sklaidžiąją saulės energiją į elektros energiją, yra puslaidininkiniai energijos generavimo įrenginiai, neturintys judančių dalių ir naudojantys fotoelektrinį efektą [ 4]. Šiam efektui būdingas elektronų bei jų vietoje atsirandančių „skylių“ judėjimas, kuris ir sukuria įtampos atsiradimą bei srovės tekėjimą.[ 5] Fotoelektrinio efekto(ir, kartu, saulės modulių) efektyvumą nustato medžiagos, kurioje vyksta fotoefektas, draudžiamoji juosta, kuri parodo, koks energijos pokytis reikalingas norint perkelti elektroną į laidumo juostą. Kaip žinoma, saulės spinduliuotę sudaro įvairūs bangų ilgiai, tad galima teigti, jog, kuo didesnė ši draudžiamoji juosta, tuo didesnė tikimybė, kad atkeliaujantis fotonas neturės turimos energijos perkelti elektroną į laidumo juostą, elektros energija nebus gaminama, o pats modulis tik įšils [4]. Teoriškai nustatyta, jog vienos p-n sandūros, turinčios 1,34 eV draudžiamosios juostos dydį, maksimalus efektyvumas yra 33,7 % [ 6]. Didžiąją dalį komercinių saulės jėgainių sudaro vieno p-n sandūros sluoksnio moduliai, sukurti silicio pagrindu, kadangi jo kiekis žemėje beveik neribotas ir išgaunamas perdirbant smėlį [4]. Be to, monokristalinio silicio pagrindu sukurtų fotomodulių draudžiamoji juosta yra apie 1,35 eV , tad jie yra efektyvesni už amorfinį silicį bei daugelį kitų puslaidininkinių [ 7]. Kadangi saulės moduliai statomi lauke, juos veikia įvairūs aplinkos veiksniai(temperatūra, vėjo kryptis bei greitis, apšviestumas ir kt.), kurie vienaip ar kitaip paveikia modulių efektyvumą. Šiame darbe bus tiriama dviejų saulės elektrinių inverterių efektyvumas bei aplinkos(lauko temperatūros, vėjo greičio, apšvietos bei kitų parametrų) įtaka fotovoltiniams moduliams ir jų efektyvumui.

### **Darbo tikslas:**

Ištirti saulės elektrinės inverterių efektyvumą realiomis veikimo sąlygomis, nustatyti priklausomybę tarp jo efektyvumo bei fotomodulių generuojamos galios, taip pat fotovoltinių modulių efektyvumo priklausomybę nuo aplinkos, modulio temperatūros ir vėjo greičio siekiant pagerinti elektros energijos gamybą iš atsinaujinančių saulės energijos šaltinių.

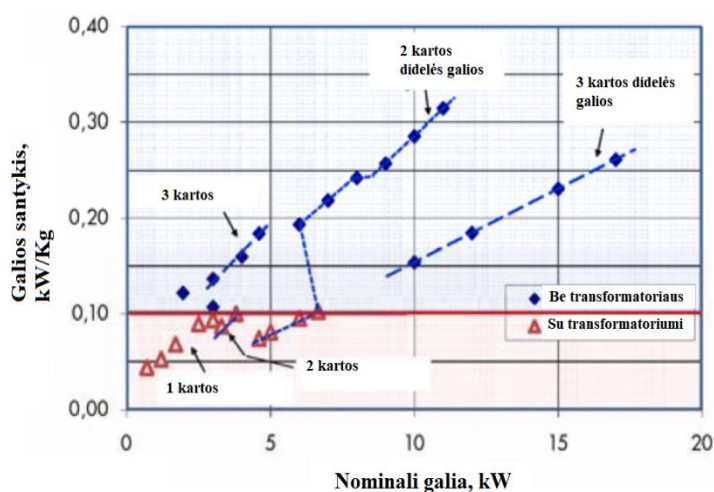
## **Uždaviniai:**

1. Ištirti saulės modulio galios priklausomybes nuo jo vidinės temperatūros matavimo laikotarpiu, nubrėžti grafikus, iš kurių bus nustatytos priklausomybės, bei ištirti, kokį poveikį temperatūra turi saulės modulio generuojamai galiai.
2. Ištirti saulės modulio galios priklausomybes nuo vėjo greičio matavimo laikotarpiu, nubrėžti grafikus, iš kurių bus nustatytos priklausomybės, bei ištirti, kaip vėjo sukeltas aušinimas pakeičia saulės elektrinės efektyvumą dviejuose skirtinguose inverteriuose.
3. Išmatuoti realų saulės elektrinės inverterių efektyvumą ir palyginti jį su gamintojo deklaruojamu.
4. Sukurti “Matlab” matematinį saulės elektrinės modelį ir palyginti jo rezultatus su realaus tyrimo rezultatais.

## 1. Apžvalginė dalis

### 1.1. Literatūros apžvalga

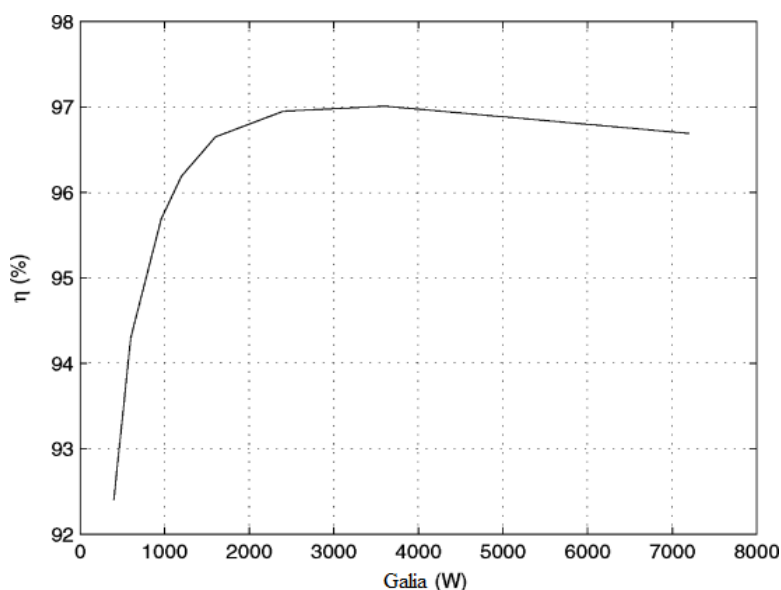
Straipsnyje “Investigation of PV inverter MPPT efficiency test platform” [ 8]teigiama, jog vienas iš pagrindinių kriterijų, apsprendžiančių inverterio efektyvumą, yra jo MPPT<sup>i</sup> taikymo technologija. Pirmos kartos inverteriai(1990-1995) naudodavo primityvią maksimalaus galios taško sekimo technologiją pagal saulės modulių įtampą neįvertindami kitų parametru, tokių kaip apšvieta ir darbinė temperatūra[ 9]. Kadangi pirmos kartos(1995 m. ir vėliau) komerciniai inverteriai naudojo tik pasyvinį aušinimą(radiatorius), jų galia siekė ne daugiau 0,7 kW. Dėl didelės temperatūros inverterio viduje nebuvo galimybės išvystyti didelės galios neperkaitinus sudedamųjų elementų, tad vidutinis tarnavimo laikas tarp gedimų buvo tik 100 000 valandų. Esant staigiems bei dideliems pokyčiams apšvietoje, inverteriai nespėdavo tiksliai sekti maksimalaus galios taško, o tai neleisdavo generuoti maksimalios galios bei elektros energijos, tad jų efektyvumas teoriškai siekė iki 90%. Tobulėjant inverteriams, jų galia 2015 metais pasiekė net 17 kW. “SMA” įmonės inverteriai vidutiniškai per pus sumažindavo nuostolius kas penkis metus. Sumažėję šiluminiai nuostoliai reiškė mažesnę poreikį aušinimui, todėl vidutinis tarnavimo laikas tarp gedimų pailgėjo net iki 1 mln. valandų, o efektyvumas – 99%., lyginant su pirmos kartos inverteriais[ 10].



**1 pav.** 1,2 bei 3 kartos inverterių palyginimas įvertinant jų galią, įtampos lygio keitimo būdą bei galios ir svorio santykį.[10]

Šiuolaikiniai inverteriai pritaiko ir tokius metodus kaip miglotąją logiją(fuzzy logic), dirbtinį intelektą, dirbtinius neuroninius tinklus, genetinį algoritimą bei kitus[ 9]. Straipsniuose “A Systems Approach for a Stand-Alone Residential Fuel Cell Power Inverter Design”[ 11] ir “The effect of inverter efficiency on stand-alone residential PV system sizing” [ 12] taip pat minima, kad saulės elektrinės inverterio efektyvumas gali būti kintantis ir priklauso nuo jo apkrovos, tai yra, didesnis

efektyvumas išgaunamas labiau apkrovus inverterį. Be to, straipsnis nurodo, jog inverteriai didžiausią efektyvumą pasiekia prie tam tikros nominalios galios - esant mažai arba ribinei didelei galiai, efektyvumas bus mažesnis dėl netiesinių sudedamųjų elementų inverteryje savybių.

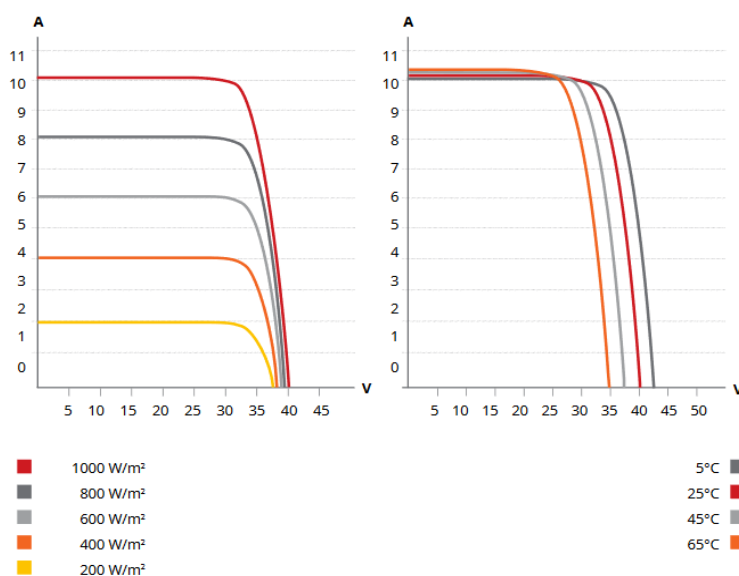


**2 pav.** Tipinio komercinio inverterio efektyvumo priklausomybė nuo jo galios[11]

Straipsnyje „Wind Effect on PV Module Temperature: Analysis of Different Techniques for an Accurate Estimation“ [ 13]teigiama, jog saulės modulių temperatūra yra vienas iš svarbiausių aspektų, kuriuos reikia analizuoti norint nustatyti sistemos efektyvumą. Beveik visi rinkoje paplitę saulės moduliai yra puslaidininkio silicio pagrindu, tad jų efektyvumas labai priklauso nuo temperatūros, o p-v charakteristika parodo, kad įšilusio modulio maksimalus galios taškas yra mažesnis nei vėsesnio modulio. Kadangi saulės modulių efektyvumas matuojamas naudojant standartines bandymo sąlygas, kurios labai retai būna lauko sąlygomis, tikrasis efektyvumas kinta plačiose ribose kaip ir pagamintos elektros energijos kiekis. Tai apsunkina pagamintos elektros energijos prognozavimą bei ekonominius skaičiavimus. Kadangi saulės elektrinės įrengiamos lauke, jas veikia ir vėjas, kuris aušina modulius ir taip sumažina jų temperatūrą. Straipsnyje “Analysis of factors influencing the annual energy production of photovoltaic systems” [ 14] minima, jog pagamintos elektros energijos kiekis krinta nuo 2 iki 10 procentų, esant aukštoms saulės modulių temperatūroms. Taigi, tikslus temperatūros matavimas yra labai svarbus siekiant įvertinti bendrą sistemos efektyvumą. Tačiau, kiekvienos celės temperatūros matavimas yra nepraktiškas ir sudėtingas, tad priimama, kad paties saulės modulio temperatūra yra artima celės, o ją veikia išoriniai aplinkos veiksniai, ypač vėjas, kuris, anot straipsnio “Modeling of the nominal operating cell temperature based on outdoor weathering” [ 15], atvėsina modulį 15-20 °C esant 10 m/s greičiui ir 1000 W/m<sup>2</sup> saulės apšvietai. Straipsnyje “Solar energy under cold climatic conditions: A review” [ 16] analizuojamas saulės modulių darbas esant žemai aplinkos temperatūrai: įšilus moduliu iki 55

0C modulio efektyvumas siekia 10 proc., tačiau, jei modulio vidinė temperatūra nepakyla virš 20 °C, efektyvumas pakyla net iki 16 proc. dienos metu.

Straipsnyje “Determination of PV Generator I-V/P-V Characteristic Curves Using a DC-DC Converter Controlled by a Virtual Instrument” [ 17] aptariama i-v kreivė, kuri nusako saulės modulio maksimalią srovę esant 0 V įtampai bei maksimalią įtampą srovei netekant. Kiekvienam i-v charakteristikos taškui, įtampos bei srovės sandauga reiškia išvystytą galią. Didžiausia galia pasiekama taške ten, kur srovės bei įtampos sandauga yra didžiausia. Tačiau, dėl kylančios saulės modulio temperatūros jo darbo metu, įtampa pradeda kristi, o srovė tik nežymiai padidėja, tad maksimalus modulio galios taškas mažėja kylant temperatūrai kaip pateikiama 3 paveikslėlyje:



**3 pav.** “Canadian Solar” saulės modulio “CS3K-320MS” I-V charakteristika, parodanti sroves bei įtampas prie tam tikrų apšvietų(kairėje) bei esant 1000 W/m<sup>2</sup> apšvietai prie tam tikrų temperatūrų(dešinėje) [13]

Tęsiant, straipsnyje “A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions” [ 18] minima, jog saulės modulio darbinę temperatūrą nulemia tiek vidiniai energijos konversijos procesai, tiek išoriniai: apšvieta, oro temperatūra, modulio tvirtinimas bei jo sandara ir, galiausiai, vėjo greitis bei kryptis. Straipsnyje taip pat nurodoma, kad temperatūriniai pokyčiai modulyje įvyksta ne akimirksniu, o palaipsniui: keičiantis saulės padėčiai danguje, vyraujančiam vėjo greičiui bei kryptiai ir oro temperatūrai. Anot straipsnio, kaip ir visi fizikiniai kūnai, išilgę moduliai perteikia energiją aplinkai konvekciniu būdu, kuris išskiriamas į dvi dalis: pasyvi konvekcija bei priverstinė. Pirmoji apibrėžiama kaip modulio gebėjimas iš abiejų pusių išspinduliuoti šiluminę energiją aplinkai. Laisvoji konvekcija sudaro didžiąją dalį išspinduliuotos šiluminės energijos aplinkai, kai saulės moduliai įrengti šaltuose klimatuose, kuriuose aplinkos temperatūra, lyginant su modulio, būna žemesnė. Siekiant įvertinti bendrą laisvąją modulio konvekciją, nurodoma nugarinės dalies konvekcijos formulė [ 19]:

$$h_{laisvojing} = Nu = \left(0,825 + \frac{0,387Ra^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0,49276}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right)}\right)^2; \quad (1)$$

Čia:  $Ra$  – Reilėjaus koeficientas ;  $Pr$  – Prandtlio koeficientas.

Bei priekinės dalies formulė [ 20]:

$$h_{laisvojpr} = Nu = 0,14((GrPr)^{\frac{1}{3}} - (Gr_{cr}Pr)^{\frac{1}{3}}) + 0,56(Gr_{cr}Pr \cos(\theta))^{\frac{1}{4}}; \quad (2)$$

Čia:  $Gr$  – Grashofo koeficientas ;  $Gr_{cr}$  – kritinis Grashofo koeficientas, kai  $Nu$  reikšmė pradeda viršyti laminarinio judėjimo reikšmę ( $\theta$  reikšmėms esant  $15^0, 30^0, 60^0, 70^0$ ,  $Gr_{cr}$  reikšmės yra  $5 * 10^9$ ,  $2 * 10^9$ ,  $10^8$  bei  $10^6$ , atitinkamai);  $\theta$  – modulio pasvirimo kampas horizontalioje ašyje.

Priverstinė konvekcija pasireiškia atsiradus vėjui, kuris aušina saulės modulį. Kadangi saulės moduliai statomi kampu dėl geresnės elektros energijos generacijos, modulio kraštas tampa vėjui kliūtimi, dėl kurios atsiranda sūkurių ir padidina modulio šilumos perdavimą orui. Straipsnyje nurodoma priverstinės konvekcijos formulė, kai vėjo greitis matuojamas 1 metro aukštyje virš modulio:

$$h_{priverstinė} = 2,56w + 8,55; \quad (3)$$

Čia:  $w$  – vėjo greitis, m/s

Suminė konvekcija apskaičiuojama iš formulės:

$$h_{suminė} = \sqrt[3]{h_{priverstinė}^3 + h_{laisvoji}^3} \quad (4)$$

Straipsnyje “Investigation of wind speed cooling effect on PV panels in windy locations” [ 21] analizuojamas vėjo poveikis saulės elektrinės generacijai. Moksliniame darbe aptariamas eksperimentas be vėjo įtakos ir su vėjo daroma įtaka saulės moduliams. Nustatyta, jog tiriamajame darbe, kuriame vėjo įtaka nepaisyta, vidutinė saulės modulių temperatūra buvo  $11^{\circ}C$  aukštesnė, o per dieną pagamintas elektros energijos kiekis 4,5 proc. mažesnis nei eksperimente, kuriame įvertinta vėjo įtaka. Taip pat, straipsnyje pastebima, kad, įvertinus vėjo įtaką, saulės modulių kampas vertikalioje ašyje turi būti keičiamas labiau nei neįvertinus vėjo įtakos. Daroma išvada, kad, įvertinus vėjo vėsinimo įtaką, projektuotojai gali išvengti papildomų kaštų dėl modulių kiekio bei kitos aparatūros pertekliaus, kadangi neįkaitę moduliai pagamina daugiau elektros energijos. Pagamintos elektros energijos skirtumas pateiktas 1 lentelėje:

**1 lentelė.** 1,9 kWp saulės elektrinės pagamintos elektros energijos rezultatų palyginimas neįvertinant bei įvertinant vėjo įtaką [ 22]

<b>Modulio kampo keitimo intervalas</b>	<b>Pagamintas elektros energijos kiekis, kWh, neįvertinus vėjo</b>	<b>Pagamintas elektros energijos kiekis, kWh, įvertinus vėją</b>	<b>Skirtumas, proc.</b>
15 min.	1056	1093	3,55
30 min.	1055	1092	3,55
1 h.	1053	1091	3,55
1 d.	1033	1069	3,54
1 mėn.	1023	1059	3,53
1 sez.	1013	1049	3,52
1 pusm.	1014	1050	3,53
1 m.	991	1026	3,51

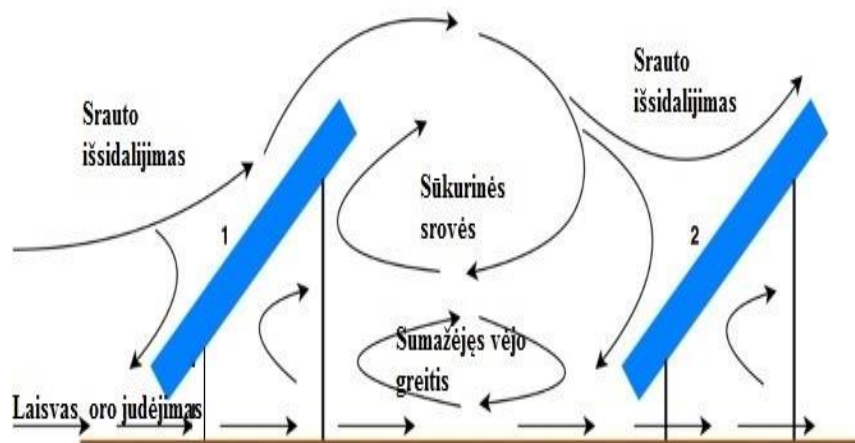
Iš 1 lentelės matome, jog visais atvejais įvertinus vėjo sukeltą aušinimą saulės elektrinė pagamino daugiau elektros energijos. Be to, dažnesnis modulio optimalaus kampo keitimas reiškė daugiau pagamintos elektros energijos lyginant su retesniu kampo keitimu. Tai sutampa su straipsnio pateikta idėja, jog vėjo įtaką būtina įvertinti siekiant parinkti optimalų elektrinės dydį bei prognozuoti jos gamybinius pajėgumus.

Straipsnyje “The effect of wind direction on the performance of solar PV plants” [ 23] teigiama, kad, siekiant sumažinti saulės modulių temperatūrą, yra svarbu pasitelkti vėjo sukeltą aušinimą. Straipsnyje išskiriama, jog fiksuoto kampo saulės elektrinės šiaurės pusrutulyje nukreipiamos į pietus, tad pietinis vėjas turės didžiausią aušinimo efektą. Taip pat, pietų pusrutulyje esančias jėgaines labiausiai aušins šiaurės krypties vėjas. Pabrėžiama, kad didžiausią įtaką vėjas turės tada, kai elektrinės moduliai bus įrengti rytų-vakarų kryptimi. Kaip pavyzdį straipsnyje pateikiama D.Britanijoje esanti 5 MW “Hadley” saulės elektrinė, kurioje buvo pagaminta nuo 10 iki 300 kWh papildomos elektros energijos per pusmetį esant stipriam pietiniam vėjui. Pabrėžiama, jog saulės elektrinės, įrengtos vėjuotose vietovėse ir nukreiptos į pietus atitinkamai generuos daugiau elektros energijos nei tos elektrinės, kurios įrengtos ne pagal šias rekomendacijas esant tokiai pat apšvietai bei aplinkos temperatūrai.

Tačiau, straipsnyje “Southerly winds increase the electricity generated by solar photovoltaic systems” [ 24] teigiama, jog didesnę teigiamą poveikį elektros energijos gamybai daro ne vėjo greitis, o vėjo kryptis, kadangi šilumos perdavimas nuo fotomodulio aplinkai vyksta ir laisvąja konvekcija, kai vėjo nėra arba jo greitis nykstamai mažas. Taip pat, keliaudamas pro modulių eiles vėjo gūsis šiek tiek išyla, tad gale esančios eilės ne taip gerai vėsinamos. Straipsnis analizavo D.Britanijos pietuose esančią “Westmill” saulės jėgainę, kuri pagamino beveik 43 proc.(147,6 kWh)



daugiau elektros energijos tiriamuoju laikotarpiu esant pietiniam vėjui. Mokslinis darbas taip pat nurodo, jog didžiausią aušinimo poveikį patirs tos elektrinės, kurios turi mažiausiai eilių ir kurių eilės atsuktos vėjo priešpriešai, kadangi dėl didesnio eilių kiekio susidaro sūkurinės srovės, kurių greitis yra mažesnis, o temperatūra yra didesnė dėl iššilimo nuo prieš tai aptekėtos modulių eilės.



**4 pav.** Vėjo tekė saulės elektrinėje pagal [19] šaltinį. Matome, jog tarp modulių eilių susidaro sūkurinės srovės bei sumažėja esamo vėjo greitis

Straipsnyje “The wind chill temperature effect on a large-scale PV plant—an exergy approach” [ 25] taip pat palaikoma idėja, jog, įvertinus vėjo vėsinimo įtaką saulės elektrinėms, pastebimas pagamintos elektros energijos padidėjimas(3,2 proc.). Įvertinus vėjo įtaką padėtų projektuotojams geriau prognozuoti pagaminamos elektros energijos kiekį, kadangi dėsningai vėjo greitis šaltuoju metų laiku(nuo lapkričio iki balandžio) būna didesnis, o šiltuoju – mažesnis.

Straipsnyje “Reducing PV module temperature with radiation based PV module incorporating composite phase change material” [ 26], kuriame aptariamas fotomodulių aušinimas, prieinama išvada, jog atvėsintų modulių radiatoriais efektyvumas vidutiniškai padidėjo 0,46 proc., o temperatūra vidutiniškai sumažėjo 6,7 °C. Ši straipsnio išvada sutampa su prieš tai aptartų straipsnių išvadomis dėl padidėjusios elektros energijos generacijos sumažėjus modulio temperatūrai.

Straipsnyje “Enhancing PV modules efficiency and power output using multi-concept cooling technique” [ 27] analizuojami kintamieji, mažinantys saulės modulio efektyvumą. Tęsdamas prieš tai aptartų straipsnių idėją, mokslinis darbas nurodo, kad vienas iš svarbiausių dedamųjų, mažinančių saulės modulio efektyvumą yra jo temperatūra generacijos, ypač pikinės, metu. Straipsnis apibrėžia formulę, nusakančią efektyvumo ir modulio temperatūros priklausomybę, t.y, kokia bus saulės modulio generacija esant tam tikrai aplinkos temperatūrai:

$$P_{pv} = Y_{pv} * f_{pv} * \left( \frac{G_T}{G_{T,STC}} \right) * (1 + \alpha_p * (T_C - T_{C,STC})) \quad (5)$$

Čia:  $Y_{pv}$  – saulės modulio galia, kW;  $f_{pv}$  – modulio saugumo riba, nusakanti, koku pajėgumu procentais modulis turi dirbti norint išvengti jo perkrovos ir ilgesnio tarnavimo laiko, proc.;  $G_T$  – apšvieta esamu laiko momentu, kW/m<sup>2</sup>;  $G_{T,STC}$  – STC sąlygomis esanti apšvieta, kW/m<sup>2</sup>;  $\alpha_p$  – modulio temperatūrinis galios koeficientas, %/°C;  $T_C$  – modulio temperatūra esamu laiko momentu, °C;  $T_{C,STC}$  – modulio temperatūra, kai buvo matuojama STC sąlygomis, °C;

$P_{pv}$  nusako procentalų modulio galios mažėjimą pakilus vienam laipsniui virš STC sąlygų temperatūros (25 °C). Straipsnyje aptarto modulio  $P_{pv}$  koeficientas yra -0,44 %/°C – modulio temperatūrai pakilus virš 25 °C, jo galia pradės mažėti 0,44% kiekvienam laipsniui. Straipsnis pabrėžia, jog modulio perkaitimas taip pat trumpina jo bei aplink esančių laidų ir jungčių gyvavimo laikotarpį dėl stiprių temperatūrinių šuolių moduliui įšilus vidurdienį ir atvėsus naktį.

## 1.2. Objekto apžvalga

Tyrimas yra atliekamas Kauno mieste, Studentų g. 48A, esančioje KTU laboratorijoje kurioje įrengta 3 kW dviejų ašių pasukama saulės elektrinė bei 3 kW stacionari saulės elektrinė. Šias elektrines sudaro 24 vnt. “Solitek” įmonės G/G 240-250 fotomodulių, iš kurių 12 yra sumontuoti ant 25 m<sup>2</sup> ploto “SatControl” stovo. Ant stogo papildomai yra sumontuota “SMA” įmonės lauko temperatūros bei apšvietos jutikliai “SensorBox” ir “SMA Meteo Station 050”, kurie kaupia duomenis internetinėje saugykloje. Laboratorijos nuotrauka pateikiama apačioje, fotomoduliai, inverteriai bei kiti sudedamieji elementai ir jų charakteristikos aptariamos žemesniuose skyriuose, o simuliacinis saulės elektrinis modelis “Matlab” programoje – 2.4 skyriuje. Tyrimui atlikti abi saulės elektrinės bus nustatytos tuo pačiu, nekintančiu, apytiksliai 35<sup>0</sup> kampu į horizontą. Laboratorijoje įrengti du keitikliai: “SMA” įmonės Sunny Tripower 6000TL-20, kuris didžiąją dalį laiko dirba su kintamos padėties saulės elektrine, ir “Ginlong” įmonės hibridinis saulė-vėjas inverteris GCI-5K-H, prijungtas prie ant stogo greta esančių vėjo elektrinių ir stacionarios saulės elektrinės. Siekiant iširti šių keitiklių efektyvumą realiomis sąlygomis, tyrimo pirmo etapo metu abi saulės elektrinės bus sujungtos su “SMA” inverteriu, o antruoju etapu – stacionari bus sujungta su “Ginlong” inverteriu, o pasukama – su “SMA” įmonės inverteriu. Antrojo etapo metu vėjo elektrinės bus sustabdytos ir atjungtos nuo hibridinio “Ginlong” inverterio ir įtakos matavimams neturės.



**5 pav.** KTU laboratorijos, esančios Studentų g. 48A, stogas su 3 kW pasukama ir 3 kW stacionaria saulės elektrine, sudarytą iš 24 vnt. Solitek” įmonės G/G 240-250 modelio modulių bei Sunny Tripower 6000TL-20 ir GCI-5K-H inverterių [ 28]

## 2. Metodinė dalis

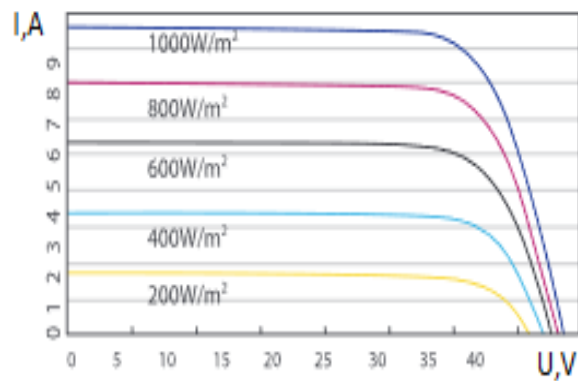
### 2.1. Saulės elektrinė

#### 2.1.1. Fotomoduliai

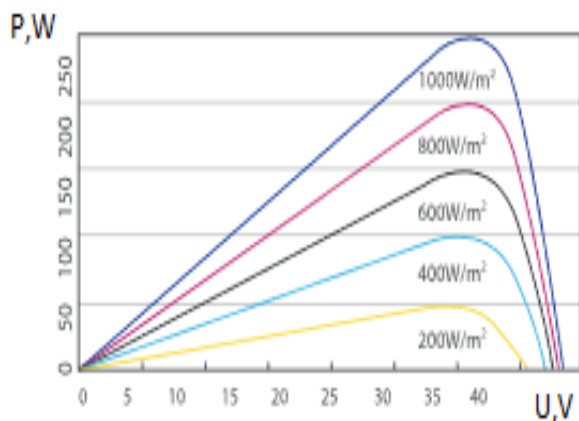
Šio tyrimo metu priimame, kad tiriamą saulės elektrinę iš viso sudaro 24 vnt. “Solitek” įmonės G/G 240-250 modelio modulių. Bendra elektrinės galia – 6 kW. Modulių techninės charakteristikos pateikiamos apačioje.

**2 lentelė.** Saulės elektrinės fotomodulių techninės charakteristikos[29]

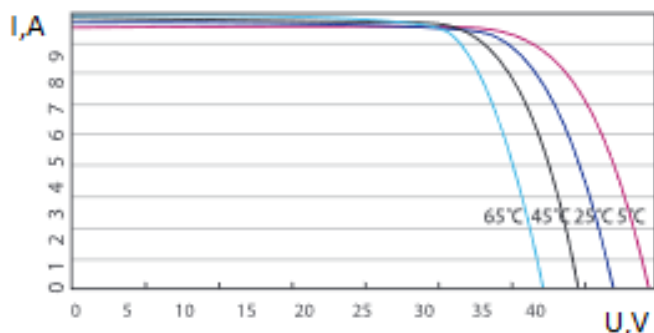
Pavadinimas	Efektyvumas, %	Galia(STC), W	Galia(NMOT), W	Trumpo jungimo srovė, A	Atviros grandinės įtampa, V	Optimali veikimo srovė, A	Optimali veikimo įtampa, V	Maksimali sistemos įtampa, V
G/G 240-250	15,08	250	210	8,60	37,90	8,93	30,70	1000



**6 pav.** „G/G 240-250“ voltamperinė charakteristika prie skirtingų apšvietų[29]



7 pav. „G/G 240-250“ galios-įtampos charakteristika prie skirtingų apšvietų[29]



8 pav. „G/G 240-250“ voltamperinė charakteristika prie skirtingų temperatūrų[29]

Matoma, jog, siekiant pasiekti maksimalią elektros energijos generaciją, inverterio maksimalaus galios taško sekiklis turi suderinti saulės modulių grupės įtampą ir srovę, kad būtų pasiekta didžiausia galia. Dėl savo stiklo-stiklo konstrukcijos, kartu su izoliuojančiomis medžiagomis aplink kraštus, šie moduliai išsklaido šilumą greičiau nei “rėminiai” fotomoduliai, o tai leidžia pasiekti didesnę efektyvumą dėl mažesnio įšilimo bei didesnę atsparumą aplinkos poveikiui.

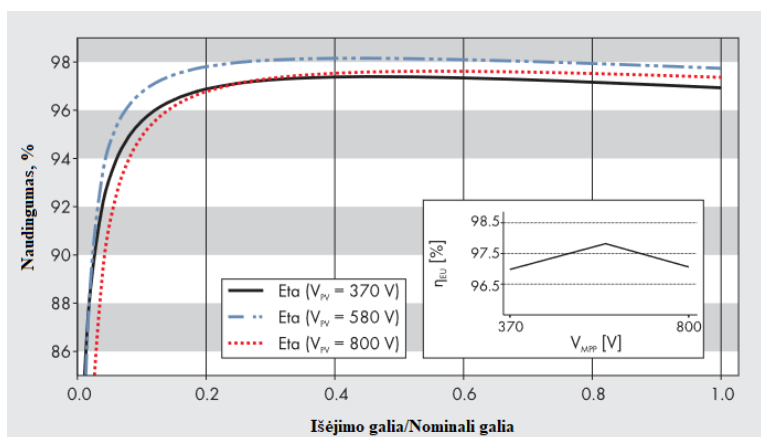
## 2.2. Keitikliai

### 2.2.1. “SMA” keitiklis Sunny Tripower 6000TL-20

Siekiant kuo efektyviau paversti saulės elektrinės energiją į elektros energiją, KTU laboratorijoje įrengtas trifazis SMA įmonės “SMA Sunny Tripower 6000TL-20” modelio betransformatorinis keitiklis su dvejomis maksimalios galios taško sekimo technologijomis. Keitiklio nuotrauka bei techninės charakteristikos pateikiamos apačioje, 3 lentelėje.

**3 lentelė.** Keitiklio „SMA” Sunny Tripower 6000TL-20 techninės charakteristikos[ 30]

Modelis	Maksimali įėjimo galia, W	Maksimali įėjimo įtampa, V	Maksimali įėjimo srovė, A	Maksimali išėjimo galia VA	Nominali išėjimo srovė, A	Efektyvumas, %	Maksimalaus galios taško sekiklių kiekis	Nominali veikimo įtampa, V
Sunny Tripower 6000TL-20	6125	1000	11	6000	8,7	98	2	580



**9 pav.** Keitiklio „SMA” Sunny Tripower 6000TL-20 gamintojo techninės charakteristikos[30]

### 2.2.2. “Ginlong” keitiklis GCI-5K-H

Antrasis inverteris laboratorijoje yra kinų įmonės „Ginlong“ GCI-5K-H modelis, kuris geba keisti tiek vėjo, tiek saulės energiją į elektros energiją bei tiekti ją į tinklą. Šio darbo atveju bus tiriama tik saulės energijos konvertavimo efektyvumas. Keitiklio išvaizda bei techninės charakteristikos pateikiamos apačioje, 4 lentelėje.

**4 lentelė.** Keitiklio „Ginlong” GCI-5K-H techninės charakteristikos[ 31]

Modelis	Maksimali įėjimo galia, W	Maksimali įėjimo įtampa, V	Maksimali įėjimo srovė, A	Maksimali išėjimo galia, VA	Nominali išėjimo srovė, A	Efektyvumas, %	Maksimalaus galios taško sekiklių kiekis (saulės elektrinei)	Nominali veikimo įtampa, V
GCI-5K-H	5000	600	15	5500	21.7	97	1	300

## 2.3. Matavimo įranga

### 2.3.1. “Metrel” MI2892 tinklo analizatorius

“Ginlong GCI-5K-H” inverterio parametrus analizuoti naudojamas “Metrel” įmonės trifazis tinklo analizatorius, kuris realiu laiku, 1 sekundės intervalais matuoja inverterio nuolatinę, kintamą įtampos dalį, dažnį bei kitus parametrus. Šis prietaisas taip pat turi automatinį prijungtų matavimo pridėlių (srovės repleių, Ragovskio žiedų bei kt.) atpažinimą, 4 nepriklausomus įėjimus bei galimybę atlikti matavimus ir konfigūraciją nuotoliniu būdu (tiek per LAN, tiek per GPRS tinklą), o rezultatus išsaugoti nešiojamoje laikmenoje (SD kortelėje) [ 32]. Šis A klasės trifazio tinklo kokybės analizatorius - sukurtas ilgalaikiam elektros tinklų duomenų fiksavimui pagal EN 50160 standartą. Prietaisas atitinka naujausią IEC 61000-4-30 Edition 3 standartą. [ 33] Tyrimo metu duomenys RJ45 ir Ethernet/UTP laido pagalba perduodama į programinę įrangą, kurioje galima valdyti prietaisą bei analizuoti duomenis. Analizuoti matavimo įrangos “Metrel” MI2892 įrašytus duomenis naudojama to paties gamintojo programa “Powerview”. Jos paskirtis – informacijos parsisiuntimas iš prietaiso, išsaugotų duomenų analizavimas kreivių ar lentelių pavidalu. Išsaugoti duomenys gali būti eksportuoti .XLX, .DOCX, .CSV ir .TXT formatu. Taip pat, programa leidžia konfigūruoti prietaisą nuotoliniu būdu. Matavimo įrangos “Metrel” MI2892 charakteristikos pateikiamos apačioje.

**5 lentelė.** Matavimo įrangos “Metrel” MI2892 techninės charakteristikos

Parametras	Diapazonas
Įtampos matavimas, V	50-1730
Diskretizavimo dažnis, Hz	Iki 49 tūkst. nuskaitymų/s
Dažnių diapazonas, Hz	42,5-69
Srovės matavimas, A	0,05-6000(priklauso nuo matavimo repleių)
Galios matavimas	0,000 kW/kVar/kVA ... 9,999 MW/MVar/MVA
Harmonikų matavimas, eilė	1-50
Tarpinių harmonikų matavimas, eilė	1-50
Temperatūros matavimas, °C	-20 - 125



10 pav. “Metrel” MI2892 tinklo analizatorius, dirbantis prie saulės elektrinės tinklo[28]

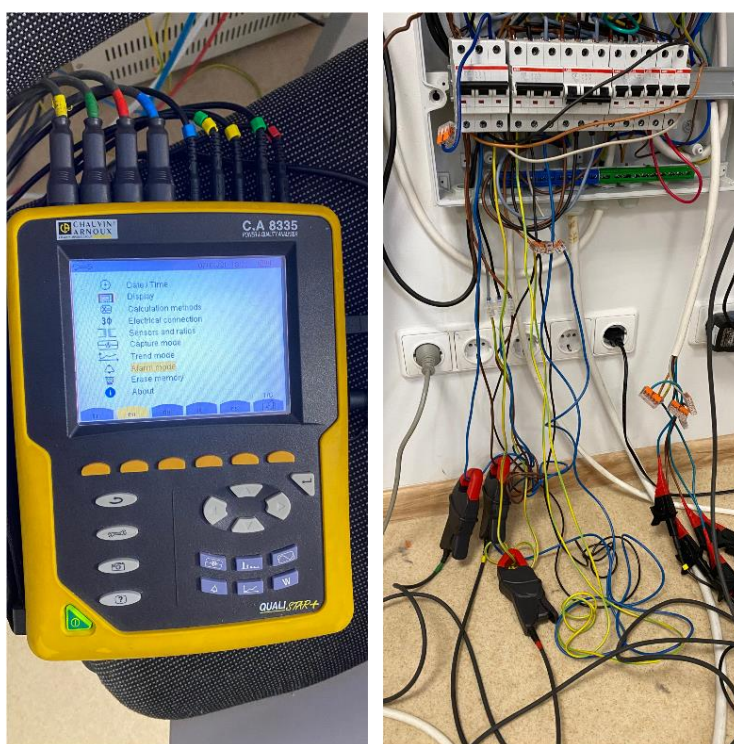
### 2.3.2. “Chauvin Arnoux” C.A 8335 matavimo įranga

“SMA Sunny Tripower 6000TL-20” inverterio parametrus analizuoti naudojamas tinklo galios ir kokybės analizatorius “C.A 8335”, matuojantis įtampą, srovę, harmonikas, galią bei kitus papildomus 30 parametrų. Duomenis tiesiai iš prietaiso galima išsikelti USB kabelio pagalba arba įrašyti į vidinę atmintį, leidžiančią maksimaliai kaupti 1 mėnesio duomenis esant dažniausiam nuskaitymui ir naudojant visus matavimo kanalus. Analizuoti matavimo įrangos “Chauvin Arnoux C.A 8335” įrašytus duomenis naudojama to paties gamintojo programa “Dataview”. Naudojant USB kabelį (galimi ir RS232, “Bluetooth” bei “WiFi” technologijos perdavimo būdai) iš tinklo analizatoriaus informacija yra susisteminama lentelės ar grafiko pavidalu, ją galima eksportuoti XLX, CSV, TXT bei kitais formatais. Programa leidžia keisti įrenginio parametrus realiu laiku, jį konfigūruoti. [35] Šio tyrimo metu įrenginys suprogramuotas naudoti režimą, pritaikytą trifazio tinklo matavimui ir turintį reikalingą tikslumą tyrimui atlikti. “Chauvin Arnoux” C.A 8335 matavimo įrangos techninės charakteristikos pateikiamos apačioje, 6 lentelėje [34]



**6 lentelė.** Matavimo įrangos “Chauvin Arnoux C.A8335” techninės charakteristikos[34]

Parametras	Diapazonas
Įtampos matavimas, V	6-1000
Srovės matavimas, A	0.1-6500
Dažnių diapazonas, Hz	40-69
Harmonikų matavimas, eilė	Iki 50
Pereinamųjų procesų matavimas	Iki 300 matavimų vienu metu



**11 pav.** “Chauvin Arnoux” C.A 8335 tinklo analizatorius, dirbantis prie saulės elektrinės tinklo

### 2.3.3. “Schneider” EcoStruxure programinė-sisteminimo įranga

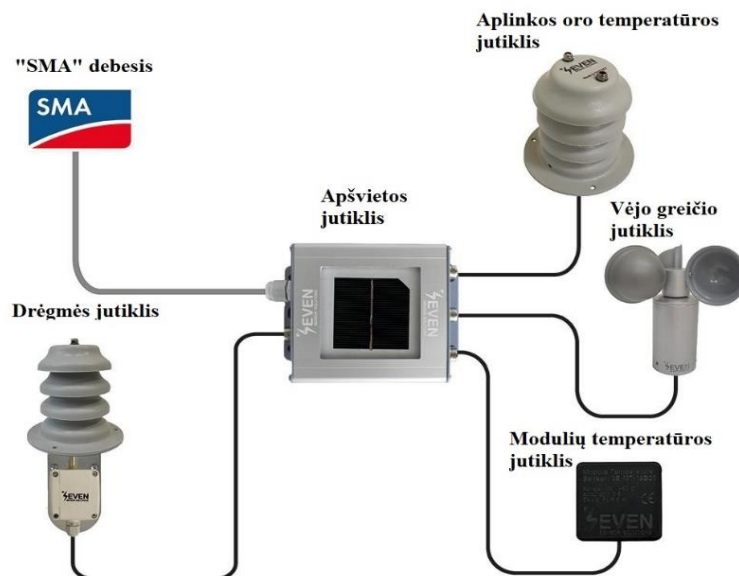
Siekiant surinkti visus tyrimui reikalingus duomenis (vėjo greitį, apšvietą, lauko bei modulių temperatūrą, galią bei kitus parametrus), laboratorijoje įdiegta duomenų sisteminimo platforma “Schneider” EcoStruxure, leidžianti apjungti “SMA” Tripower keitiklį, saulės fotomodulius, apšvietos, vėjo jutiklius bei kitus įrenginius.



12 pav. “Schneider” EcoStruxure programinė sisteminimo įranga, naudojama gauti duomenis iš įvairių jutiklių bei prietaisų viename internetiniame puslapyje

### 2.3.4. “SMA” hidrometeorologinė stotelė Weatherstation

Siekiant surinkti tikslius aplinkos duomenis, turinčius įtakos saulės elektrinės darbiui ir efektyvumui, laboratorijoje įrengta “SMA” įmonės hidrometeorologinė stotelė, prie kurios prijungtas apšvietos, aplinkinio oro temperatūros, modulių temperatūros, vėjo greičio bei oro drėgmės jutiklis[35]. Ši stotelė interneto pagalba siunčia duomenis į 2.3.3 skyrelyje aprašytą programinę sisteminimo įrangą “Schneider” EcoStruxure.



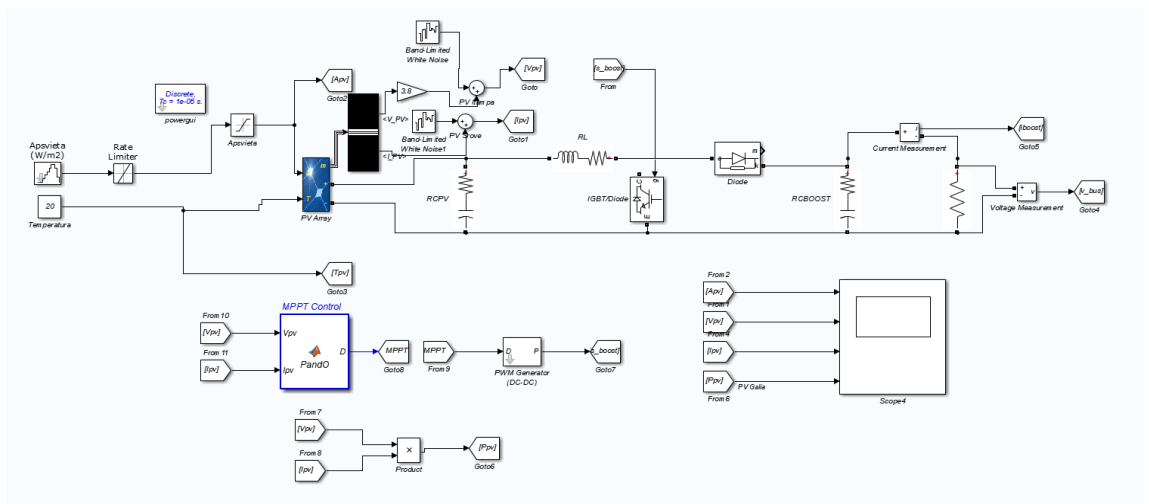
13 pav. “SMA” įmonės hidrometeorologinė stotelė bei jos sudedamosios dalys[36]

## 2.4. Modeliavimo dalis

Šioje tyrimo dalyje bus aptartas saulės elektrinės, esančios ant KTU laboratorijos stogo, simuliacinis modelis naudojant “Matlab” programinę įrangą su papildiniu “Simulink”, o rezultatai bei jų palyginimas su realaus tyrimo rezultatais pateikiami 3.5 skyriuje. Modeliavimo metu siekta atkurti modelį kuo artimesnį savo parametrais tikrai saulės elektrinei.

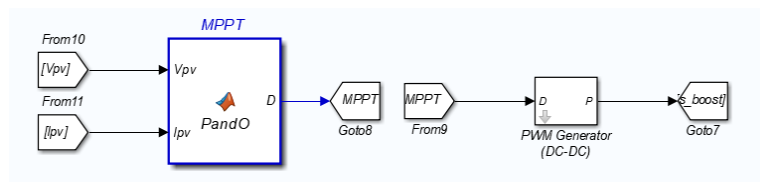
### 2.4.1. Saulės elektrinės modelio “Matlab” programoje aprašymas

Kaip matome 14 paveiksle, modelį sudaro saulės elektrinė bei tipinė vienfazio inverterio naudojama galios elektronika ir matavimo prietaisai duomenims gauti. Visos kitos modelio dalys naudojamos išgauti tinkamus grafikus bei reikšmes. Simulacijos trunka 21 sekundę - tai atspindi laiką nuo vidurnakčio iki 9 valandos vakaro, siekiant apimti kuo daugiau apšvietos reikšmių. Apšvietos reikšmės parinktos atitinkamai su tyrimo metu gautomis vidutinėmis toms valandoms apšvietomis.

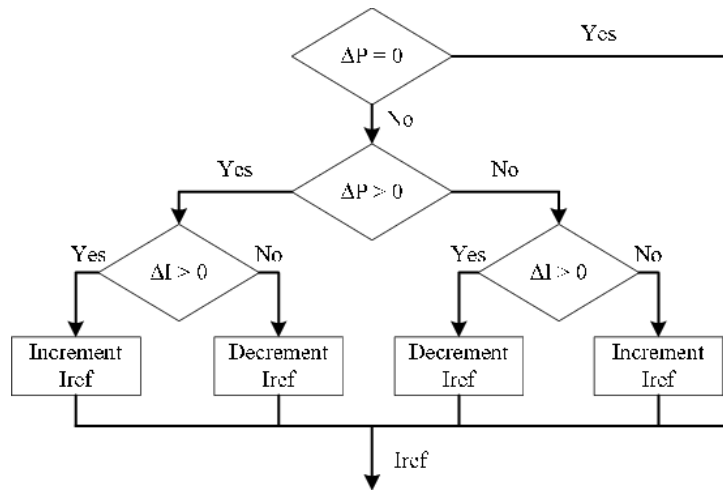


14 pav. Pilna saulės elektrinės su vienfaziu inverteriu modelio schema “Matlab” programoje

Modelyje sukurtas saulės elektrinės “Matlab” blokas, sudarytas iš 12 nuosekliai sujungtų fotoelementų, kurių parametrai nustatyti pagal 2.1.1 skyrelio 2 lentelę - tokiu būdu išgauname 3 kW galią. Fotomodulių galiai valdyti naudojama tipinė “Matlab” pateikiama maksimalaus galios taško sekiklio valdymo schema 15 bei 16 paveiksluose, kuri realiu laiku matuoja elektrinės įtampą bei srovę ir taip užtikrina maksimalų galios tašką bet kuriuo veikimo momentu:



15 pav. Saulės elektrinės maksimalaus galios taško sekiklio dalies simuliacinė dalis „Matlab“ programoje



**16 pav.** Tipinė maksimalaus galios taško sekimo loginė schema[37]

Taip pat, modelyje maksimaliam galios taško sekikliui suprogramuoti naudojamas “stebėk ir trukdyk“ algoritmas, kurio veikimo principas paremtas faktinės saulės modulių galios matavimu ir jos prilyginamas suskaičiuotai galiai. Jei išmatuota galia yra didesnė nei suskaičiuota, ji tampa nauju maksimumu, o naujai išmatuota galia jau lyginama su ja. Tokiu būdu nustatoma maksimali galima išgaunama galia. Apačioje, 17 paveiksle pateikiama dalis programinio kodo, naudoto suprogramuoti maksimalaus galios taško sekiklį „Matlab“ programoje“

```

1  function D = Fand0(Vpv, Ipv)
2
3  persistent Dprev Pprev Vprev
4
5  if isempty(Dprev)
6
7      Dprev=0.7;
8
9      Vprev=400;
10
11     Pprev=3000;
12
13 end
14
15 deltaD=0.001;
16
17 Ppv=Vpv*Ipv;
18
19 if (Ppv-Pprev)~=0
20
21     if (Ppv-Pprev)>0
22
23         if (Vpv-Vprev)>0
24
25             D=Dprev-deltaD;
26
27         else
28
29             D=Dprev+deltaD;
30
31         end
32
33     else
34
35         if (Vpv-Vprev)>0
36
37             D=Dprev+deltaD;
38
39         else
40
41             D=Dprev-deltaD;
42
43         end
44

```

**17 pav.** Dalis maksimalaus galios taško nustatymo programinio kodo “Matlab” programoje[38]

Modeliavimo rezultatai pateikiami 3.5 skyriuje.

### 3. Tyrimo rezultatų dalis

#### 3.1.1. Tyrimo etapai

Šioje darbo dalyje bus aptarta eksperimentinė dalis bei gauti rezultatai. Eksperimentas suskirstytas į šiuos etapus:

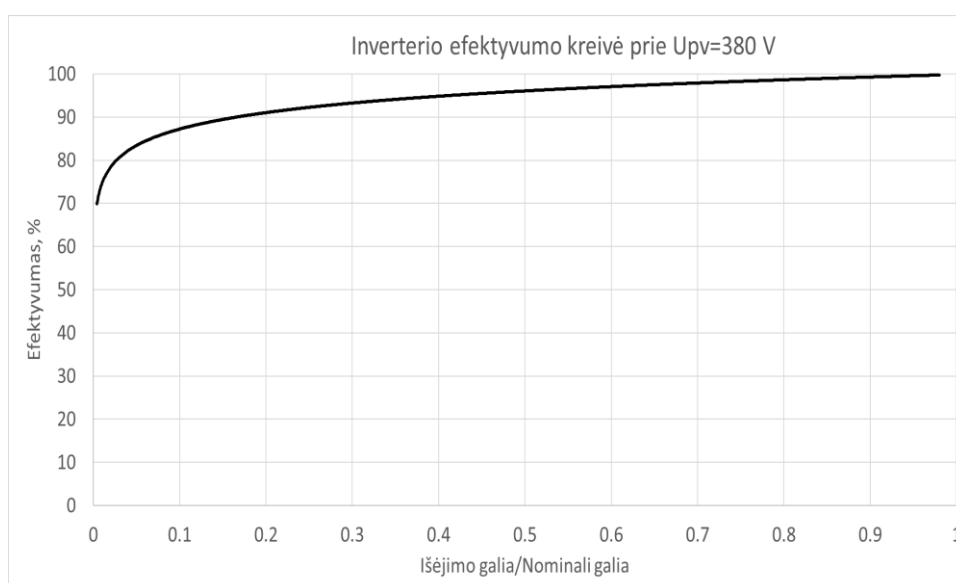
- Pirmasis etapas tiria „SMA“ Tripower 6000TL-20 keitiklį, prie kurio prijungta 3 kW galios stacionari bei 3 kW galios pasukama saulės elektrinė su 24 vnt. Solitek” įmonės G/G 240-250 modelio modulių. Matavimui naudojamas “Chauvin Arnoux” C.A 8335 tinklo analizatorius(16 paveikslas). Nuolatinės srovės dalies, apšvietos, vėjo greičio bei kiti duomenys gaunami iš “Schneider” Ecostruxure programinės-sisteminimo įrangos, aprašytos 2.3.3 skyrelyje, o kintamos srovės dalies duomenys iš “Dataview” programinės įrangos, aprašytos 2.3.2 skyrelyje.
- Antrasis etapas tiria SMA” keitiklį Tripower 6000TL-20, kai prie jo prijungta tik 3 kW stacionari saulės elektrinė. Matavimui naudojamas “Chauvin Arnoux” C.A 8335 tinklo analizatorius(16 paveikslas). Nuolatinės srovės dalies, apšvietos, vėjo greičio bei kiti duomenys gaunami iš “Schneider” Ecostruxure programinės-sisteminimo įrangos, aprašytos 2.3.3 skyrelyje, o kintamos srovės dalies duomenys iš “Dataview” programinės įrangos, aprašytos 2.3.2 skyrelyje. Matavimui naudojamos tos pačios priemonės kaip ir pirmame etape. Pirmojo ir antrojo etapo rezultatai pateikiami vienoje vietoje, tuose pačiuose grafikuose siekiant palyginti efektyvumą, kai esant didelei ir mažai galiai.
- Trečiasis etapas tiria „Ginlong“ įmonės keitiklį GCI-5K-H, prie kurio prijungta 3 kW pasukama saulės elektrinė. Matavimui naudojamas “Metrel” MI 2892 tinklo analizatorius. Iš jo gaunami tiek nuolatinės srovės, tiek kintamos srovės dalies duomenys. Apšvietos, vėjo greičio bei kiti duomenys gaunami iš “Schneider” Ecostruxure programinės-sisteminimo įrangos, aprašytos 2.3.3 skyrelyje.
- Ketvirtas etapas tiria “Solitek” įmonės G/G 240-250 modulius bei apšvietos, vėjo greičio ir temperatūros įtaką jų generuojamai galiai. Apšvietos, vėjo greičio bei kiti duomenys gaunami iš “Schneider” Ecostruxure programinės-sisteminimo įrangos, aprašytos 2.3.3 skyrelyje.

### 3.2. Pirmasis bei antrasis tyrimo etapas(“SMA” Tripower 6000TL-20 prijungtas prie 6 kW saulės elektrinės ir, po to, prie 3 kW saulės elektrinės

Šio tyrimo etapo metu siekta nustatyti keitiklio Tripower 6000TL-20 efektyvumo kreivę, kai nuolatinės srovės(saulės elektrinės) dalies įtampa yra 380 V bei palyginti ją su gamintojo pateikiama kreive, iširti keitiklio efektyvumo priklausomybę nuo apšvietos, vėjo greičio ir modulių temperatūros. Taip pat, iširti modulių temperatūros priklausomybę nuo vėjo greičio ir apšvietos priklausomybę nuo vėjo greičio.

#### 3.2.1. “SMA” inverterio Sunny Tripower 6000TL-20 efektyvumo kreivė

Vienas pagrindinių inverterio parametrų yra jo gebėjimas efektyviai paversti saulės elektrinės sugeneruotą nuolatinę srovę į kintamą, kurią galėtų naudoti tipiniai buitiniai prietaisai. Palyginame gamintojo pateiktą efektyvumo kreivę(2.2.1 skyrelis, 10 pav.) su eksperimento metu gauta kreive, kai saulės elektrinės įtampa  $U_{pv} = 380$  V:



**18 pav.** Eksperimento metu gauta “SMA” Sunny Tripower 6000TL-20 efektyvumo kreivė, kai  $U_{pv} = 380$  V.

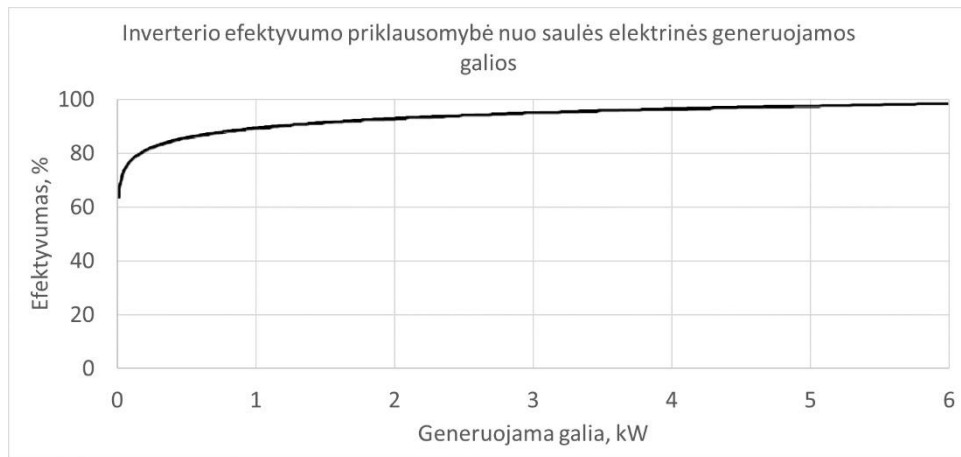
Palyginę eksperimentinę bei gamintojo pateiktą efektyvumo kreivę matome, jog realiomis sąlygomis dirbančio inverterio Sunny Tripower 6000TL-20 efektyvumas skiriasi. Pastebėti šie skirtumai:

- Pastebima, kad, kylant išėjimo ir nominalios galios santykiui ir jam artėjant prie 1, kyla ir inverterio efektyvumas. Tuo metu gamintojo kreivėje efektyvumas krenta artėjant prie nominalios keitiklio galios.
- Esant itin mažam išėjimo ir nominalios galios santykiui(0-0,2) realiomis sąlygomis testuoto inverterio keitiklio efektyvumas yra apie 10% mažesnis

lyginant su gamintojo deklaruota efektyvumo kreive. Kylant išėjimo ir nominalios galios santykiui, gamintojo deklaruota kreivė ir ištirta supanašėja. Pastebima, jog matavimo metu saulės elektrinės modulių įtampa  $U_{pv} = 380 \text{ V}$ , tuo tarpu gamintojo kreivė pateikiama prie 370 V.

### 3.2.2. “SMA” inverterio Sunny Tripower 6000TL-20 efektyvumo priklausomybė nuo saulės elektrinės generuojamos galios

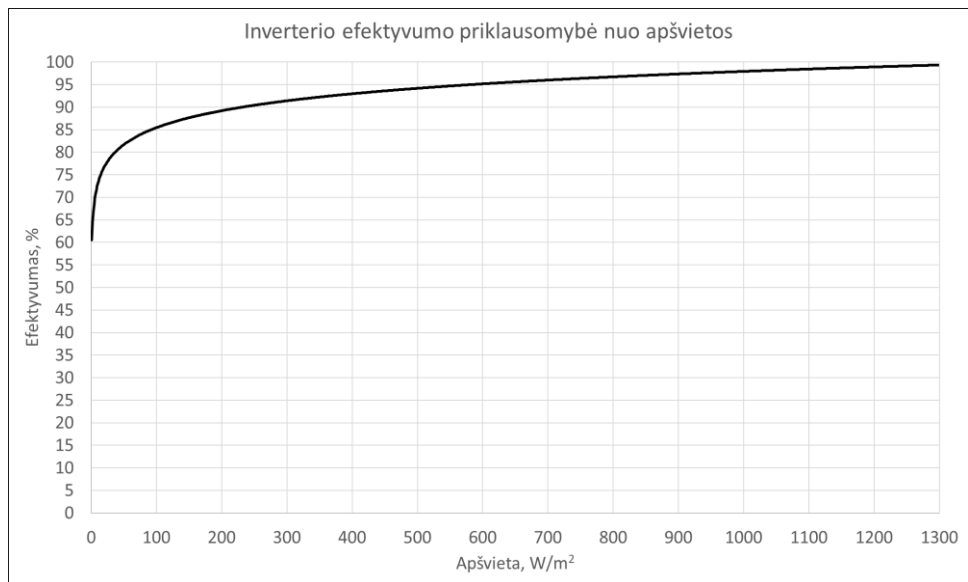
Palyginus 19 paveikslą ir 2 paveikslą matome, jog didėjant saulės elektrinės generuojamai galiai (ir, atitinkamai, inverterio galiai), keitiklio efektyvumas didėja.



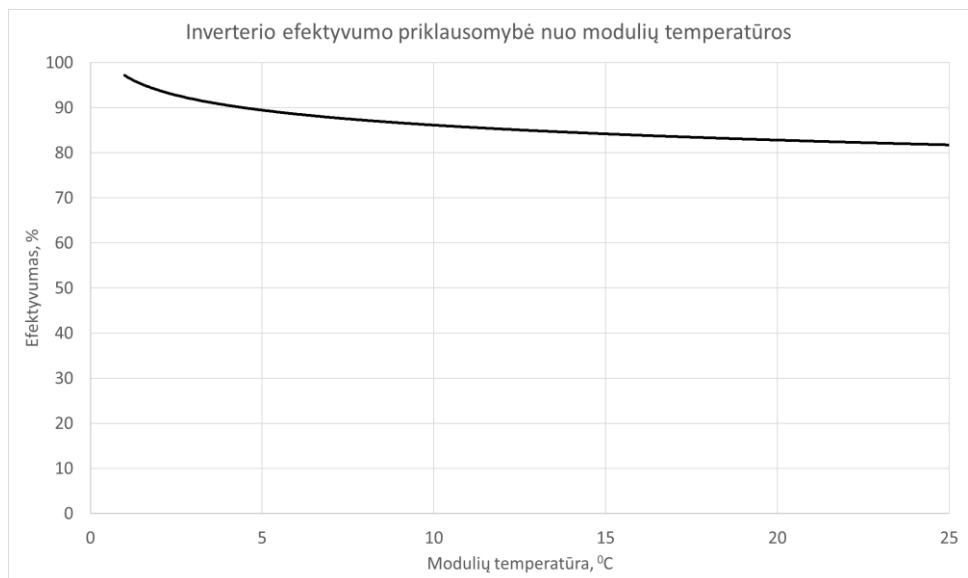
19 pav. “SMA” keitiklio Sunny Tripower 6000TL-20 efektyvumo priklausomybė nuo saulės elektrinės generuojamos galios

### 3.2.3. “SMA” inverterio Sunny Tripower 6000TL-20 efektyvumo priklausomybė nuo apšvietos bei modulių temperatūros

Kaip matome 20 ir 21 paveiksle, “SMA” inverterio Sunny Tripower 6000TL-20 efektyvumas teigiamai priklauso nuo apšvietos ir didėja kartu su ja, tuo tarpu kylanti saulės modulių temperatūra dėl didėjančios apšvietos turi neigiamą įtaką efektyvumui.



**20 pav.** Eksperimento metu gauta “SMA” inverterio Sunny Tripower 6000TL-20 efektyvumo priklausomybė nuo apšvietos



**21 pav.** Eksperimento metu gauta “SMA” inverterio Sunny Tripower 6000TL-20 efektyvumo priklausomybė nuo modulių temperatūros.

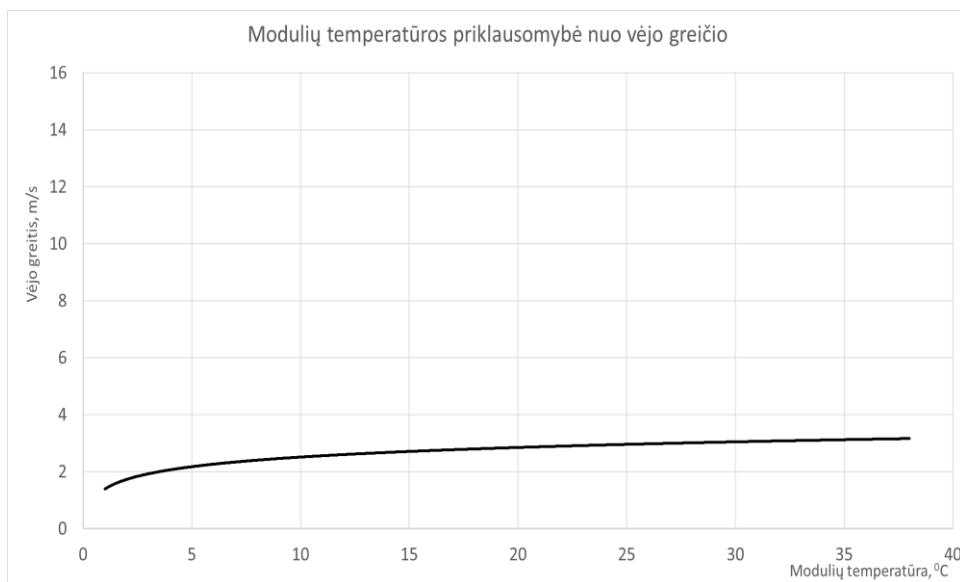
### 3.2.4. Vėjo įtaka efektyvumui, modulių temperatūrai bei ryšys su apšvieta

Kaip matome 22 ir 23 paveiksluose, vėjas turi teigiamą įtaką saulės elektrinės efektyvumui – didesnis efektyvumas matuotas tada, kai vėjo greitis buvo didesnis. Taip pat, tyrimo metu pastebėta, jog saulės modulių temperatūra buvo didesnė tomis dienomis, kai vėjo greitis buvo didesnis. Tai paaiškinti gali 24 paveikslas: galima teigti, jog vėjo greitis buvo didesnis tomis dienomis, kai apšvieta buvo didelė. Tai reiškia, kad padidėjęs vėjo greitis nesugeba atšaušinti modulių tiek, kiek jie prišyla nuo padidėjusios apšvietos.

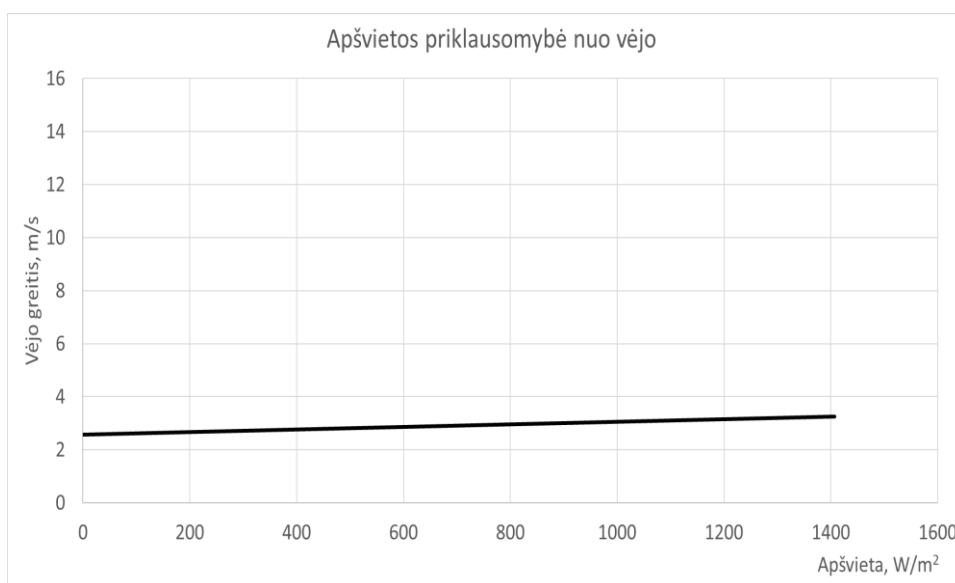




**22 pav.** Saulės elektrinės inverterio efektyvumo priklausomybė nuo vėjo greičio



**23 pav.** Eksperimento metu gauta saulės modulių temperatūros priklausomybė nuo vėjo greičio



24 pav. Eksperimento metu gauta apšvietos priklausomybė nuo vėjo greičio priklausomybė

### 3.3. Trečiasis tyrimo etapas („Ginlong“ įmonės inverteris GCI-5K-H prijungtas prie 3 kW pasukamos saulės elektrinė)

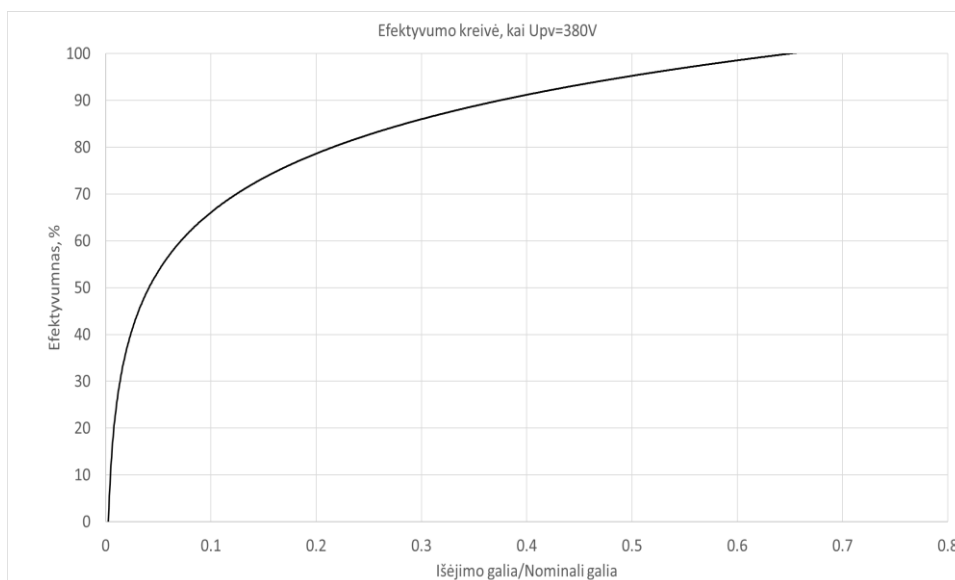
Šio tyrimo etapo metu nustatyta „Ginlong“ inverterio GCI-5K-H efektyvumo kreivė, kai nuolatinės srovės (saulės elektrinės fotomodulių) dalies įtampa yra 380 V. Toliau bus pateikiami gauti rezultatai. Kadangi galimybės gauti gamintojo pateikiamą kreivę nėra, pateikiama tyrimo metu gauta efektyvumo kreivė bus palyginta su panašių parametrų „SMA“ įmonės įrenginiu „Sunny Boy 5.0“. Taip pat, ištirtas apšvietos, vėjo bei modulių temperatūros poveikis keitiklio efektyvumui.

#### 3.3.1. „Ginlong“ įmonės inverterio GCI-5K-H efektyvumo kreivė

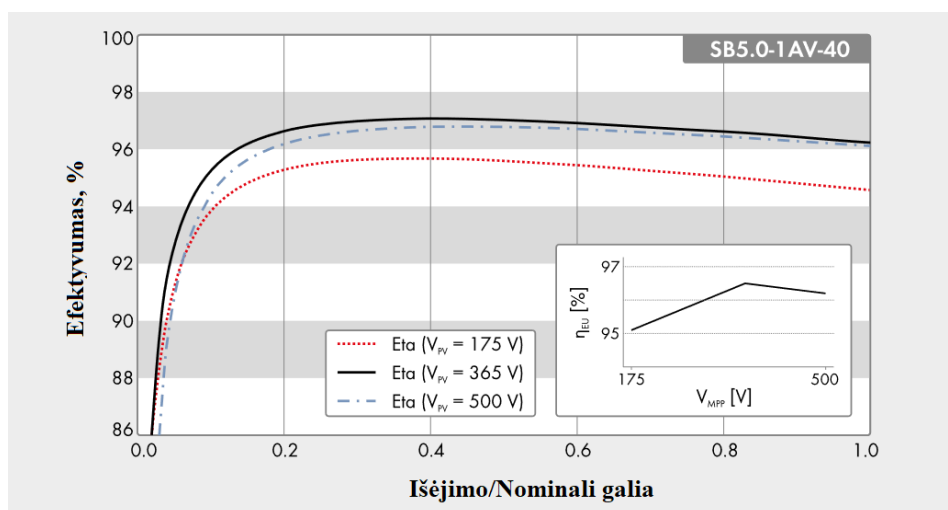
Palyginus 25 paveikslą su 26 pastebime, jog „SMA“ įmonės „Sunny Boy 5.0“ inverteris pasižymi didesniu efektyvumu mažuose išėjimo ir nominalios galios santykio dalyse (0-0,2) per beveik 20%. Verta paminėti, jog prie „Ginlong“ įmonės inverteris GCI-5K-H, kurio maksimali įėjimo galia, pagal 2.2.2 skyrelio 4 lentelę, yra 5 kW, nedirba pilnu pajėgumu. Todėl 32 paveiksle išėjimo ir nominalios galios santykis tesiekia 0.65. Pastebima, jog tyrimo metu apšvieta viršijo saulės modulių testavimo gamykloje apšvietą (1000 W/m<sup>2</sup>), todėl saulės modulių išvystyta galia buvo didesnė nei nurodyta gamintojo ir, kartu, inverterio efektyvumas taip pat išaugo. Toliau, pastebėti šie skirtumai tarp dviejų inverterių darbo tyrimo metu:

- GCI-5K-H inverterio efektyvumas pradeda sparčiai kilti tik padidėjus išėjimo ir nominalios galios santykiui virš 0.2, tuo tarpu „SMA“ įmonės „Sunny Boy 5.0“ pasižymi tolygiu efektyvumu visame galios diapazone.

- Esant tam pačiam galių santykiui, „Ginlong“ įmonės inverteris GCI-5K-H pasižymi 17% mažesniu efektyvumu, ypač mažos galios srityje.



**25 pav.** Eksperimento metu gauta „Ginlong“ GCI-5K-H efektyvumo kreivė, kai  $U_{pv} = 380\text{ V}$



**26 pav.** Panašių parametrų vienfazio inverterio „Sunny Boy 5.0“ efektyvumo kreivė[39]

### 3.3.2. Efektyvumo priklausomybė nuo saulės elektrinės generuojamos galios

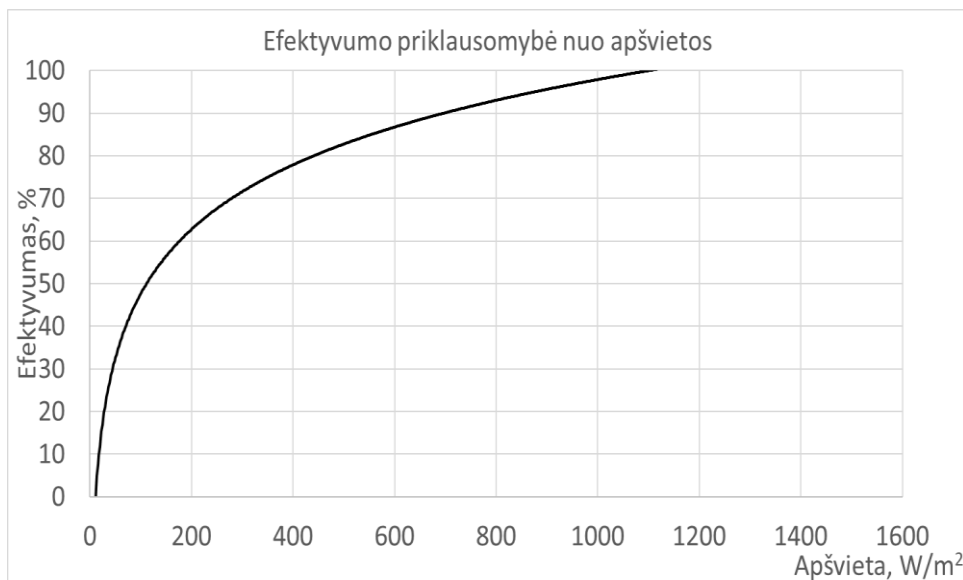
Kadangi prie inverterio GCI-5K-H prijungta tik 3 kW iš galimų 5 kW, 27 paveiksle pastebime itin didelį ir staigų efektyvumo kylimą didėjant saulės elektrinės generuojamai galiai.



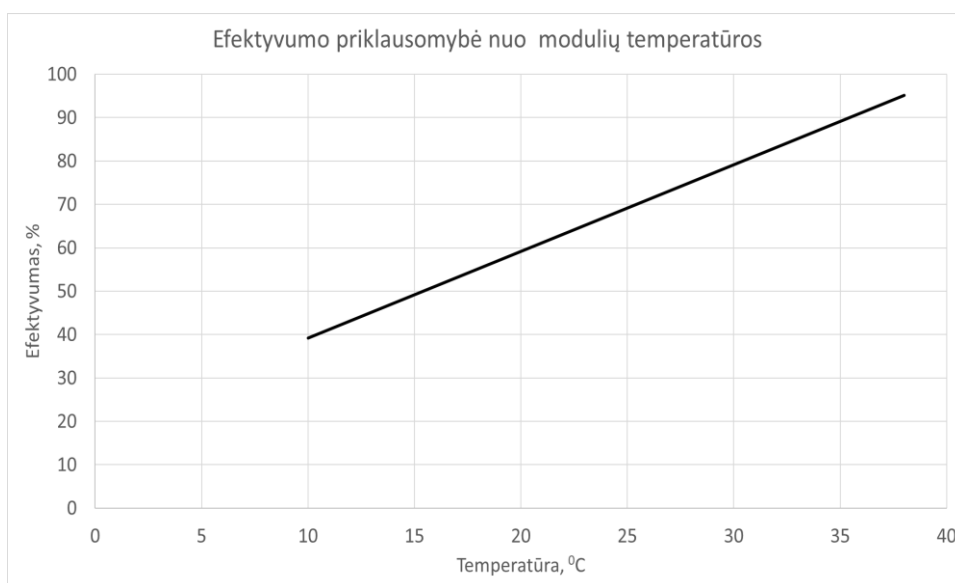
**27 pav.** “Ginlong” inverterio GCI-5K-H efektyvumo priklausomybė nuo saulės elektrinės generuojamos galios

### 3.3.3. Efektyvumo priklausomybė nuo apšvietos bei modulių temperatūros

Iš 28 ir 29 paveikslų matome, jog mažesnės galios inverteris GCI-5K-H jautriau reaguoja į apšvietos pokyčius – sparčiai kylant apšvietai modulių kaitimas nedaro neigiamos įtakos elektrinės efektyvumui ir jis didėja.



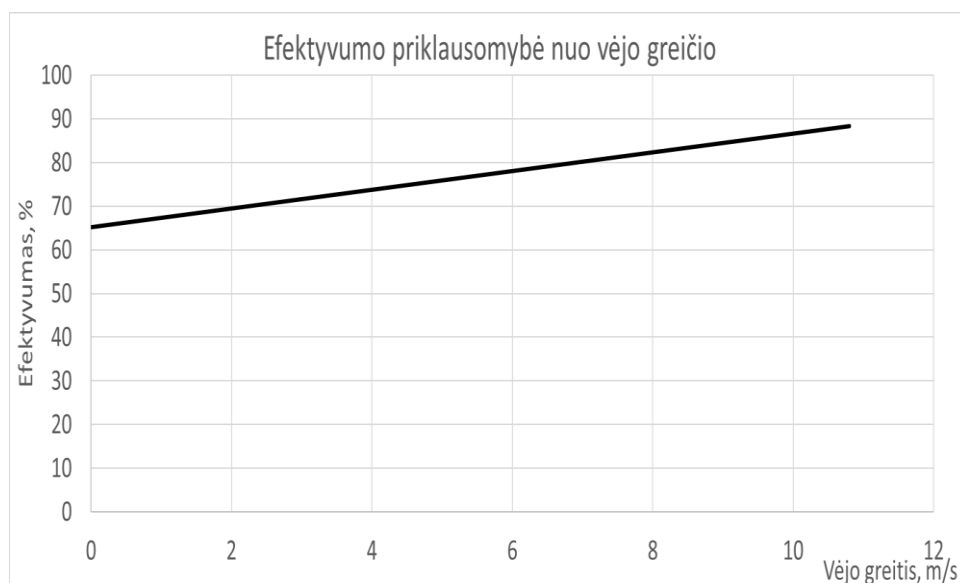
28 pav. Eksperimento metu gauta efektyvumo priklausomybė nuo apšvietos



29 pav. Eksperimento metu gauta efektyvumo priklausomybė nuo modulių temperatūros, rodanti teigiamą priklausomybę

### 3.3.4. Vėjo įtaka efektyvumui

Kaip ir su “SMA” įmonės inverteriu Sunny Tripower 6000TL-20, “Ginlong” inverteriui GCI-5K-H didesnis vėjo greitis taip pat reiškia didesnę efektyvumą.



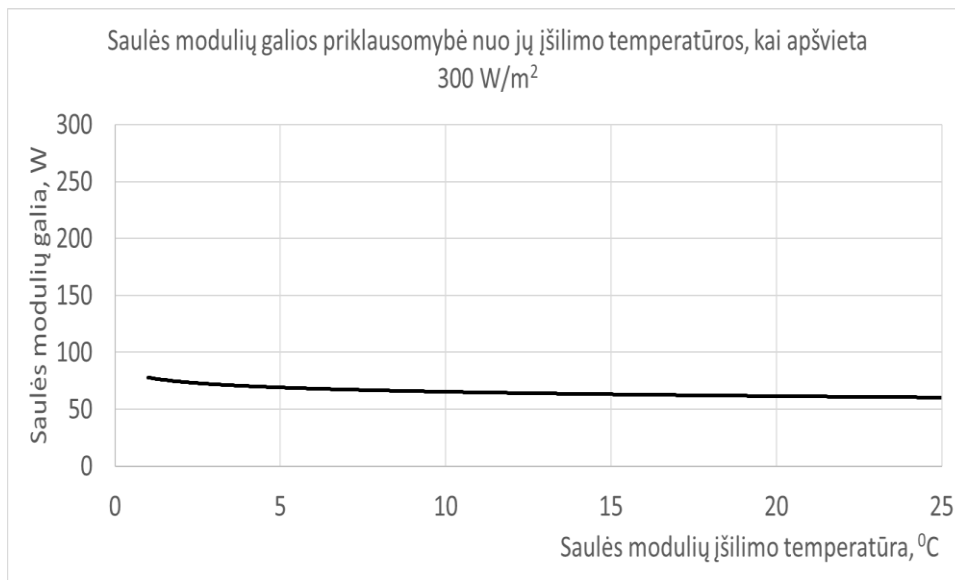
**30 pav.** “Ginlong” inverterio GCI-5K-H efektyvumo priklausomybė nuo vėjo greičio, gauta tyrimo metu

### 3.4. Ketvirtasis tyrimo etapas (tiriami “Solitek” įmonės G/G 240-250 moduliai)

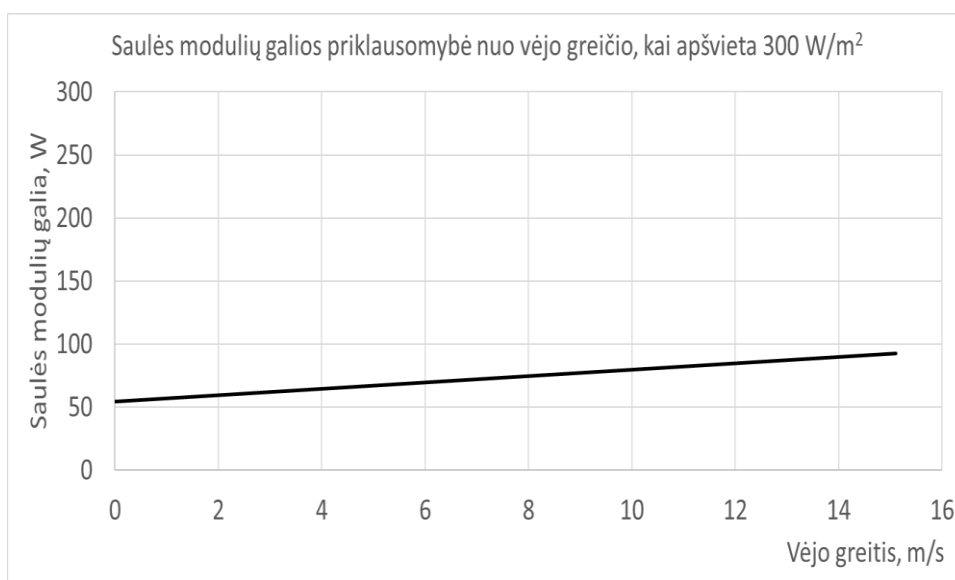
Kaip aptarta literatūroje, modulių elektros gamybai jų temperatūra turi neigiamą įtaką, todėl šiame skyrelyje išimtinai siekta ištirti, kokį poveikį išilimas turėjo KTU esančiai 6 kW galios saulės elektrinei, kurios fotomoduliai - lietuvių įmonės “Solitek” G/G 240-250 modeliai.

#### 3.4.1. Temperatūros ir vėjo greičio įtaka saulės modulių generuojamai galiai

Tirdami temperatūros ir vėjo daromą įtaką saulės moduliams, pasirenkame fiksuotą, 300 W/m<sup>2</sup>, apšvietą, kad galėtume palyginti, kaip skirtinga temperatūra ir vėjo greitis paveikia saulės modulių generuojamą galią. 31 paveiksle matome, jog vieno modulio galiai jo iššylio temperatūrą turi nežymų neigiamą poveikį – kylant temperatūrai, moduliu išvystoma galia mažėja. Tai sutampa su gamintojo specifikacija, kuri nurodo, jog modulis praranda apie 0,4% savo generuojamos galios pakilus vienam laipsniui temperatūros Celsijaus skalėje. Be to, 32 paveiksle matome, jog, esant dvigubai didesniai vėjo greičiui, saulės moduliai išvysto apie 9% didesnę galią.



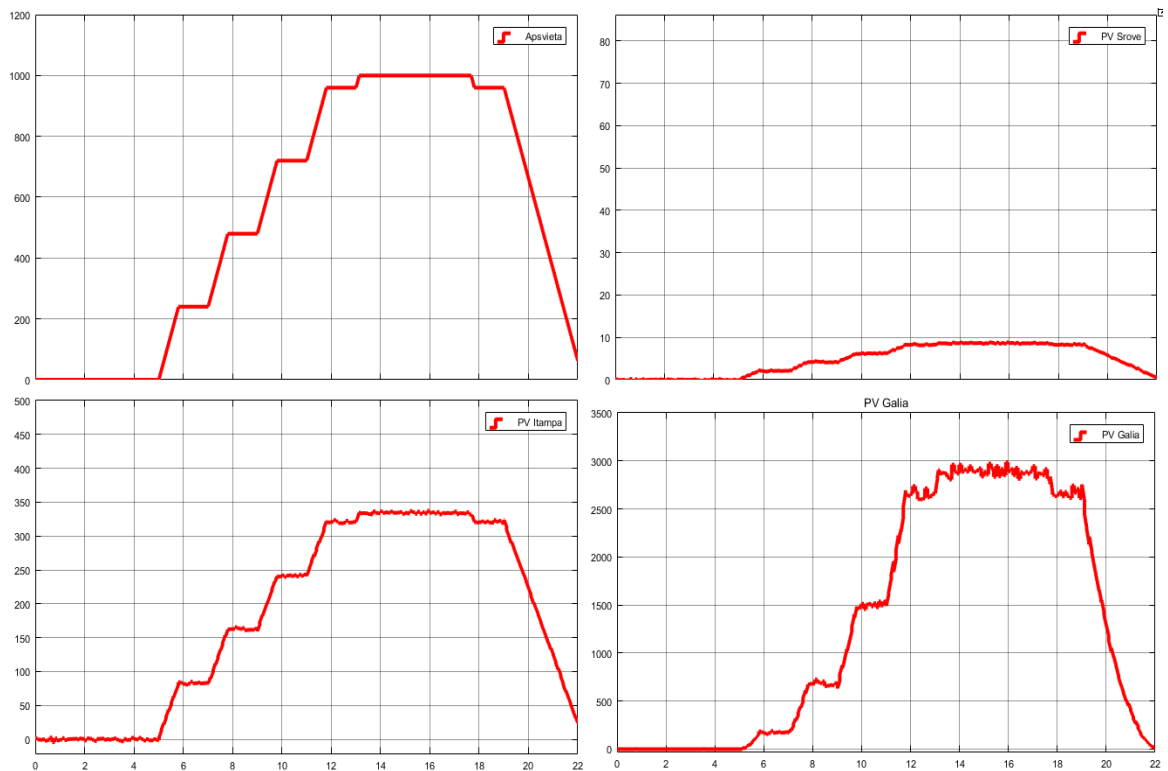
**31 pav.** Ištirtų saulės modulių generuojamos galios priklausomybė nuo jų temperatūros



**32 pav.** Ištirtų saulės modulių generuojamos galios priklausomybė nuo vėjo greičio

### 3.5. Saulės elektrinės simuliacinio modelio “Matlab” programoje rezultatai

Šiame skyrelyje bus pateikti ir aptarti “Matlab” saulės elektrinės simuliacinio modelio gauti rezultatai. Kaip matome 33 paveiksle, kintant apšvietai (viršutinė kairė dalis), atitinkamai kinta srovė (viršutinė dešinė dalis) bei įtampa (apatinė kairė dalis). Apšvietai pasiekus piką, apie 1000 W/m<sup>2</sup>, elektrinės galia siekia beveik 3 kW. Palyginus modelio rezultatus su tyrimo dalies rezultatais (3.3.2 skyrelis, 27 paveikslas), pastebima, jog 2.8-3.5 kW galios ruožuose duomenų yra itin nedaug duomenų, todėl modelio rezultatai yra šiek tiek geresni nei esama realybėje. Pastebima, kad modelio saulės elektrinės galios rezultatai yra beveik 10% didesni nei gauti realių matavimų metu.



**33 pav.** Saulės elektrinės modeliavimo rezultatai “Matlab” programoje. Viršuje kairėje – apšvieta, viršuje dešinėje – elektrinės srovė, apačioje kairėje – jos įtampa, apačioje dešinėje – elektrinės galia

### 3.6. Rekomendacijos dėl tyrimo pagerinimo

Šioje darbo dalyje bus pateiktos rekomendacijos, kylančios iš tyrimo metu susidurtų sunkumų, kuriuos ištaisius ateityje bus galima atlikti tikslesnius bandymus:

- **Įrengti vėjo krypties matuoklį ant pačios laboratorijos stogo:** kadangi vėjo kryptis itin kinta dėl aplinkui esančių pastatų, o esama vėjo stotelė, įrengta ant Studentų g. 48 pastato, yra dalinai uždengta iš vienos pusės pastato fasado, įrengus vėjo matuoklį ant pačios laboratorijos stogo leistų išsamiau ištirti vėjo poveikį saulės elektrinės gamybai.
- **Įrengti papildomą kiekį tinklo analizatorių laboratorijoje:** esant keliems vienodiems tinklo analizatoriams, vienu metu galima tirti kelis įrenginius išsaugant tą patį matavimo tikslumą ir taip išgauti tikslesnius rezultatus ateities tyrimuose.



## Išvados

1. Ištyrus vidutinę modulių temperatūrą, pastebėta, jog saulės modulių generuojama galia krenta apie 0,3% saulės modulių temperatūrai padvigubėjus. Taip pat, padvigubėjus vėjo greičiui, saulės modulių generuojama galia padidėja apie 0,4% dėl aušinamojo poveikio.
2. Tyrimo metu nustatyta, kad vėjas turi teigiamą aušinamą poveikį saulės moduliams, kadangi vėjuotomis dienomis saulės modulio generuojama galia padidėdavo apytiksliai 10%. Šis aušinimo efektas itin pasireiškė mažos galios, nepilnai apkrautame „Ginlong“ inverteryje GCI-5K-H, kurio efektyvumas padidėdavo vidutiniškai 10% vėjo greičiui padvigubėjus. „SMA“ inverteryje Sunny Tripower 6000TL-20, kuris buvo apkrautas beveik maksimaliai, šis efektas pasireiškė 2% efektyvumo padidėjimu padvigubėjus vėjo greičiui
3. Ištyrus realius inverterių efektyvumus bei palyginus juos su gamintojo deklaruojamais duomenimis pastebėta, kad vokiečių įmonės „SMA“ keitiklis yra efektyvesnis esant mažam išėjimo ir nominalios galios santykiui(0,2-0,3) nei kinų įmonės „Ginlong“ inverteris, kuris, esant tam pačiam galių santykiui, pasižymi 17% mažesniu efektyvumu, ypač mažos galios srityje. Tiek Sunny Tripower 6000TL-20, tiek Sunny Boy 5.0 inverteriai pasižymi tolygesniu efektyvumu visame išėjimo ir nominalios galios santykio diapazone nei „Ginlong“ GCI-5K-H inverteris. Eksperimento metu taip pat nustatyta, jog realiomis sąlygomis dirbantis „SMA“ inverteris Sunny Tripower 6000TL-20 mažos išėjimo ir nominalios galios santykio(0-0,2) ruože dirba apytiksliai 3% mažesniu efektyvumu nei deklaruota gamintojo, Kituose ruožuose efektyvumai sutampa. Tam galėjo turėti įtakos tai, jog gamintojo deklaruojama kreivė išmatuota prie 370 V saulės elektrinės įtampos, o eksperimento metu naudota 380 V įtampa.
4. Sukurtas saulės elektrinės simuliacinis „Matlab“ modelis, analogiškas tikrai saulės elektrinei ant KTU stogo, kurio pagalba ištirta, jog reali 3 kW saulės elektrinė prie 1000 W/m<sup>2</sup> dirba apie 4% mažesniu efektyvumu nei simuliacinėmis sąlygomis sukurta elektrinė.

## Literatūros sąrašas

1. „International energy association“ internetinis puslapis. [žiūrėta 2020-06-12]. Prieiga per internetą: <https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20consumption&indicator=Electricity%20final%20consumption>
2. T.B. Johansson, H. Kelly, A.K.N Reddy, R.H. Williams, "Renewable energy: sources for fuels and electricity" in , Island press, pp. 1-10, 1993 m.
3. Vytautas Adomavičius „Mažosios atsinaujinančių išteklių energijos sistemos“. Mokomoji knyga. Kaunas, KTU leidykla „Technologija“, 2013 m. ISBN 978-609-02-0945-5
4. Gytis Petrauskas, Vytautas Adomavičius „Saulės energijos naudojimas elektrai gaminti“. Mokomoji knyga. Kaunas, KTU leidykla „Technologija“, 2013 m. ISBN 978-609-02-0752-9, 2012 m.
5. M. Guarnieri, "More Light on Information [Historical]," in IEEE Industrial Electronics Magazine, mokomoji knyga, psl. 58-61. 2015 m.
6. S. Rühle (2016). "Tabulated values of the Shockley–Queisser limit for single junction solar cells", mokomoji knyga, psl. 139-147. 2016 m.
7. Ben G. Streetman, Sanjay Banerjee „Solid State electronic Devices“,New Jersey, Prentice Hall, mokomoji knyga, psl. 524. ISBN 0-13-025538-6.
8. Y. Dong, J. Ding, J. Huang, L. Xu and W. Dong, "Investigation of PV inverter MPPT efficiency test platform," International Conference on Renewable Power Generation (RPG 2015), Beijing, 2015, pp. 1-4, doi: 10.1049/cp.2015.0513. [žiūrėta 2021-03-13]. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7446670>
9. A. A. Koochaksaraei and H. Izadfar, "High-Efficiency MPPT Controller Using ANFIS-reference Model For Solar Systems," 2019 5th Conference on Knowledge Based Engineering and Innovation (KBEI), Tehran, Iran, 2019, pp. 770-775, doi: 10.1109/KBEI.2019.8734965. [žiūrėta 2021-03-20]. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8734965>
10. R. Mallwitz and B. Engel, "Solar power inverters," 2010 6th International Conference on Integrated Power Electronics Systems, Nuremberg, Germany, 2010, pp. 1-7. [žiūrėta 2021-03-20]. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5730644>
11. U. S. Selamogullari, D. A. Torrey and S. Salon, "A Systems Approach for a Stand-Alone Residential Fuel Cell Power Inverter Design," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 25, no. 3, pp. 741-749, Sept. 2010, doi: 10.1109/TEC.2010.2047057. [žiūrėta 2021-03-13]. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5552155>
12. O. Elma and U. B. Selamoğullari, "The effect of inverter efficiency on stand-alone residential PV system sizing," 2011 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Bursa, Turkey, 2011, pp. I-317-I-319. [žiūrėta 2020-06-13]. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6140231>
13. C. Schwingshackl, M. Petitta, J.E. Wagner, G. Belluardoc, D. Moserc, M. Castella, M. Zebisch and A. Tetzlaff “Wind effect on PV module temperature: Analysis of different techniques for an accurate estimation”, straipsnis, [žiūrėta 2020-06-13]. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.08.010> .
14. D. L. King, W. E. Boyson and J. A. Kratochvil, "Analysis of factors influencing the annual energy production of photovoltaic systems," Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic

- Specialists Conference, 2002., New Orleans, LA, USA, 2002, pp. 1356-1361, doi: 10.1109/PVSC.2002.1190861.
15. M. Koehl, M. Heck, S. Wiesmeier, J. Wirth, "Modeling of the nominal operating cell temperature based on outdoor weathering", *Sol Energ Mat Sol C.*, 95 (2011), pp. 1638-1646
  16. Mussard Maxime, "Solar energy under cold climatic conditions: A review" [žiūrėta 2020-06-13]. Prieiga per internetą : <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.009>
  17. E. Durán 1 J. M. Andújar, J. M. Enrique, J. M. Pérez-Oria "Determination of PV Generator I-V/P-V Characteristic Curves Using a DC-DC Converter Controlled by a Virtual Instrument" [žiūrėta 2020-06-13]. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1155/2012/843185>
  18. "Canadian Solar" internetinis puslapis [žiūrėta 2020-06-13]. Prieiga per internetą: [https://www.canadiansolar.com/wp-content/uploads/2020/05/Canadian\\_Solar-Datasheet-KuPower\\_CS3K-MS\\_EN.pdf](https://www.canadiansolar.com/wp-content/uploads/2020/05/Canadian_Solar-Datasheet-KuPower_CS3K-MS_EN.pdf)
  19. S. Armstrong, W.G. Hurley "A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions", Power Electronics Research Centre, Electrical and Electronic Engineering, National University of Ireland, Galway, Ireland , [žiūrėta 2020-06-13]. Prieiga per internetą : <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.03.012>
  20. F.P. Incropera, D.P. DeWitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer. JohnWiley & Sons, 2002., [žiūrėta 2020-06-13]. Prieiga per internetą: <https://uotechnology.edu.iq/dep-materials/lecture/secondclass/HeatTransfer&FluidBOOKFrankPIncroperaFundamentalsofheatandmasstransfer2007.pdf>
  21. .W. Churchill, "A comprehensive correlating equation for laminar, assisting,forced and free convection." *Journal of American Institute of Chemical Engineers* 23 (1) (1976) 10-16
  22. Nuri Gokmen, Weihao Hu, Peng Hou, Zhe Chen, Dezso Sera, Sergiu Spataru, "Investigation of wind speed cooling effect on PV panels in windy locations" [žiūrėta 2020-06-13]. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.017>
  23. Ahmad Vassel, Frantzis Iakovidis "The effect of wind direction on the performance of solar PV plants" [žiūrėta 2020-06-14]. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.09.077>
  24. Damon Waterworth, Alona Armstrong "Southerly winds increase the electricity generated by solar photovoltaic systems" [žiūrėta 2020-06-14]. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.03.085>
  25. Xydis George "The wind chill temperature effect on a large-scale PV plant—an exergy approach" [žiūrėta 2020-06-14]. Prieiga per internetą: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/pip.2247>
  26. V.Karthikeyan, Chatchai Sirisamphanwong, Sukruedee Sukchai, Sarat Kumar Sahoo, T.Wongwuttanasatian "Reducing PV module temperature with radiation based PV module incorporating composite phase change material" [žiūrėta 2020-06-14]. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101346>
  27. Linus Idoko, Olimpo Anaya-Lara, Alasdair McDonald "Enhancing PV modules efficiency and power output using multi-concept cooling technique" [žiūrėta 2020-06-14]. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2018.05.004>
  28. Autoriaus daryta nuotrauka.
  29. Internetinis Viasolis puslapis žiūrėta 2021-01-10]. Prieiga per internetą: [http://www.viasolis.eu/data/editable/downloads/SoliTek\\_Prime\\_framed\\_240-250\\_ENG.pdf](http://www.viasolis.eu/data/editable/downloads/SoliTek_Prime_framed_240-250_ENG.pdf)

30. SevenSensor internetinis puslapis [žiūrėta 2021-05-13]. Prieiga per internetą: <https://www.sevensensor.com/sma-weather-station>
31. Korax Solar internetinis puslapis [žiūrėta 2021-01-10]. Prieiga per internetą: <http://www.koraxsolar.com/letoltes/inverterek/adatlapok/SMA%20Tripower%205000-8000TL.pdf>
32. Ginlong/Alibaba internetinis puslapis [žiūrėta 2021-04-03]. Prieiga per internetą: [https://greefenergy.en.alibaba.com/product/60740848087-221695286/GCI\\_Inverter\\_Ginlong\\_Grid\\_Tie\\_Wind\\_Inverter\\_and\\_Solar\\_Inverter\\_3kw\\_5kw\\_10kw.html](https://greefenergy.en.alibaba.com/product/60740848087-221695286/GCI_Inverter_Ginlong_Grid_Tie_Wind_Inverter_and_Solar_Inverter_3kw_5kw_10kw.html)
33. “Metrel” internetinis puslapis [žiūrėta 2021-04-01]. Prieiga per internetą: <https://www.metrel.si/en/shop/PQA/mi-2892.html>
34. UAB “Elinta” internetinis puslapis [žiūrėta 2021-05-10]. Prieiga per internetą: <https://www.elintosms.lt/lt/prekiu-katalogas/energetinio-tinklo-analize-ir-energijos-apskaita-12/nesiojami-trifaziai-tinklo-kokybes-analizatoriai-47/metrel-mi-2892-power-master-advanced-a-klases-2601>
35. “TestequipmentHQ” internetinis puslapis [žiūrėta 2021-05-10]. Prieiga per internetą: <https://www.testequipmenthq.com/datasheets/CHAUVIN%20ARNOUX-CA8335-Datasheet.pdf>
36. “Chauvin Arnoux” internetinis puslapis [žiūrėta 2021-05-10]. Prieiga per internetą: <https://www.chauvin-arnoux.com/sites/default/files/HLHBENXL.PDF>
37. Oliveira, Fernando & Oliveira da Silva, Sergio & Durand, Fabio & Sampaio, Leonardo. (2015). “Application of PSO method for maximum power point extraction in photovoltaic systems under partial shading conditions” [žiūrėta 2021-05-16]. Prieiga per internetą: [https://www.researchgate.net/publication/304410636\\_Application\\_of\\_PSO\\_method\\_for\\_maximum\\_power\\_point\\_extraction\\_in\\_photovoltaic\\_systems\\_under\\_partial\\_shading\\_conditions](https://www.researchgate.net/publication/304410636_Application_of_PSO_method_for_maximum_power_point_extraction_in_photovoltaic_systems_under_partial_shading_conditions)
38. “Matlab” programinės įrangos pavyzdinis programinis kodas
39. “SMA” internetinis puslapis [žiūrėta 2021-05-15]. Prieiga per internetą: <https://www.sma.de/fileadmin/content/global/specials/documents/falcon-installer/SB30-50-DEN1708-V22web.pdf>