



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

# **Šešėliuojamų fotovoltinių modulių su šuntavimo diodais ir galios optimizatoriais įtakos generacijai tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Audrius Gimžauskas**

Projekto autorius

**Doc. Tomas Deveikis**

Vadovas

---

**Kaunas, 2024**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

# **Šešėliuojamų fotovoltinių modulių su šuntavimo diodais ir galios optimizatoriais įtakos generacijai tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

---

**Audrius Gimžauskas**

Projekto autorius

**Doc. Tomas Deveikis**

Vadovas

**Prof. Robertas Lukočius**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2024**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

Audrius Gimžauskas

## **Šešėliuojamų fotovoltinių modulių su šuntavimo diodais ir galios optimizatoriais įtakos generacijai 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.

Audrius Gimžauskas

*Patvirtinta elektroniniu būdu*

Gimžauskas, Audrius. Šešėliuojamų fotovoltinių modulių su šuntavimo diodais ir galios optimizatoriais įtakos generacijai tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Tomas Deveikis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: saulės elektrinė, fotovoltinis modulis, šuntavimo diodas, optimizatorius.

Kaunas, 2024. 53 p.

## Santrauka

Šiame magistriniame darbe nagrinėjama skirtingais šešėliais veikiamų fotovoltinių modulių su šuntavimo diodais (angl. *bypass diodes*) ir galios optimizatoriais įtaka generacijai ir kitiems elektriniams parametrams.

Teorinėje dalyje apžvelgiama fotovoltinių modulių bei galios optimizatorių architektūra bei veikimo principas. Aprašyti populiariausių galios optimizatorių gamintojai ir jų gaminiai. Remiantis moksliniais straipsniais aprašyti atvejai esant šešėliavimo sąlygoms moduliams be šuntavimo diodų, su šuntavimo diodais ir su galios optimizatoriais. Matematiškai aprašyti modulių parametrų pokyčiai krintant šešėliams ant FV modulių, taip pat matematiškai aprašytas galios optimizatorių ir šuntavimo diodų matematinis modelis. Išnagrinėtos teorinės PV ir IV kreivės krintant ant fotovoltinių modulių be šuntavimo diodų, su šuntavimo diodais ir su galios optimizatoriais.

Tiriamajoje dalyje atliktas modeliavimas *PVSOL Premium 2024* programiniu paketu. Sukurtas modelis 10-čiai įvairių šešėliavimo atvejų tyrimui. Sumodeliavus gautos FV modulių su šuntavimo diodais ir galios optimizatoriais PV (galios) ir IV (voltamperinės) charakteristikos. Palyginta nekintančių šešėlių *DC* generacija. Taip pat sumodeliuotas realaus kintančio šešėlio atvejis ir palyginta *DC* elektros energijos generacija dienos ir visų metų pjūviuose, siekiant įvertinti pagamintos elektros energijos nuostolius dėl neigiamos šešėliavimo įtakos.

Tiriamajoje dalyje taip pat atliktas tyrimas su realia 29,7 kW saulės elektrine. Tirta kaip kinta FV modulių elektriniai parametrai esant skirtingiems šešėliavimo atvejams. Tirti variantai su galios optimizatoriais ir be optimizatorių siekiant iširti šuntavimo diodų veikimą. Taip pat apskaičiuota ir palyginta generuojama *DC* galia esant skirtingiems šešėliavimo atvejams. Atliekant tyrimą pastebėta, jog FV modulyje esantys šuntavimo diodai nesuveikia esant siauriems šešėliams (iki 1 cm pločio), todėl atlikti papildomai bandymai siekiant iširti šuntavimo diodų ir galios optimizatorių veikimą krintant siauriems šešėliams ant fotovoltinių modulių.

Gimžauskas, Audrius. Investigation of Influence of Shaded Photovoltaic Modules with Shunt Diodes and Power Optimizers on Generation. 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 (study field group): electrical engineering, engineering science.

Keywords: solar power plant, photovoltaic module, bypass diode, optimizer.

Kaunas, 2024. 53 p.

### **Summary**

This master thesis investigates the impact of PV modules with bypass (shunt) diodes and power optimizers under different shading conditions on generation and other electrical parameters.

The theoretical part of the study provides an overview of the architecture and the principle of operation of PV modules and power optimizers. The most popular manufacturers of power optimizers and their products are described. Based on scientific papers, cases of shading conditions for modules without bypass diodes, with bypass diodes and with power optimizers are described. The changes of module parameters under shading on PV modules are mathematically described, as well as the mathematical model of power optimizers and bypass diodes. The theoretical PV and IV curves for shadow incidence on PV modules without bypass diodes, with bypass diodes and with power optimizers are analyzed.

The simulation part of the study was carried out using PVSOL Premium 2024 software package. The model was developed for 10 different shadowing cases. The simulation resulted in PV and IV characteristics of PV modules with bypass diodes and power optimizers. The DC generation of fixed shading was compared. A realistic case of variable shading has also been simulated and the DC power generation has been compared in daily and full year sections to assess the loss of generated electricity due to the negative influence of shading.

In the investigative part, a study on a real solar power plant of 29,7 kW was also carried out. The variation of the electrical parameters of the PV modules under different shading cases was investigated. Variants with and without power optimizers were investigated in order to study the performance of bypass diodes. The generated DC power under different shading cases was also calculated and compared. During the study it was observed that the bypass diodes in the PV module do not work in the presence of narrow shadows (up to 1 cm wide), so additional tests were carried out to investigate the performance of the bypass diodes and the power optimizers in the presence of narrow shadows falling on the PV modules.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>7</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>8</b>
<b>Santrumpų ir terminų sąrašas .....</b>	<b>10</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>11</b>
<b>1. Teorinė dalis.....</b>	<b>12</b>
1.1. Fotovoltinių modulių veikimo principas .....	12
1.2. Fotovoltinių modulių tipai .....	15
1.2.1. Monokristaliniai moduliai .....	15
1.2.2. Polikristaliniai moduliai .....	16
1.3. Bendros žinios apie šuntavimo diodus .....	16
1.4. Bendros žinios apie galios optimizatorius.....	17
1.5. Šešėlių įtaka fotovoltinio modulio parametrms .....	23
1.5.1. Fotovoltinis modulis be šuntavimo diodų ir be galios optimizatoriaus.....	24
1.5.2. Fotovoltinis modulis su 3 šuntavimo diodais .....	25
1.5.3. Fotovoltinis modulis su galios optimizatoriumi .....	29
<b>2. Tiriamoji dalis.....</b>	<b>31</b>
2.1. Modeliavimas .....	31
2.1.1. 10-ties stacionarių šešėlių atvejų modeliavimas.....	32
2.1.2. Kintančio šešėlio atvejo modeliavimas .....	39
2.2. Tyrimas.....	44
2.2.1. 10-ties šešėliavimo variantų tyrimas .....	45
2.2.2. Papildomi bandymai su siaurais šešėliais (11-14 šešėliavimo variantai).....	48
<b>Išvados .....</b>	<b>50</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>51</b>
<b>Priedai.....</b>	<b>54</b>
1 priedas. Tiriamo fotovoltinio modulio Swiss Solar IBEX 144MHC-COSMOS 450 Wp [39] techninė specifikacija; .....	54
2 priedas. Tiriamo galios optimizatoriaus Tigo TS4-A-0 700W [40] techninė specifikacija; .....	56

## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> Realus šešėlio modeliavimo rezultatai ( $\Delta$ , % atskaitos taškas - nesant šešėliui (be optimizatorių)).....	41
<b>2 lentelė.</b> Realus šešėlio modeliavimo rezultatai ( $\Delta$ , % atskaitos taškas - nesant šešėliui (be optimizatorių)).....	43
<b>3 lentelė.</b> 1-10 šešėliavimo tyrimų rezultatai .....	46
<b>4 lentelė.</b> 11-14 šešėliavimo atvejų tyrimų rezultatai.....	49

## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b> Puslaidininkų draudžiamosios juostos dydžiai [7] .....	12
<b>2 pav.</b> Fotovoltinės celės pjūvis [7] .....	13
<b>3 pav.</b> Fotovoltinio modulio charakteristikų priklausomybė nuo jo parametrų [7] .....	13
<b>4 pav.</b> Nuosekliai sujungtų fotovoltinių modulių schema ir voltamperinė charakteristika [7] .....	14
<b>5 pav.</b> Lygiagrečiai sujungtų fotovoltinių modulių schema ir voltamperinė charakteristika [7] .....	15
<b>6 pav.</b> Fotovoltinis modulis su 3 šuntavimo diodais ir viena šešėliuojama cele [17] .....	16
<b>7 pav.</b> <i>Buck DC/DC</i> konverterio schema [29] .....	18
<b>8 pav.</b> <i>Buck DC/DC</i> konverterio įėjimo ir išėjimo voltamperinės ir PV kreivės [29] .....	18
<b>9 pav.</b> <i>Boost DC/DC</i> konverterio schema [29] .....	19
<b>10 pav.</b> <i>Boost DC/DC</i> konverterio įėjimo ir išėjimo voltamperinės ir PV kreivės [29] .....	19
<b>11 pav.</b> <i>Buck-boost DC/DC</i> konverterio schema [29] .....	20
<b>12 pav.</b> <i>Buck-boost DC/DC</i> konverterio įėjimo ir išėjimo voltamperinės ir PV kreivės [29] .....	20
<b>13 pav.</b> Saulės elektrinės su žeminančiais galios optimizatoriais schema [32] .....	21
<b>14 pav.</b> Viršuje – galios optimizatoriaus schema, žemiau – <i>DC/DC</i> keitiklio schema [32] .....	22
<b>15 pav.</b> 50 % šešėliuojamų celių pavyzdys [5] .....	23
<b>16 pav.</b> Celės ekvivalentinė schema [34] .....	24
<b>17 pav.</b> Fotovoltinio modulių modulyno be šuntavimo diodų PV charakteristika [34] .....	25
<b>18 pav.</b> Fotovoltinis modulis su n celių. Kairiau – visos celės apšviestos saulės, dešiniau – viena celė šešėliuojama [4] .....	26
<b>19 pav.</b> Šešėliuojamos vienos iš n celių fotovoltinio modulio įtampos kritimo palyginimas su nešešėliuojamo fotovoltinio modulio įtampa [4] .....	27
<b>20 pav.</b> Fotovoltinio modulio voltamperinės charakteristikos ir PV kreivės. Pirmu atveju – šešėliuojama fotovoltinio modulio celė be šuntavimo diodų, antru atveju – šešėliuojama celė ir vienas iš trijų šuntavimo diodų suveikia [18] .....	28
<b>21 pav.</b> Fotovoltinio modulio voltamperinės charakteristikos ir PV kreivės. Raudona kreivė – atvejis, kai modulio su galios optimizatoriumi celė nešešėliuojama, mėlyna – atvejis, kai šešėliuojama fotovoltinio be optimizatoriaus viena celė, žalia – atvejis, kai šešėliuojama modulio su galios optimizatoriumi viena celė [37] .....	29
<b>22 pav.</b> Viršuje – bandomos saulės elektrinės nuotrauka, apačioje – <i>DC</i> galios generavimo grafikas. Mėlyna kreivė – modulynas su optimizatoriais, rožinė – be optimizatorių [37] .....	30
<b>23 pav.</b> <i>PVSOL Premium 2024</i> programinio paketo aplinka [38] .....	31
<b>24 pav.</b> <i>PVSOL Premium 2024</i> programinio paketo vizualinis šešėliavimo įvertinimas [38] .....	32
<b>25 pav.</b> Tiriami šešėliavimo atvejai (1-10 variantai) .....	32
<b>26 pav.</b> Saulės elektrinės modelis <i>PVSOL Premium 2024</i> programinio paketo aplinkoje .....	33
<b>27 pav.</b> 10 skirtingų šešėliavimo variantų modeliavimo rezultatai (PV ir IV kreivės) .....	36
<b>28 pav.</b> 10 skirtingų šešėliavimo variantų be optimizatorių modeliavimo rezultatai (PV ir IV kreivės) .....	37
<b>29 pav.</b> 10 skirtingų šešėliavimo variantų su optimizatoriais modeliavimo rezultatai (PV ir IV kreivės) .....	38
<b>30 pav.</b> Pagaminta el. energija per metus kWh/kW esant skirtingiems šešėliavimo atvejams .....	39
<b>31 pav.</b> Realus šešėliavimo atvejo modelis .....	40
<b>32 pav.</b> Realių šešėliavimo atveju per parą sugeneruota <i>DC</i> elektros energija .....	42
<b>33 pav.</b> Realių šešėliavimo atveju per metus sugeneruota <i>DC</i> elektros energija .....	43
<b>34 pav.</b> Tiriami 29,7 kW saulės elektrinė .....	44

<b>35 pav.</b> Tyrimo atlikimas .....	45
<b>36 pav.</b> Momentinės fotovoltinio modulio generuojamos <i>DC</i> galios palyginimas esant skirtingiems šėšeliams .....	47
<b>37 pav.</b> Tiriama šėšeliavimo atvejai (11-14 variantai) .....	48

## Santrumpų ir terminų sąrašas

### Santrumpos:

SE – saulės elektrinė;

FV – fotovoltinis modulis;

DC (*Direct Current*) – nuolatinė srovė;

AC (*Alternating Current*) – kintama srovė;

MPP (*Maximum Power Point*) – maksimalus galios taškas;

MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) – maksimalaus galios taško sekimas;

PV kreivė – galios (P) priklausomybės nuo įtampos (V) kreivė;

IV kreivė – srovės (I) priklausomybės nuo įtampos (V) kreivė.

## Įvadas

Vis opesne pasaulio problema tampa globalinis atšilimas. Viena pagrindinių jo priežasčių – naftos produktų, kieto kuro deginimas šilumos ir elektros energijos gamybai [1]. Deginant minėtus produktus į aplinką išskiriama daug šiltnamio efektą sukeliančių dujų. Vienas iš sprendimo būdų šiai problemai yra atsinaujinančiosios energetikos plėtra. Vienas lengviausiai prieinamų atsinaujinančiosios energetikos išteklių tiek buitiniams gyventojams, tiek verslui – saulės energetika.

Energijos gamyba iš saulės neteršia gamtos. Nėgana to, ten, kur saulės apšvietimas, saulės elektrinių vystytojai muša žemiausios kainos rekordus. Saulės fotovoltiniai moduliai stipriai patobulėjo ir jų gamyba neįtikėtinais tempais [2, 3].

Saulės energetinėje sistemoje, išgaunant elektros energiją, naudojamos įvairios fotovoltinės elektrinių sistemos. Saulės elektrinė – tai elektros įrenginių visuma, kurios pagrindiniai komponentai yra fotovoltiniai moduliai, įtampos keitiklis (*inverteris*) bei papildomi sistemos komponentai, skirti padidinti saulės elektrinių efektyvumą, o taip pat įrenginiai, skirti stebėti generuojamą elektros energijos kiekį bei kitus parametrus [4, 5].

Saulės elektrinės efektyviausiai generuoja elektros energiją saulei šviečiant statmenai į fotovoltinį modulį. Viena didžiausių ir dažnai sutinkama problema - dėl pašalinių objektų, pvz. kaminų, stogų, stulpų, medžių, ar nuo pačių modulių krentantys šešėliai ant modulių mažina elektrinės generuojamą galią. Tam, kad šešėlių įtaka būtų sumažinama, į fotovoltinius modulius montuojami šuntavimo diodai, kurių pagalba srovė apeina šešėliuojamas celes ir nesumažina visos nuosekliai sujungtų modulių grupės srovės [6]. Taip pat papildomai montuojami galios optimizatoriai, kurių pagalba maksimalios galios taškas sekamas nepriklausomai kiekvienam fotovoltiniam moduliui.

**Darbo tikslas:** ištirti ir palyginti šešėlių veikiamų fotovoltinių modulių elektrinius parametrus, kuomet moduliai yra su šuntavimo diodais ir galios optimizatoriais.

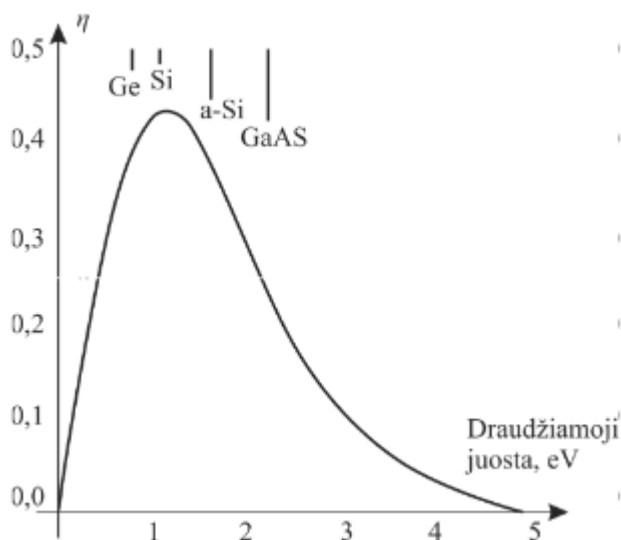
### Darbo uždaviniai:

1. Sukurti modelį *PVSOL Premium 2024* programiniu paketu ir atliekant modeliavimą ištirti skirtingų šešėlių tipų įtaką fotovoltinių modulių elektriniams parametrams be ir su galios optimizatoriais;
2. Sukurti modelį *PVSOL Premium 2024* programiniu paketu ir atliekant modeliavimą ištirti realaus kintančio šešėlio įtaką fotovoltinių modulių generuojamai DC galiai be ir su galios optimizatoriais;
3. Atliekant realius bandymus ištirti skirtingų šešėlių tipų įtaką fotovoltinių modulių elektriniams parametrams be ir su galios optimizatoriais;
4. Remiantis modeliavimo ir realių bandymų rezultatais palyginti fotovoltinių modulių šuntavimo diodų ir galios optimizatorių efektyvumą krintant šešėliams ant fotovoltinių modulių.

## 1. Teorinė dalis

### 1.1. Fotovoltinių modulių veikimo principas

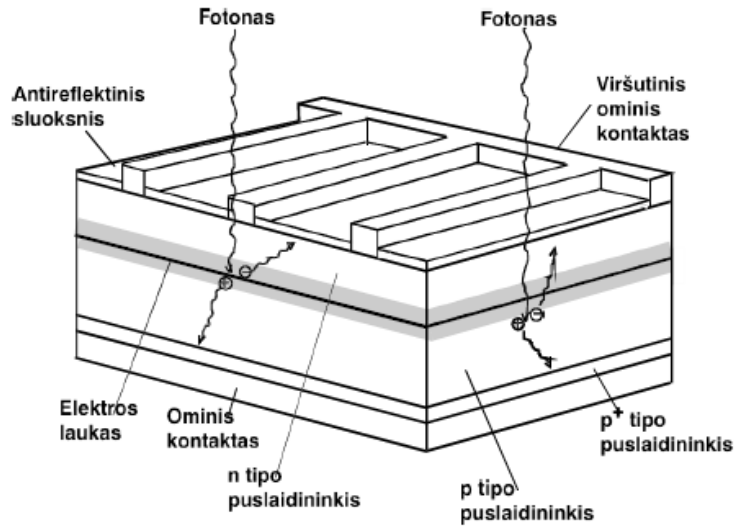
Fotovoltinė celė – puslaidininkinis įtaisas, kuris saulės šviesos energiją paverčia elektros energija. Fizikinis reiškinys, apibūdinantis šią reakciją, vadinamas - fotoelektriniu efektu. Fotoelektrinį efektą apibūdina silicio pavyzdys. Silicio atomą sudaro 14 protonų ir 14 elektronų. Valentiniam silicio sluoksnyje yra išsidėstę 4 elektronai. Silicio fotokristalo formavimosi metu atomai savaiame susitapatina, taip sudarydami kovalentines jungtis su šalia esančiais 4 atomais. Visų silicio elementų išorinis sluoksnis tampa visiškai užpildytu, todėl atomas pasidaro stabilios būsenos. Jie neturi galimybės klaidžioti tarp atomų, nes yra susieti tarpusavyje. Tam kad elektronai pradėtų judėti nuo atomo prie atomo jiems yra reikalingas papildomas energijos kiekis. Gavus pakankamą energijos kiekį elektronai peršoka į laidumo juostą. Valentinės ir laidumo juostos energijų skirtumas yra vadinamas draudžiamąja juosta. Draudžiamųjų juostų dydis tiesiogiai proporcingas fotovoltinio modulio tuščiosios veikos įtampai [7].



1 pav. Puslaidininkių draudžiamosios juostos dydžiai [7]

Fotoelektros elemento efektyvumas tiesiogiai priklauso nuo draudžiamosios juostos dydžio. Didesnė draudžiamoji juosta reiškia didesnę energijos kiekį, kuris reikalingas valentinius elektronus perkelti į laidumo juostą. Kiekvienas išspinduliuotas fotonas turi savo skirtingą energiją, todėl, jeigu išspinduliuoto fotono savitoji energija yra mažesnė nei draudžiamosios juostos dydis, elektronas negali peršokti iš valentinės juostos į laidumo juostą. Fotonas, kurio energija lygi puslaidininkinės draudžiamosios juostos dydžiui turi tikimybę išmušti elektroną iš valentinės juostos ir perkelti elektroną į laidumo juostą. Tačiau elektronui peršokus į laidumo juostą, jo buvusioje vietoje atsiranda skylė, nes toje vietoje lieka jungtis be vieno elektrono [7].

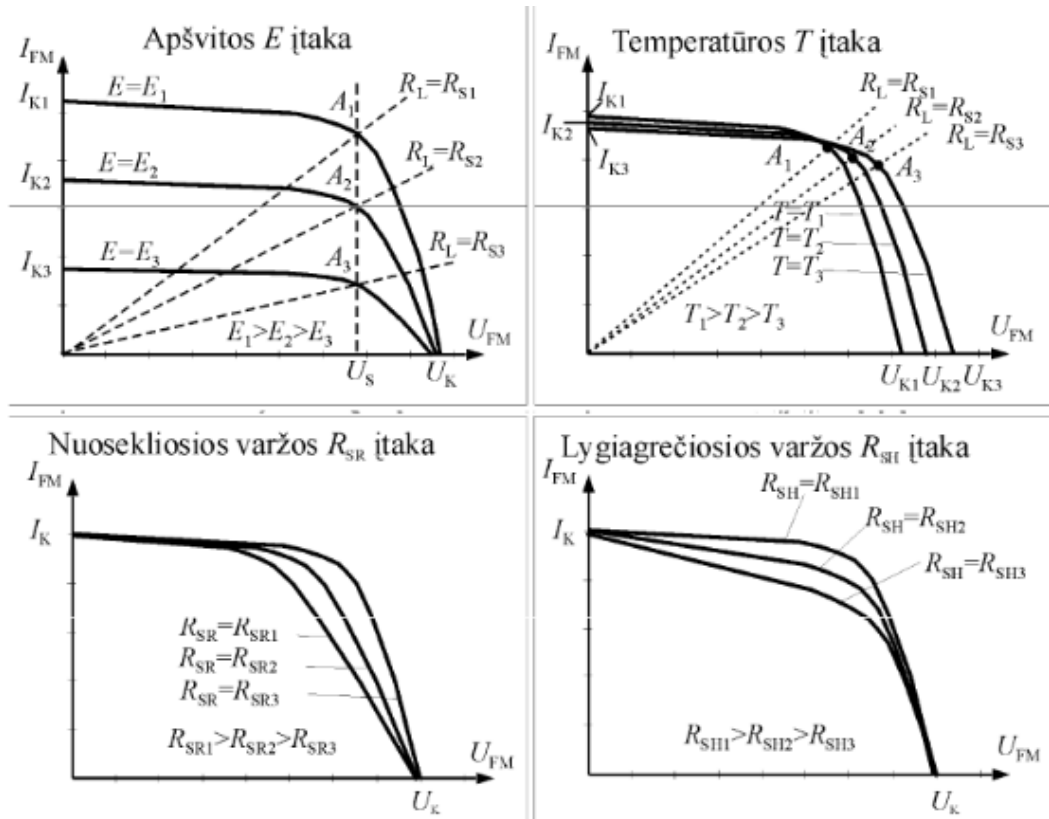
Saulės energetikoje viena iš dažniausiai naudojamų medžiagų yra legiruotas silicis. Jis gaunamas į skirtingas plokštelių puses įmaišius boro ir fosforo priemaišų. Po šios reakcijos susiformuoja *p-n* tipo sandūra, kuri užtikrina elektrinio lauko pastovumą. *P-n* sandūroje susidaręs elektrinis laukas elektronus ir skyles nukreipia atitinkamomis kryptimis, kurias sujungus į grandinę, elementu pradeda tekėti nuolatinė elektros srovė.



2 pav. Fotovoltinės celės pjūvis [7]

2 pav. pavaizduota viena celė. Fotovoltinį modulį sudaro daugybė nuosekliai ir lygiagrečiai sujungtų celių, kurios iš abiejų pusių yra uždengiamos stiklu arba stiklu ir plastiku.

Fotovoltinio modulio voltamperinės charakteristikos priklauso nuo išorinių ir vidinių parametru. Išoriniai - apšvita  $E$  ir temperatūra  $T$ , o vidiniai – lygiagrečioji varža  $R_{SH}$  ir nuoseklioji varža  $R_{SR}$ . Kai šie parametrai nekinta, modulio galia priklauso tik nuo apkrovos varžos  $R_L$ . 3 pav. pavaizduotos fotovoltinio modulio voltamperinės charakteristikos.



3 pav. Fotovoltinio modulio charakteristikų priklausomybė nuo jo parametru [7]

Fotovoltinio modulio voltamperinės charakteristikos turi tris būdingus taškus – trumpojo jungimo, tuščiosios veikos ir suderintojo režimo (didžiausios galios  $P_{max}$ ). Trumpai sujungtų fotovoltinių modulių įtampa lygi 0 V, o srovė lygi fotosrovei ir yra tiesiai proporcinga apšvitai. Tuščiosios veikos įtampa priklauso tik nuo  $p-n$  sandūros potencialinio barjero ir yra tiesiogiai proporcinga fotovoltinio modulio temperatūrai. [7]

Dažniausiai fotovoltiniai moduliai yra jungiami nuosekliai. Nuosekliai sujungti moduliai vadinami grupe (angl. *string*). Tokiu būdu sujungti fotovoltiniai moduliai pasiekia didesnę įtampą, o srovė išlieka lygi vieno modulio srovės dydžiui. Modulynas (angl. *array*) – lygiagrečiai sujungtos fotovoltinių modulių grupės. Pagrindiniai veiksniai, lemiantys tokios sistemos efektyvumą, yra apšvita ir temperatūra. Jei šie parametrai visus nuosekliai sujungtus fotovoltinius modulius veikia vienodai, sistema veikia efektyviai. Grupės srovės ir įtampos dydžius galima apskaičiuoti pagal žemiau pateiktas formules:

$$U_{gr} = U_{FVM1} + U_{FVM2} + \dots + U_{FVMi}; \quad (1)$$

čia:  $U_{gr}$  – nuosekliai į grupę sujungtų fotovoltinių modulių įtampa, V;

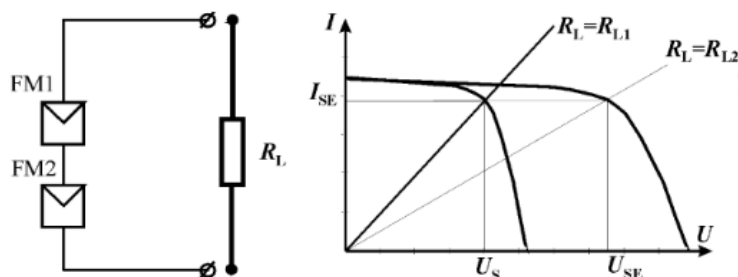
$U_{FVMi}$  – i-tojo fotovoltinio modulio įtampa, V.

$$I_{gr} = I_{FVM1} = I_{FVM2} = \dots = I_{FVMi}; \quad (2)$$

čia:  $I_{gr}$  – nuosekliai į grupę sujungtų fotovoltinių modulių srovė, A;

$I_{FVMi}$  – i-tojo fotovoltinio modulio srovė, A.

Didžiosios dalies populiariausių įtampos keitiklių, kurie jungiami tiesiogiai į 0,4 kV elektros tinklą, maksimalus galios taškas pasiekiamas prie 580-620 V įtampos, todėl modulių grupę įprastai sudaro 14-20 nuosekliai sujungtų fotovoltinių modulių.



**4 pav.** Nuosekliai sujungtų fotovoltinių modulių schema ir voltamperinė charakteristika [7]

Didelėse saulės elektrinėse ar jų masyvuose fotovoltiniai moduliai yra jungiami lygiagrečiai. Dažnai pasitaiko, kad fotovoltiniai moduliai pradžioje yra jungiami į atskiras eiles nuosekliai, o paskui eilės jungiamos lygiagrečiai, norint išlaikyti tą pačią įtampą, o srovę pakelti. Lygiagretaus fotovoltinių modulių įtampos ir srovės dydis apskaičiuojamas pagal žemiau pateikiamas formules:

$$U_{gr} = U_{FVM1} = U_{FVM2} = \dots = U_{FVMi}; \quad (3)$$

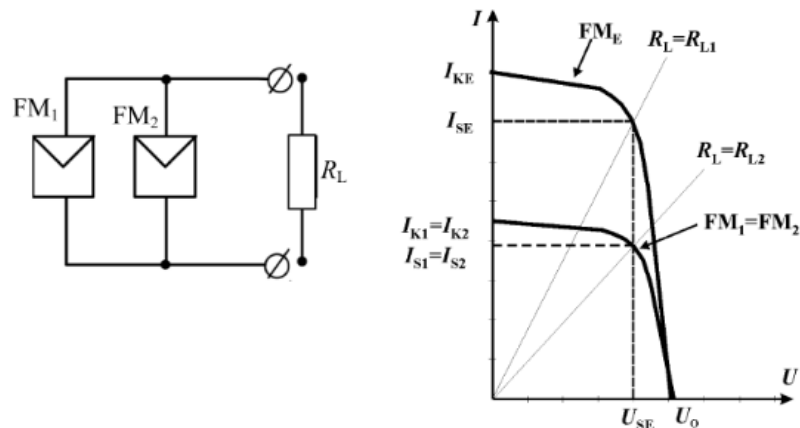
čia:  $U_{gr}$  – lygiagrečiai sujungtų fotovoltinių modulių įtampa, V;

$U_{FVMi}$  – i-tojo fotovoltinio modulio įtampa, V.

$$I_{gr} = I_{FVM1} + I_{FVM2} + \dots + I_{FVMi}; \quad (4)$$

čia:  $I_{gr}$  – lygiagrečiai sujungtų fotovoltinių modulių srovė, A;

$I_{FVMi}$  – i-tojo fotovoltinio modulio srovė, A.



**5 pav.** Lygiagrečiai sujungtų fotovoltinių modulių schema ir voltamperinė charakteristika [7]

Sujungus fotovoltinius modulius nuosekliai, grupės išėjimo įtampa ir galia, lyginant su vienu modulių, padidės tiek kartų, kiek bus į grandinę nuosekliai sujungta modulių. Nominalioji visos grupės srovė liks ta pati, kaip ir vieno modulio, tačiau tik tada, kai visi moduliai yra identiški ir sumontuoti vienodomis sąlygomis.

Sujungus fotovoltinius modulius lygiagrečiai, grupės galia ir srovė bus didesnė už vieno modulio tiek kartų, kiek modulių sujungta lygiagrečiai, nominalioji įtampa liks tokia pat, kaip ir vieno modulio.

## 1.2. Fotovoltinių modulių tipai

Šiai dienai rinkoje yra monokristalinių, polikristalinių, amorfinio silicio ir perovskito modulių [8, 10]. Vis tik, populiariausi ir labiausiai naudojami yra polikristaliniai (daugiausia iki 2015 metų) ir monokristaliniai (nuo 2015-2018 metų, priklausomai nuo regiono) [8, 9].

### 1.2.1. Monokristaliniai moduliai

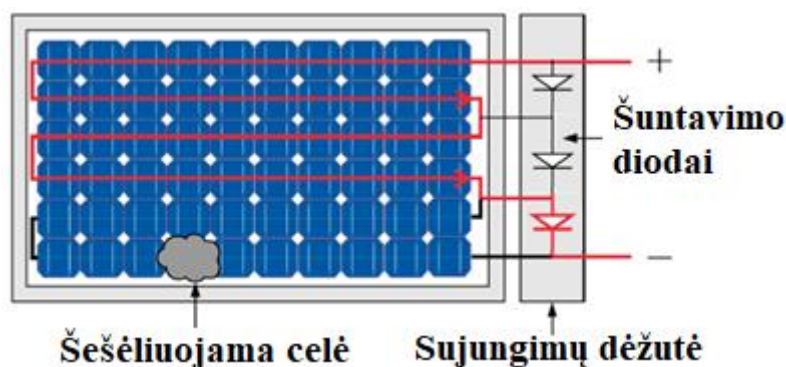
Monokristaliniai FV moduliai – moduliai, kurių celės yra išlietos iš vientiso silicio bloko. Iš šio bloko yra išpjaustomos plonos silicio plokštelės. Monokristaliniai moduliai turi vienalytės spalvos išvaizdą. Lyginant šiuos modulius su taip pat dažnai naudojama polikristalinių modulių technologija, didžiausias šių modulių privalumas yra didesnis efektyvumas, kuris paprastai svyruoja tarp 15-25 % [8, 9]. Monokristaliniai moduliai gaminami iki ~750 Wp galios [11]. Šio tipo modulių gamybai reikia sudėtingesnės ir brangesnės silicio apdirbimo technologijos, todėl šio tipo FV modulių kaina yra didesnė. Populiariausi moduliai rinkoje su pusinių celių (angl. *half-cut cell*) technologija. Pusinių celių technologijos pranašumai lyginant su pilnų celių moduliais yra mažesnė karštųjų taškų susidarymo tikimybė, mažesnė varža, didesnis celių efektyvumas ir mažesnis šuntavimo diodų kaitimas [12].

### 1.2.2. Polikristaliniai moduliai

Polikristaliniai FV moduliai – moduliai, kurių celės, priešingai nei monokristalinių modulių atveju, yra išpjauštos iš silicio bloko, kuris yra sulydomas iš skirtingų silicio kristalų. Kadangi sulydant skirtingus kristalus blokas tampa netolygus, šių celių efektyvumas yra mažesnis, kuris paprastai svyruoja tarp 13-20 % [8]. Polikristaliniai moduliai gaminami iki ~350 Wp galios. Šios technologijos modulių gamyba reikalauja pigesnio silicio apdirbimo, todėl šių modulių kaina yra mažesnė.

### 1.3. Bendros žinios apie šuntavimo diodus

Fotovoltinių modulių gamintojai, siekdami sumažinti neigiamą šešėliavimo įtaką fotovoltiniams moduliams, į juos montuoja vieną ar daugiau šuntavimo diodų (angl. *bypass diode*) [6, 13, 14]. Šiuo metu gaminamuose moduluose dažniausiai būna 3 šuntavimo diodai [15, 16]. Šuntavimo diodai yra sujungiami lygiagrečiai tarp celių grupių. 6 pav. nagrinėjamas atvejis, kuomet fotovoltinį modulį sudaro 60 celių, kurios yra padalintos po 20 celių į 3 grupes. Prie kiekvienos iš 20 celių grupių yra prijungtas šuntavimo diodas. Šuntavimo diodai yra montuojami jungimo dėžutėje (angl. *junction box*), apatinėje fotovoltinio modulio pusėje. Fotovoltiniai moduliai su pusinėmis celėmis turi 3 jungimo dėžutes.



6 pav. Fotovoltinis modulis su 3 šuntavimo diodais ir viena šešėliuojama cele [17]

Jeigu viena celė šešėliuojama, akimirksniu atsidarys šuntavimo diodas ir tekanti srovė apeis visą celių grupę per diodą, kaip matyti 6 pav. Kai celė nebebus šešėliuojama, diodas užsidarys ir srovė tekės per celių grupę, t.y. modulis dirbs įprastiniu režimu. Net ir krentant šešėliui ant vienos celės, kitos dvi celių grupės nebus paveikiamos ir dirbs normaliu režimu.

Kai šuntavimo diodas pradeda veikti, neišvengiamai krenta įtampa, diodas pradeda kaisti ir vartoti generuojamą energiją. Todėl šuntavimo diodų veikimas mažina bendrą fotovoltinių modulių generuojamą galią. Suveikus diodui, modulio generuojama srovė nepasikeičia. Net ir suveikus vienam iš trijų diodų fotovoltiniame modulyje, kiti grupėje nuosekliai sujungti fotovoltiniai moduliai dirba įprastai ir nėra paveikiami.

Net ir suveikus vienam iš trijų šuntavimo diodui, maksimalus galios taškas gali būti pasiektas didesnis, nei moduliui dirbant normaliu režimu. Šiuo atveju šuntavimo diodas sukuria daug vietinių maksimalių galios taškų, kurie apsunkina maksimalaus galios taško sekimo moduliui įtampos keitiklyje rasti maksimalų galios tašką (angl. *MPP – Maximum Power Point*) [18]. Todėl fotovoltinio modulio su šešėliuojama cele voltamperinės charakteristikos kreivės iškraipymas gali vesti link klaidų ieškant maksimalaus galios taško.

Fotovoltinių modulių su šuntavimo diodais konfigūracija turi įtakos galimam karštojo taško (angl. *hot-spot*) susiformavimo eliminavimui [19, 20, 21]. Karštasis taškas tai susiformavęs aukštesnės temperatūros plotas celėje, ant kurios krenta šešėlis. Karštasis taškas susiformuoja, nes šešėliuojama celė pradeda veikti kaip rezistorius, kuris vartoja energiją ir šyla. Šuntavimo diodai apsaugo fotovoltinį modulį nuo karštųjų taškų susiformavimo. Tačiau, kartais šuntavimo diodas gali nesuveikti ir atsiradęs karštasis taškas gali pažeisti celę ar fotovoltinio modulio stiklą.

#### 1.4. Bendros žinios apie galios optimizatorius

Grupėse fotovoltiniai moduliai jungiami nuosekliai, o tai reiškia, kad vienam moduliui praradus efektyvumą, visos eilės moduliai dirbs mažiausiai elektros energijos gaminančio modulio efektyvumu. Optimizatoriai leidžia optimizuoti ir stebėti kiekvieno atskiro saulės fotovoltinio modulio energijos gamybą [22, 23]. Optimizatoriai naudojami krentant šešėliams ant modulių arba esant skirtingoms modulių montavimo aplinkybėms, pvz. norint sumontuoti fotovoltinius modulius ant trijų skirtingomis pasaulio kryptimis orientuotų šlaitų, o turimas įtampos keitiklis turi tik 2 maksimalios galios taško sekimo modulius (angl. *MPPT – Maximum Power Point Tracker*) [24]. Tokiu atveju bent į vieną *MPPT* jungiamų modulių grupės turi būti su optimizatoriais. Galios optimizatoriai turi galimybę naudoti *MPPT* esant žemesnei įtampai, o tai reiškia, kad jie seka fotovoltinio modulio didžiausią galios tašką, net ir esant dideliame šešėliavimui. Fotovoltinių modulių optimizatoriai jungiami į vieną grandinę, kuri prijungiama prie keitiklio.

Optimizatoriai kiekvieno modulio išėjimo įtampą optimizuoja atskirai ir tuomet siunčia į įtampos keitiklį, kuriame nuolatinės srovės ir įtampos dydžiai konvertuojami į kintamos srovės ir įtampos dydžius. Visgi, optimizatoriai yra brangūs elektronikos įrenginiai, kurie padidina gedimo riziką, dėl didesnio kiekio elektronikos komponentų [25, 26]. Optimizatorių integravimas elektrinėse padeda sumažinti galios nuostolius ir padidinti efektyvumą.

Fotovoltiniai moduliai įprastai į grupę jungiami nuosekliai siekiant padidinti grupės įtampą, o srovę palaikyti lygią vieno modulio srovei. Krentant šešėliui bent ant dalies vieno iš grupėje esančių fotovoltinių modulių, generuojama galia sumažės. Generuojama galia sumažės ne tik to modulio, kuris yra veikiamas šešėlio, bet ir visos grupės modulių, t.y. visos grupės moduliai veiks kaip prasčiausiai generuojantis modulis grupėje. Tokiu atveju optimizatoriai gali eliminuoti neigiamą įtaką likusiems grupės moduliams.

Šiuo metu populiariausi rinkoje esantys galios optimizatoriai [27, 28]:

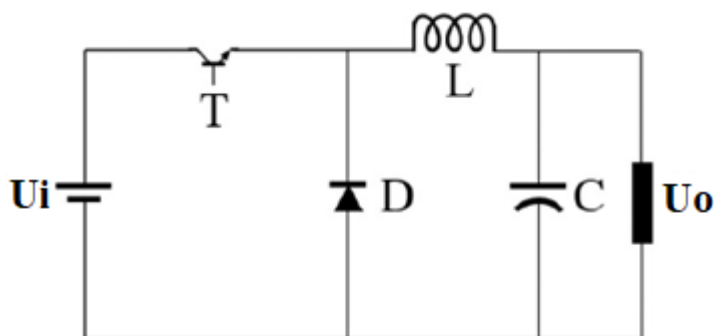
- *Tigo Energy*. Fotovoltinių modulių optimizavimo, stebėjimo ir staigaus išjungimo įrenginiai. Populiariausias modelis *TS4-A-0 700 W* žeminantysis galios optimizatorius. Paprastai montuojamas ir suderinamas praktiškai su visais fotovoltiniais moduliais ir keitikliais. Lietuvoje užima didžiausią rinkos dalį.
- *SolarEdge Technologies*. Fotovoltinių modulių optimizavimo, stebėjimo ir staigaus išjungimo įrenginiai, esant avariniam režimui automatiškai sumažina fotovoltinių modulių grupės *DC* įtampą iki 1 V, siekiant apsaugoti aptarnaujantį personalą. Veikia tik su *SolarEdge* keitikliais. Lietuvoje užima nedidelę rinkos dalį.
- *Huawei*. Fotovoltinių modulių optimizavimo, stebėjimo ir staigaus išjungimo įrenginiai. Populiariausias modelis *SUN2000-450W-P*.

- *Solantra Semiconductor*. Fotovoltinių modulių optimizavimo, stebėjimo ir staigaus išjungimo įrenginiai.
- *Ferroamp*. Optimizatorius montuojamas ne vienam fotovoltiniam moduliui, o visai grupei (angl. *Solar String Optimizer*). Maksimali grupės galia iki 8 kW. Naudojamas su keitikliais, kurie neturi pakankamai *MPPT*.
- *Ampt*. Fotovoltinių modulių grupės optimizatorius. Naudojamas su keitikliais, kurie neturi pakankamai *MPPT*.
- *Alecon Systems*. Fotovoltinių modulių grupės arba modulyno optimizatorius. Naudojamas su keitikliais, kurie neturi pakankamai *MPPT*. Naudojami saulės elektrinių parkuose.

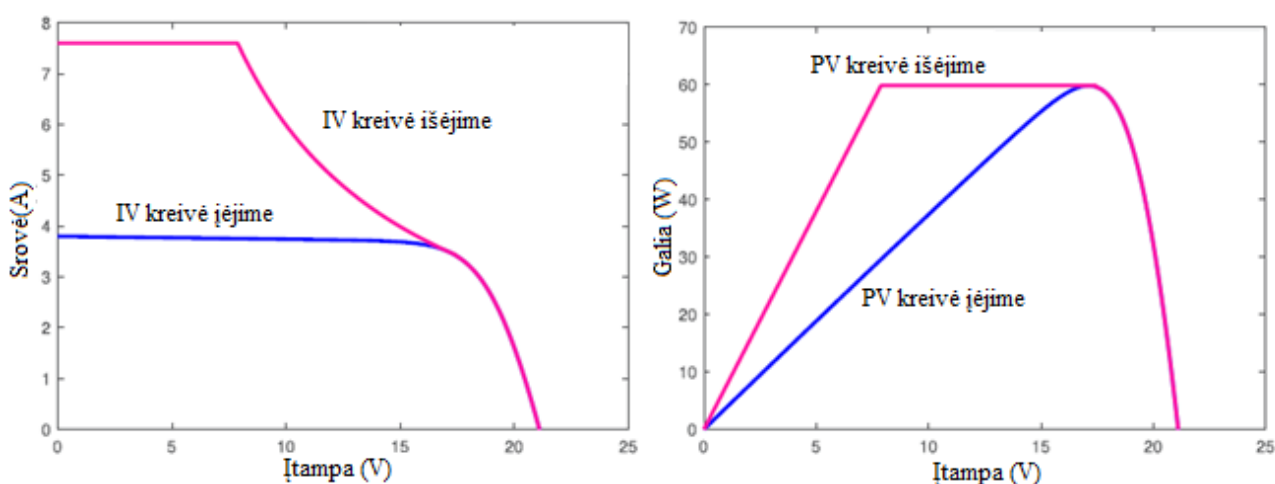
Galios optimizatorių tipai pagal įtampos valdymą:

1. Žeminantysis (angl. *buck* arba dar vadinama *step-down*) *DC/DC* konverteris

Žeminantysis *DC/DC* konverteris turi galimybę sumažinti modulio įtampą. Įprastai naudojami, kuomet modulių grupės įtampa yra per aukšta. Galios optimizatorius, ieškodamas *MPP* esant poreikiui sumažina grupės įtampą iki efektyviausio nominalo.



7 pav. Buck *DC/DC* konverterio schema [29]

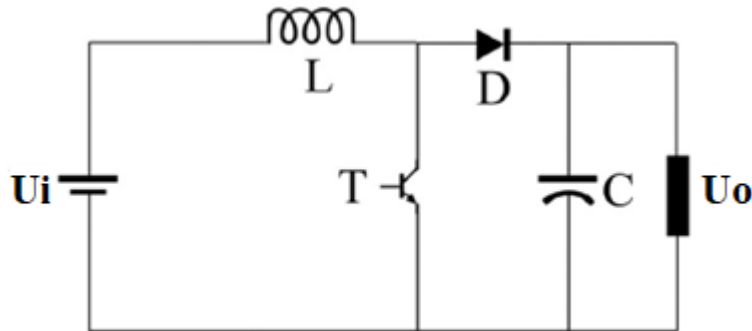


8 pav. Buck *DC/DC* konverterio įėjimo ir išėjimo voltamperinės ir PV kreivės [29]

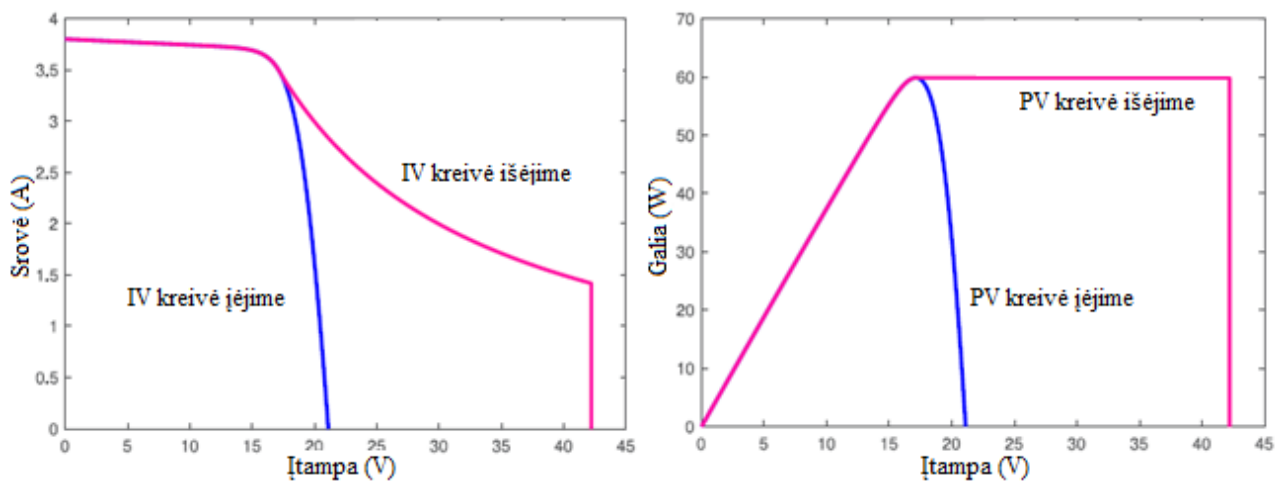
Iš 8 pav. matyti, jog konverterio išėjimo įtampa mažinama, srovė didinama.

## 2. Aukštinantysis (angl. *boost* arba dar vadinama *step-up*) DC/DC konverteris

Aukštinantysis DC/DC konverteris turi galimybę padidinti modulio įtampą. Įprastai naudojami, kuomet modulių grupės įtampa yra per žema. Galios optimizatorius, ieškodamas *MPP* esant poreikiui padidina grupės įtampą iki efektyviausio nominalo. Aukštinantieji galios optimizatoriai naudojami situacijose, kuomet fotovoltiniai moduliai yra veikiami šėšėlių ar nevienodų apšvietos sąlygų. Šio tipo galios optimizatorių gaminama daugiausiai.



9 pav. Boost DC/DC konverterio schema [29]

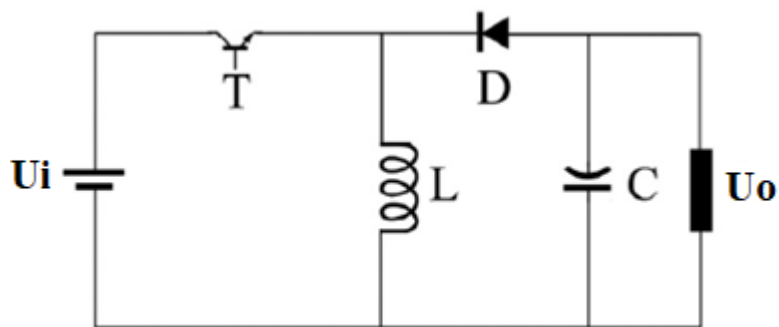


10 pav. Boost DC/DC konverterio įėjimo ir išėjimo voltamperinės ir PV kreivės [29]

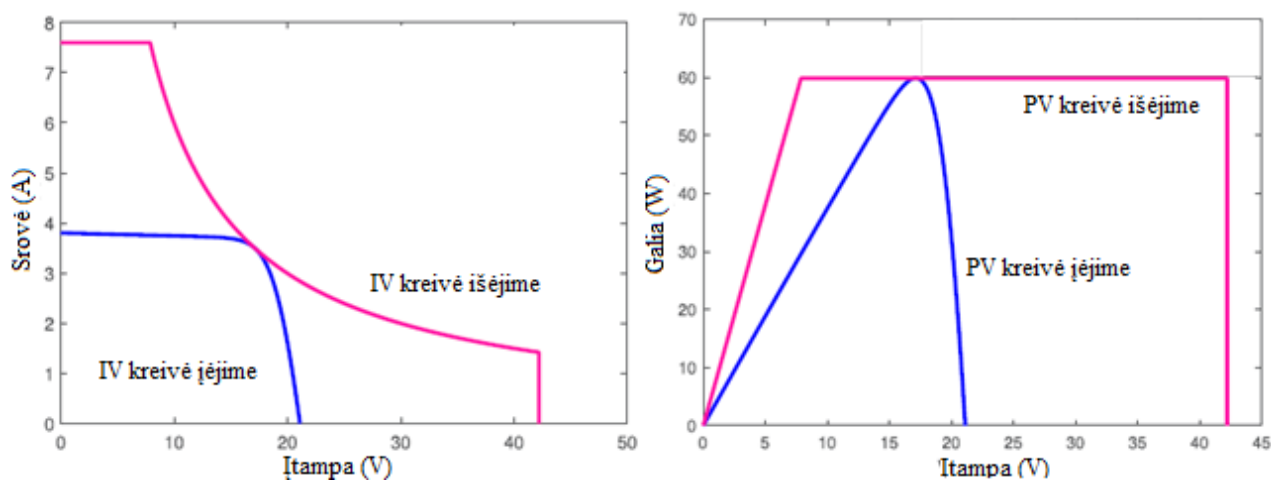
Iš 10 pav. matyti, jog konverterio išėjimo įtampa didinama.

## 3. Žeminantysis-aukštinantysis (angl. *buck-boost*) DC/DC konverteris

Žeminantysis-aukštinantysis DC/DC konverteris turi galimybę tiek sumažinti, tiek padidinti modulių įtampą. Dažniausiai galios optimizatorių gamintojų gaminamas optimizatorių tipas. Šio tipo optimizatoriai yra universalieji ir tinkami visomis sąlygomis – esant šėšėliams, nevienodoms modulių orientacijoms pasaulio kryptį atžvilgiu ar pasvirimo kampui.



11 pav. Buck-boost DC/DC konverterio schema [29]



12 pav. Buck-boost DC/DC konverterio įėjimo ir išėjimo voltamperinės ir PV kreivės [29]

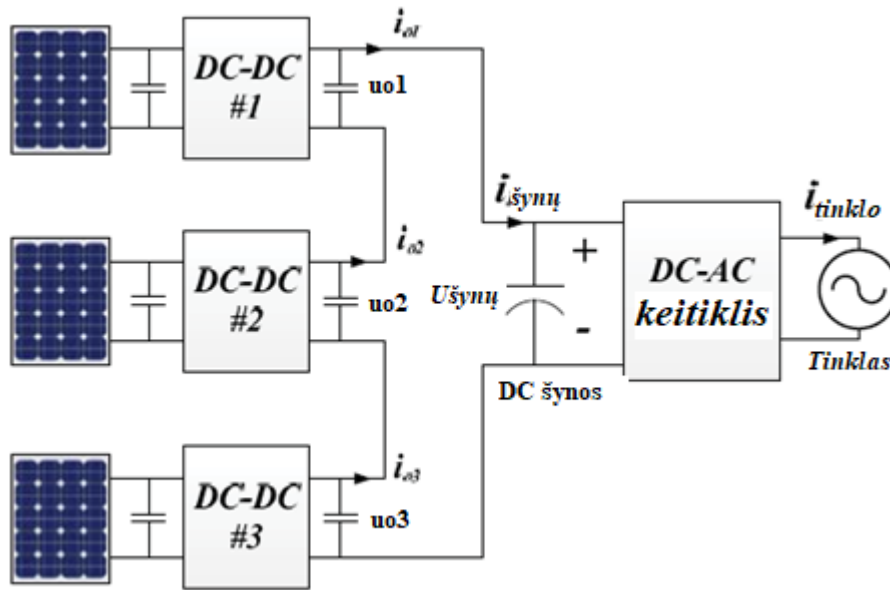
Iš 12 pav. matyti, jog konverterio išėjimo įtampa ir mažinama, ir didinama.

Galios optimizatorių veikimas pagrįstas įtampos lygio reguliavimu. Optimizatorius nuolatos seka fotovoltinio modulio įtampos lygį ir lygina jį su nominalia įtampos reikšme, t.y. seka *MPP*. Įtampos reguliavimas atliekamas DC/DC konverteriu [30, 31]:

1. Žeminančiojo galios optimizatoriaus atveju, DC/DC konverteris mažina įtampą perjungiant tranzistorių arba aukšto dažnio jungiklį. Tuomet įėjimo įtampa perduodama per ritę ir diodą, kurie kartu sumažina įtampą iki reikiamo lygio.
2. Aukštinančiojo galios optimizatoriaus atveju, DC/DC konverteris didina įtampą atvirkščiai lyginant su žeminančiuoju optimizatoriumi, t.y. įėjimo įtampa perduodama per ritę, kurioje kaupiama energija ir diodas išleidžia sukauptą energiją, todėl išėjimo įtampa padidėja.
3. Žeminančiojo-aukštinančiojo galios optimizatoriaus atveju, DC/DC konverteris dirba priklausomai nuo poreikio didinti arba mažinti įtampą ir veikia kaip anksčiau aprašyti žeminantieji ir aukštinantieji optimizatoriai.

Po įtampos konvertavimo DC/DC konverteriu, galios optimizatorius užtikrina, kad įtampa išliktų pastovaus nominalo.

13 pav. pavaizduotas saulės elektrinės su žeminančiais optimizatoriais schema su nuosekliai į grupę sujungtais fotovoltiniais moduliais.



13 pav. Saulės elektrinės su žeminančiais galios optimizatoriais schema [32]

Kaip matyti 13 pav., galios optimizatoriai yra sujungti lygiagrečiai su fotovoltiniais moduliais, o patys optimizatoriai nuosekliai. Kiekvienas optimizatorius palaiko fotovoltinio modulio išėjimo įtampą ir užtikrina, jog kiekvienas fotovoltinis modulis pasiektų maksimalų galios tašką. 13 pav. pavaizduotai sistemai, kuomet ji yra stabilioje būsenoje, visų optimizatorių suminė generuojama galia  $P_{sum}$  gali būti aprašyta matematiškai [32]:

$$P_{sum} = \sum_{i=1}^N (U_{iš,i} * I_{iš,i}); \quad (5)$$

čia:  $P_{sum}$  – optimizatorių generuojama suminė galia, W;

$U_{iš}$  – optimizatoriaus išėjimo įtampa, V;

$I_{iš}$  – optimizatoriaus išėjimo srovė, A;

$N$  – nuosekliai sujungtų optimizatorių skaičius.

Atiduodama visos DC grupės įtampa aprašoma:

$$U_{šyn} = \sum_{i=1}^N U_{iš,i}; \quad (6)$$

čia:  $U_{šyn}$  – keitiklio DC šynų įtampa, V.

Esant normaliam darbo režimui, atiduodama kiekvieno optimizatoriaus srovė yra vienoda:

$$I_{iš,i} = I_{iš,j} = I_{šyn}; \quad (7)$$

čia:  $I_{šyn}$  – keitiklio DC šynomis tekanti srovė, A.

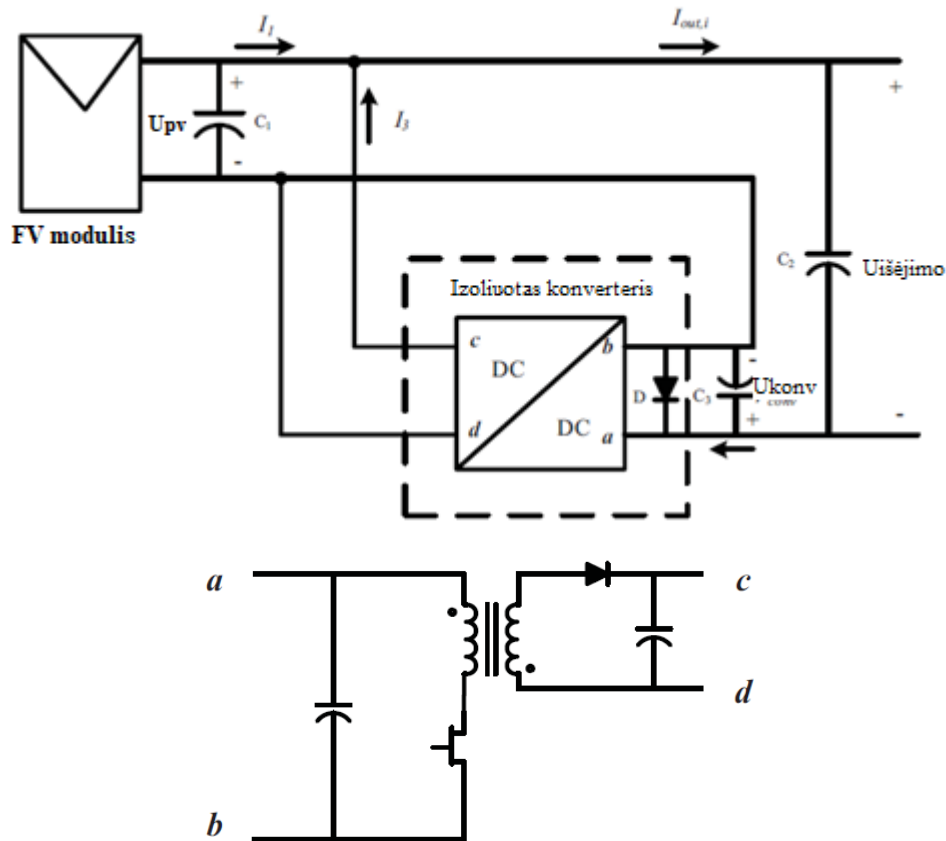
Optimizatoriaus išėjimo įtampa gali būti išreikšta:

$$U_{iš,i} = \frac{P_{iš,i}}{P_{sum}} U_{šyn}; \quad (8)$$

čia:  $P_{iš,i}$  – optimizatoriaus atiduodama galia, W.

8 formulė parodo, jog kiekvieno optimizatoriaus įtampa  $U_{iš,i}$  yra atvirkščiai proporcinga atiduodamai galiai  $P_{iš,i}$ .

14 pav. pavaizduota galios optimizatoriaus schema.



14 pav. Viršuje – galios optimizatoriaus schema, žemiau – DC/DC keitiklio schema [32]

DC/DC konverterio įėjimas yra nuosekliai prijungtas prie antrinės pusės, o konverterio išėjimas yra lygiagrečiai prijungtas prie pirminės pusės siekiant kontroliuoti fotovoltinio modulio įtampą, kad būtų galima realizuoti maksimalaus galios taško sekimo funkciją. Galia per DC/DC konverterį įeina per antrinę pusę, išeina per pirminę. Taip pat yra trys dideli kondensatoriai  $C1$ ,  $C2$  ir  $C3$ , kurie palaiko įtampos stabilumą. Konverterio įėjimo pusėje yra atvirkštinis-lygiagretus diodas (angl. *reverse-parallel diode*), kurio paskirtis yra apsaugoti paleidimo proceso metu kondensatorių  $C3$  [32].

Nuosekliai sujungtų optimizatorių sistemoje, kiekvienas optimizatorius kontroliuoja fotovoltinio modulio įtampą siekdamas pasiekti maksimalaus galios tašką nepriklausomai kuomet sistema yra stabili ir keitiklis palaiko DC šynų įtampą. Todėl komunikacija tarp galios optimizatorių ir keitiklio yra nereikalinga. Tačiau paleidimo proceso metu keitiklis tinkamai nedirba ir DC šynų įtampa nėra žinoma. Galios optimizatorius turi pritaikyti atitinkamą galios valdymo algoritmą, jog DC šynų įtampa pasiektų reikiamą dydį. Kadangi praeinanti galia pro DC/DC konverterį yra perduodama iš

antrinės pusės į pirminę pusę, konverterio paleidimo procesas privalo būti analizuojamas atskirai. Prieš grandinei pradėdant veikti, fotovoltinis modulis turi pakrauti kondensatorius  $C1$ ,  $C2$  ir  $C3$  ir modulio įtampa pakyla iki tuščiosios veikos įtampos. Pagal fotovoltinio modulio tuščiosios veikos įtampą parenkama atitinkama kondensatorių talpa tam, kad kondensatorių įtampa būtų konverterio startavimo įtampos diapazone [32].

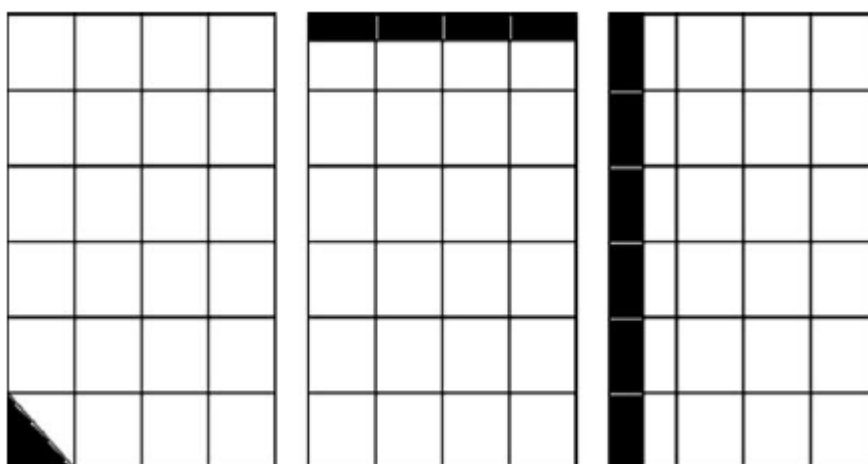
### 1.5. Šešėlių įtaka fotovoltinio modulio parametrams

Ant fotovoltinio modulio celės krentant net mažam šešėliui atiduodama modulio galia sumažėja dėl vidinio trumpojo jungimo (angl. *internal short-circuiting*), t.y. elektronai keičia judėjimo kryptį šešėliuojamos celės  $p-n$  sandūroje [5, 33].

Šešėlių tipai gali būti skirstomi į aklinius ir dalinai aklinius. Aklini šešėliai apibūdinami kaip plotai, į kuriuos visiškai nepatenka šviesa, pvz. ant fotovoltinio modulio uždengta antklode, paukščių išmatos arba bet koks kitas padėtas objektas. Dalinai aklini šešėliai susidaro, kuomet nuo tam tikru atstumu esančių objektų ant fotovoltinio modulio krenta šešėlis. Tokiu atveju šešėlių veikia difrakcija ir šviesa atsispindi nuo kitų objektų ir netgi ore esančių molekulių į šešėlio plotą, todėl šešėlis iš pilnai aklino tampa dalinai akliniu.

Jeigu akliniai yra šešėliuojama viena iš fotovoltinio modulio celių, modulio įtampa sumažės per pus lyginant su nešešėliuojamomis celėmis. Jeigu yra akliniai šešėliuojama pakankamai celių, tuomet modulis visiškai neatiduos galios ir netgi pradės maža apimtimi vartoti energiją [5].

Krentant šešėliui ant fotovoltinio modulio pusės vienos arba daugiau iš 36 celių (15 pav.), visų 36 celių atiduodama galia sumažėja perpus. Taip nutinka dėl to, jog visos celės yra sujungtos nuosekliai, todėl pagal mažiausią galią generuojančią celę dirba ir kitos celės.



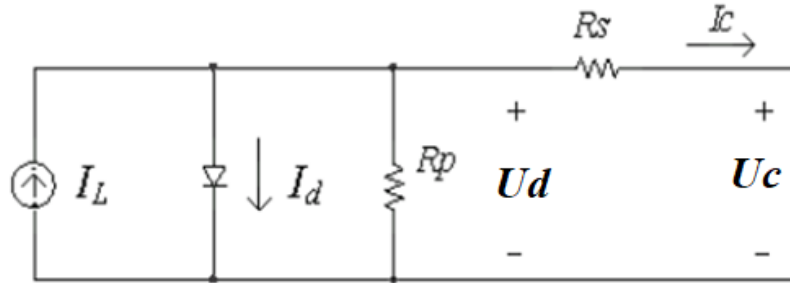
15 pav. 50 % šešėliuojamų celių pavyzdys [5]

Ant celės krentančio šešėlio plotas santykiškai yra proporcingas atiduodamos fotovoltinio modulio galios sumažėjimui.

Esant aklinai šešėliuojamai celei, celė gali tapti kitų celių generuojamos energijos imtuvu ir suaktyvinti modulį, kad jis apsaugotų. Jeigu akliniai šešėliuojama visa celė, tuomet tikėtina, jog viso modulio atiduodama galia sumažės 50 %, o jeigu bus akliniai šešėliuojamos celių eilės, tuomet tikėtina, jog modulis visai neatiduos galios.

### 1.5.1. Fotovoltinis modulis be šuntavimo diodų ir be galios optimizatoriaus

Celė gali būti modeliuojama kaip 16 pav. pavaizduotoje schemoje, kurioje yra p-n jungtis, srovės šaltinis  $I_L$ , lygiagrečiai varža  $R_p$ , kuri atstoja srovės nuotėkį proporcingą įtampai, nuosekli varža  $R_s$ , kuri atstoja puslaidininkio nuostolius.



16 pav. Celės ekvivalentinė schema [34]

Celės matematinis modelis aprašomas matematiškai:

$$I_c = I_L - I_0 \left( e^{\frac{qU_d}{mkT}} - 1 \right) - \frac{U_d}{R_p}; \quad (9)$$

$$U_c = U_d - I_c * R_s; \quad (10)$$

čia:  $I_L$  – srovė, proporcinga saulės šviesos intensyvumui, A;

$U_d$  – p-n jungties diodo įtampa, V;

$U_c$  – celės įtampa, V;

$m$  – diodo idealumo faktorius (1 – idealus diodas);

$I_0$  – diodo atvirkštinės soties srovė, A;

$q$  – elementarusis krūvis, C;

$k$  – Bolcmano konstanta;

$T$  – absoliutinė temperatūra, K.

Fotovoltinį modulį sudaro įvairus lyginis skaičius nuosekliai sujungtų celių, kurios modulyje sumontuotos dviem eilėmis (pagal ilgąją modulio kraštinę). Toliau gilnamasi tik į 36 celių fotovoltinį modulį. Daugumoje tyrimų priimama, jog visos celės modulyje yra identiškos ir dirba vienodomis sąlygomis. Visgi, realybėje celių PV charakteristikos skiriasi dėl netolygiai krentančių saulės spindulių, nešvarių celių, elementų parametų svyravimo ir nenuoseklumo, kurie atsiranda gamybos procese [35, 36].

Priimama, jog fotovoltiniame modulyje yra  $N_m$  celių ir šešėliavimo faktorius (angl. *shading factor*) i-tosios celės modulyje yra  $p_i$ . Tuomet matematinis fotovoltinio modulio modelis esant šešėliams aprašomas:

$$I_c = (1 - p_i)I_L - I_0 \left( e^{\frac{qU_{di}}{mkT}} - 1 \right) - \frac{U_{di}}{R_p}; \quad (11)$$

$$U_{ci} = U_{di} - I_c * R_s; \quad (12)$$

$$U_s = U_{c1} + U_{c2} + \dots + U_{c(N_m-1)} + U_{cN_m}; \quad (13)$$

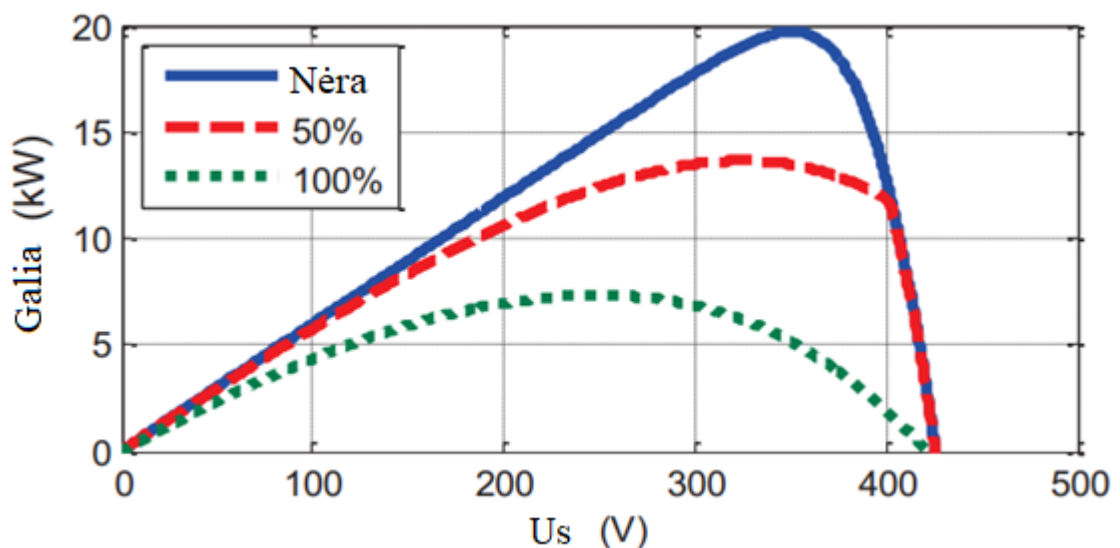
čia:  $p_i$  – šešėliavimo faktorius (angl. *shading factor*);

$I_L$  – pilnutinė saulės generacijos srovė, A;

$U_{di}$  – p-n jungties diodo įtampa, V;

$U_{ci}$  – i-tosios celės išėjimo įtampa, V.

PV charakteristika gali būti apskaičiuojama pagal aukščiau pateiktas formules arba naudojantis modeliavimo programa *PSpice Circuit Simulator*. 17 pav. pavaizduotos modulyno PV charakteristikos esant trimis šešėliavimo tipams. Fotovoltinių grupių masyvą sudaro 10 lygiagrečiai sujungtų grupių, kiekvienoje grupėje po 20 nuosekliai sujungtų modulių. Priimama, jog 1-oje grupėje yra šešėliuojami 19 modulių, 2-oje grupėje 17, 3-oje grupėje 15 ir atitinkamai t.t., paskutinėje grupėje šešėliuojamas tik vienas modulis. Simuliuojamas šešėlis ant kiekvieno modulio vienos celės esant trimis šešėliavimo faktoriams – 0, 0,5 ir 1 [34].

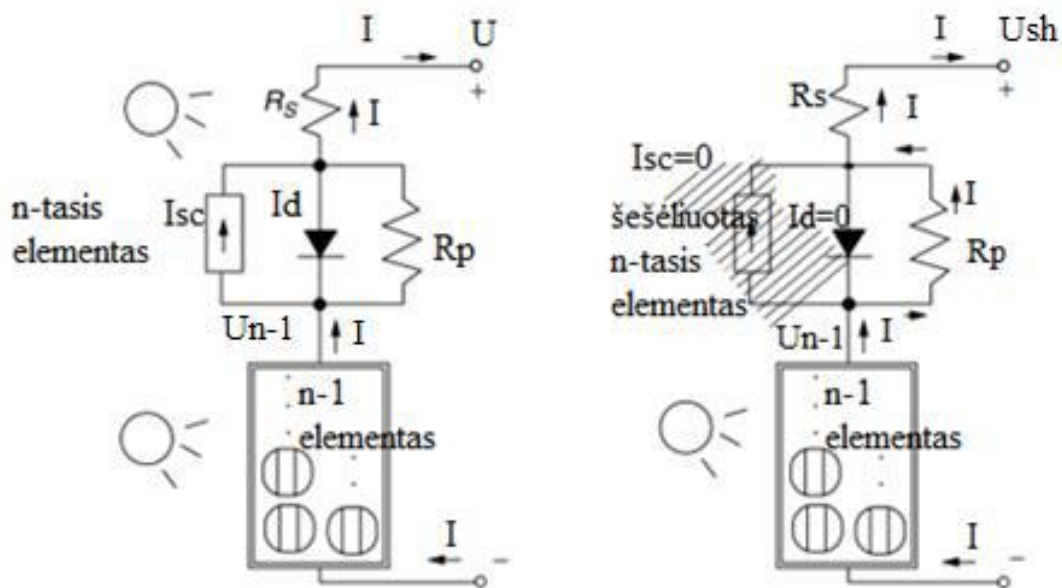


17 pav. Fotovoltinio modulių modulyno be šuntavimo diodų PV charakteristika [34]

Aplamai, nesant šuntavimo diodų, modulio PV charakteristika dramatiškai paveikiama krentant šešėliui netgi ant poros celių. Netgi krentant šešėliui ant vieno modulio vienos celės, visų kitų modulių įtampa krenta atitinkamai. T.y. visi moduliai veikia pagal blogiausiomis sąlygomis veikiančią modulį.

### 1.5.2. Fotovoltinis modulis su 3 šuntavimo diodais

Saulės elektrinių sistemose, kai fotovoltiniai moduliai yra jungiami nuosekliai, pro juos teka vienoda srovė  $I$ , tačiau jei vienas iš fotovoltinių modulių patenka į šešėlį, krenta visos grupės įtampa, o tai lemia generuojamos galios sumažėjimą. Tipinė šešėliuojamo fotovoltinio modulio schema pateikiama 18 paveikslėlyje.



**18 pav.** Fotovoltinis modulis su  $n$  celių. Kairiau – visos celės apšviestos saulės, dešiniau – viena celė šešėliuojama [4]

Kuomet saulės spinduliai krenta į fotovoltinio modulio plokštumą, teka srovė  $I$ , o įtampos kritimas yra  $U_{n-1}$ . Fotovoltinio modulio įtampos kritimą galima apskaičiuoti [4]:

$$U_{SH} = U_{n-1} - I(R_P + R_S); \quad (14)$$

čia:  $U_{SH}$  – bendra išėjimo įtampa, V;

$U_{n-1}$  –  $n$ -tosios celės įtampa, V

$R_P$  – lygiagrečiai prijungta varža,  $\Omega$ ;

$R_S$  – nuosekliai prijungta varža,  $\Omega$ ;

$I$  – fotovoltinio modulio srovė, A.

Šešėliuojamos celės ( $n - I$ ) įtampą galima apskaičiuoti:

$$U_{n-1} = \left(\frac{n-1}{n}\right) * U; \quad (15)$$

čia:  $n$  – celių skaičius;

$U$  – įtampa, V.

Sujungus 14 ir 15 formules gaunama:

$$U_{SH} = \left(\frac{n-1}{n}\right) * U - I(R_P + R_S); \quad (16)$$

Modulio įtampos kritimą  $\Delta U$ , kuris atsiranda dėl šešėliuojamos celės galima apskaičiuoti:

$$\Delta U = U - U_{SH} = U - \left(\frac{n-1}{n}\right) * U + I(R_P + R_S); \quad (17)$$

čia:  $\Delta U$  – fotovoltinio modulio įtampos kritimas, V

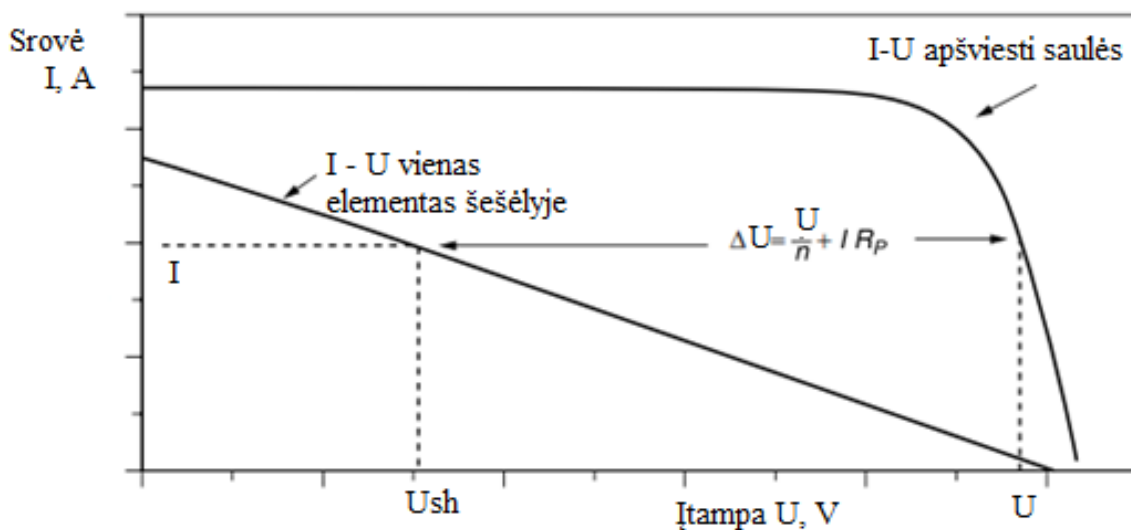
Supaprastinus formulę gaunama:

$$\Delta U = \frac{U}{n} + I(R_p + R_s); \quad (18)$$

Dėl lygiagrečiai prijungtos varžos  $R_p$ , kuri yra žymiai didesnė už nuosekliai prijungtą varžą  $R_s$ , įtampos kritimo formulė supaprastinama:

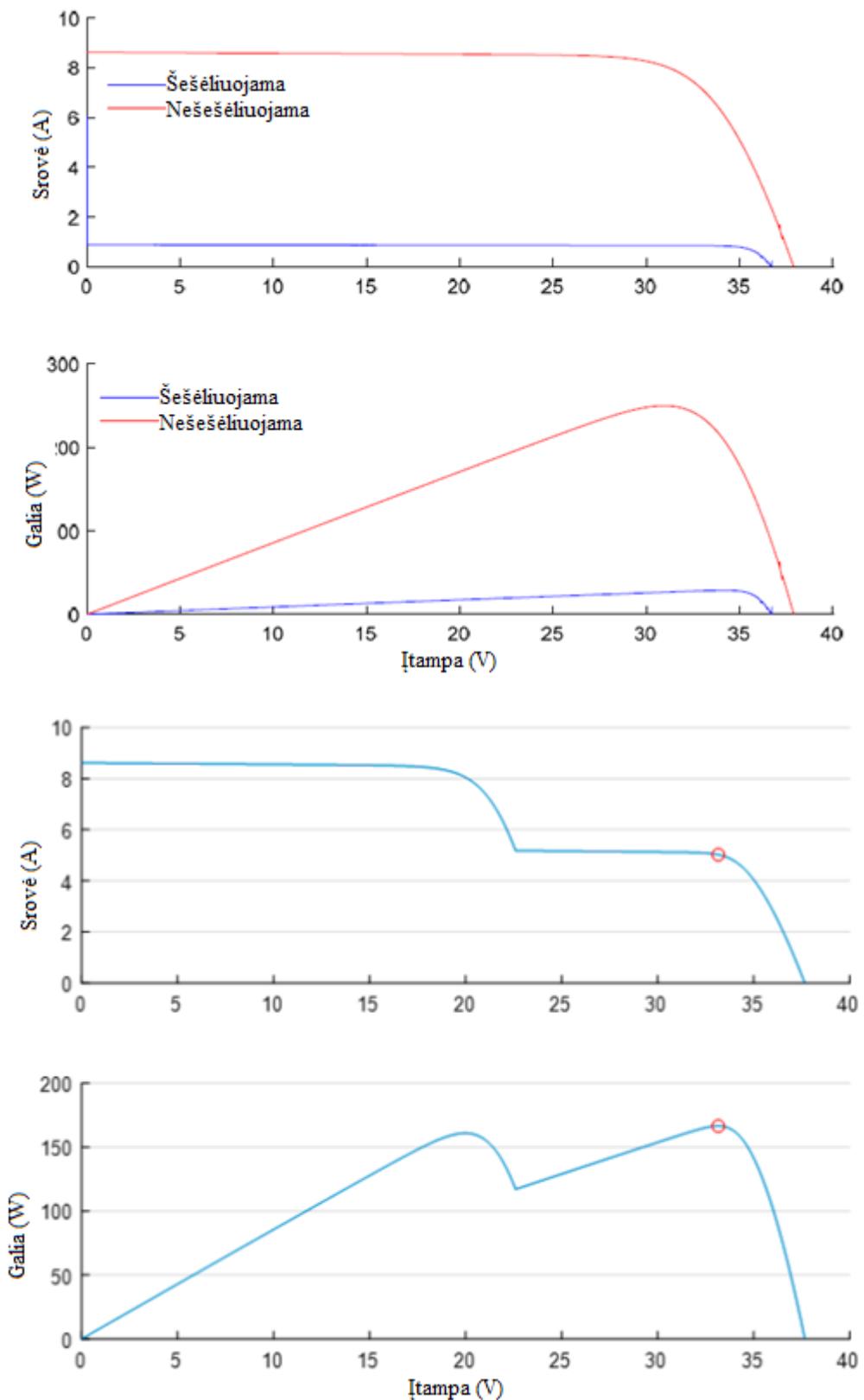
$$\Delta U \cong \frac{U}{n} + IR_p; \quad (19)$$

Bet kuriuo laiko momentu, modulio su viena šėšėliuojama cele voltamperinė charakteristika krenta  $\Delta U$  (19 pav.).



**19 pav.** Šėšėliuojamos vienos iš  $n$  celių fotovoltinio modulio įtampos kritimo palyginimas su nešėšėliuojamo fotovoltinio modulio įtampa [4]

20 pav. pavaizduotos fotovoltinio modulio voltamperinės charakteristikos ir PV kreivės. Pirmu atveju – šėšėliuojama fotovoltinio modulio celė be šuntavimo diodų, antru atveju – šėšėliuojama celė ir vienas iš trijų šuntavimo diodų suveikia.

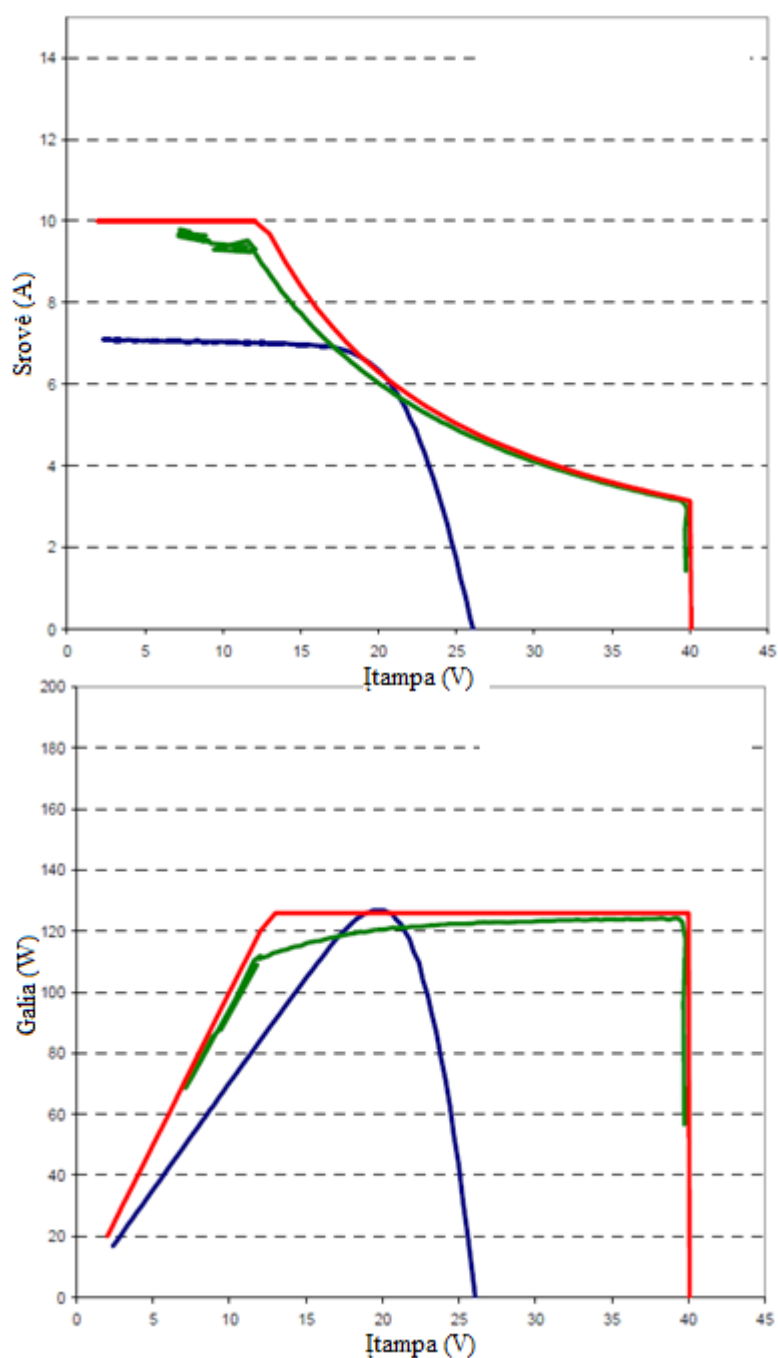


**20 pav.** Fotovoltinio modulio voltamperinės charakteristikos ir PV kreivės. Pirmu atveju – šėšėliuojama fotovoltinio modulio celė be šuntavimo diodų, antru atveju – šėšėliuojama celė ir vienas iš trijų šuntavimo diodų suveikia [18]

Kaip matyti iš 20 pav., krintant šėšėliui ant vienos iš fotovoltinio modulio celių, šuntavimo diodai gerokai padidina maksimalų galios tašką.

### 1.5.3. Fotovoltinis modulis su galios optimizatoriumi

Nagrinėjamas toks pat šešėliavimo atvejis kaip ir su šuntavimo diodais – fotovoltinis modulis, kurio viena celė yra šešėliuojama.

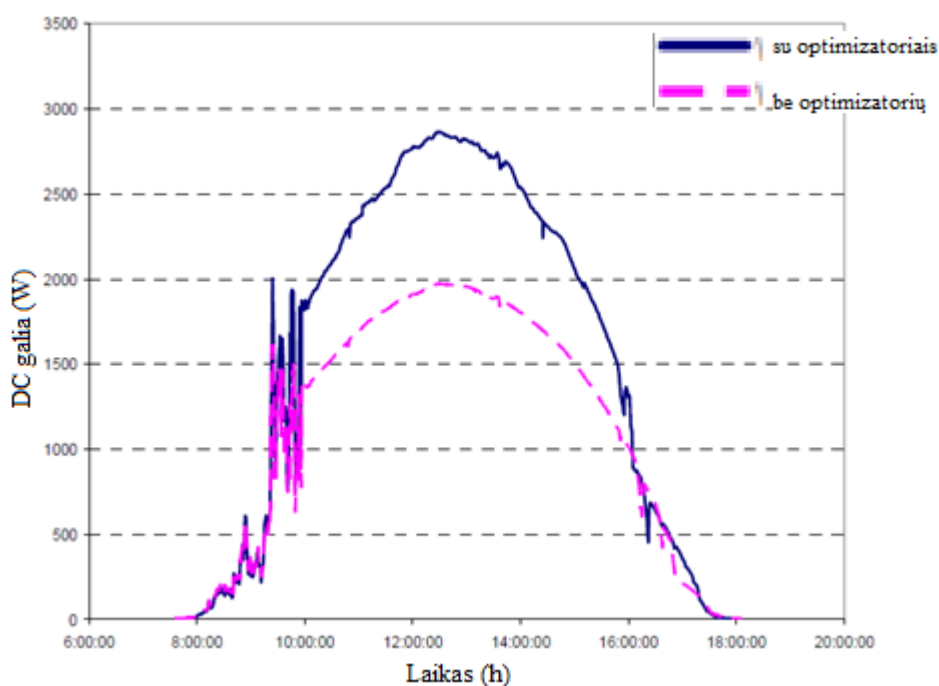


**21 pav.** Fotovoltinio modulio voltamperinės charakteristikos ir PV kreivės. Raudona kreivė – atvejis, kai modulis su galios optimizatoriumi celė nešėliuojama, mėlyna – atvejis, kai šešėliuojama fotovoltinio be optimizatoriaus viena celė, žalia – atvejis, kai šešėliuojama modulis su galios optimizatoriumi viena celė [37]

Kaip matyti 21 pav., gautos fotovoltinio modulio voltamperinės charakteristikos ir PV kreivės. Raudona kreivė vaizduoja atvejį, kuomet fotovoltinis modulis su galios optimizatoriumi nėra šešėliuojamas, mėlyna kreivė vaizduoja atvejį, kai šešėliuojama viena modulis celė, o žalia kreivė vaizduoja atvejį, kuomet šešėliuojama modulis su galios optimizatoriumi viena celė. Matyti, jog žalia

ir raudona kreivės yra artimos viena kitai, lyginant su mėlyna. T.y. matyti, jog galios optimizatorius beveik pašalina šešėlio daroma neigiamą įtaką galios generavimui.

22 pav. pavaizduotas realios saulės elektrinės bandymas. Sumontuoti du modulynai po dvi grupes (po 12 fotovoltinių modulių). Bandymui atlikti buvo pastatyti du objektai, kurie meta šešėlį ant vienos fotovoltinių modulių grupės kiekviename modulyne. Vienas modulynas sumontuotas su galios optimizatoriais.



**22 pav.** Viršuje – bandomos saulės elektrinės nuotrauka, apačioje – DC galios generavimo grafikas. Mėlyna kreivė – modulynas su optimizatoriais, rožinė – be optimizatorių [37]

Kaip matyti iš 22 pav., saulės elektrinė su galios optimizatoriais esant šešėliams akivaizdžiai sugeneravo daugiau elektros energijos. Per visą dieną modulynas be galios optimizatorių sugeneravo 11,4 kWh, o su galios optimizatoriais 15,4 kWh. Skirtumas siekia 26 % [37].

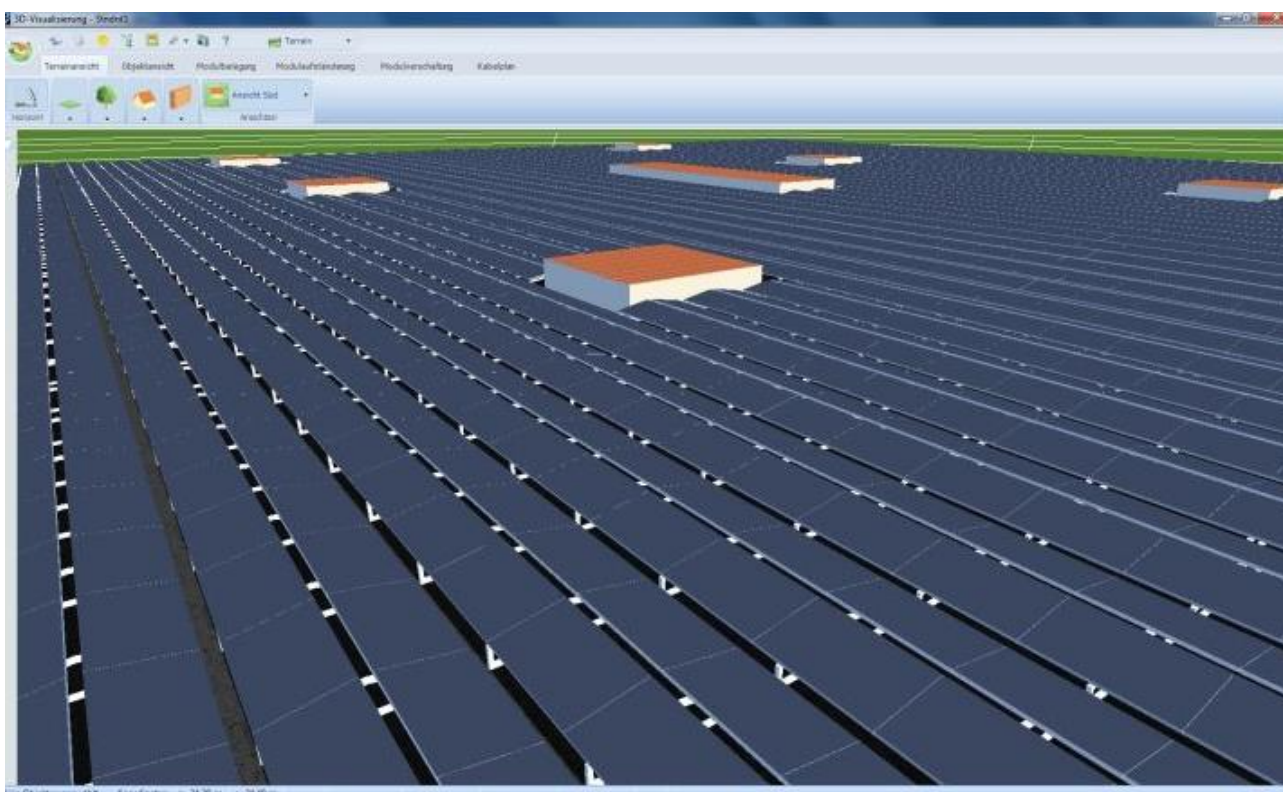
## 2. Tiriamoji dalis

Tiriamąją dalį sudaro modeliavimas licencijuota profesionalia saulės elektrinių modeliavimo programa *PVSOL Premium 2024* [38] ir realūs bandymai su 29,7 kW saulės elektrine.

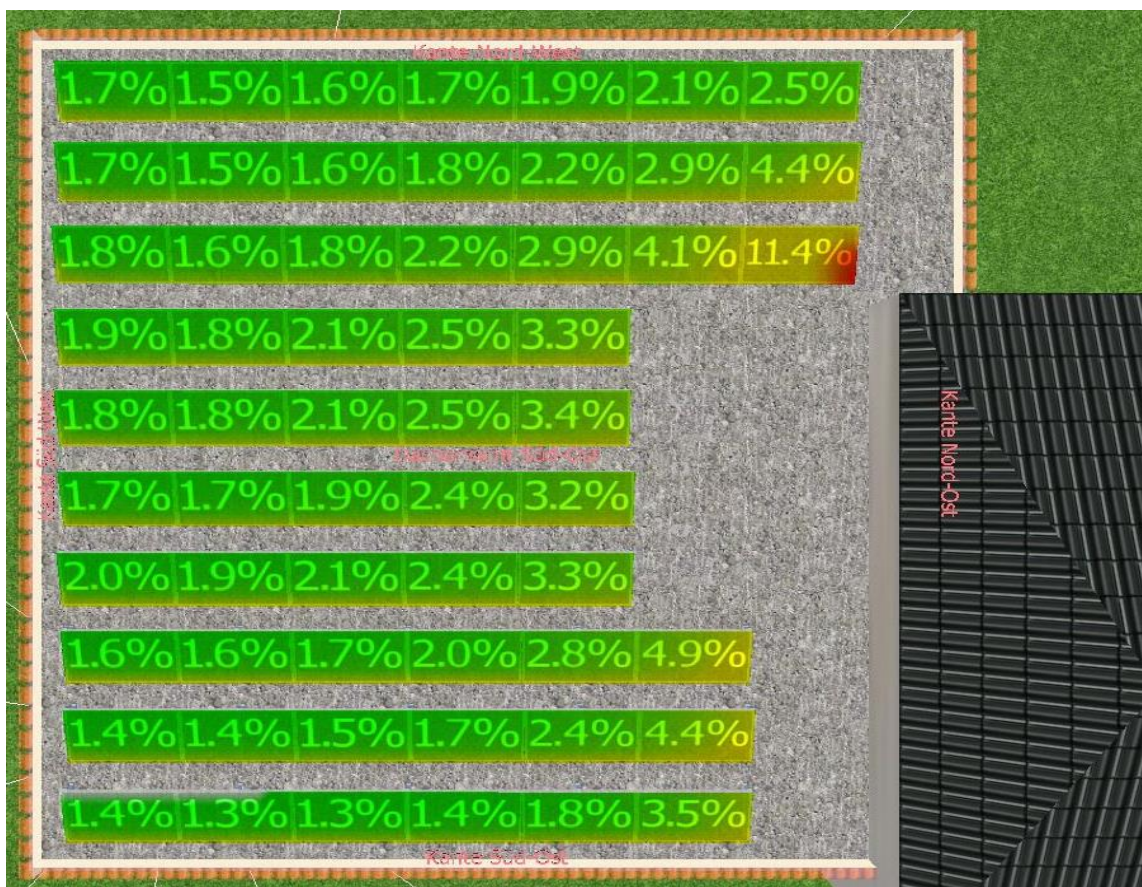
### 2.1. Modeliavimas

*PVSOL Premium 2024* programinio paketo galimybės [38]:

- 3D objektų ir saulės šviesos energijos sistemų modeliavimas;
- Programa apskaičiuoja elektros energijos srautus (vartojimą, gamybą, elektros pasaugojimą tinkle, baterijų krovimą ir t.t.);
- Programa sumodeliuoja pagal užduotus parametrus tikslią elektros energijos gamybą kiekvienu laiko momentu įvertinant įvairius kintamuosius, tokius kaip šešėliavimas, atspindžiai ar įvairius nuostolius dėl temperatūrų ar vėjo įtakos ir t.t.
- Programiniame pakete yra daugelis populiariausių gamintojų įtampos keitiklių, fotovoltinių modulių ir galios optimizatorių gaminiai su realiais ir tiksliais parametrais.
- Programa tiksliai įvertina šuntavimo diodų ir optimizatorių veikimą, yra galimybė kiekvienu laiko momentu gauti įvairius duomenis.



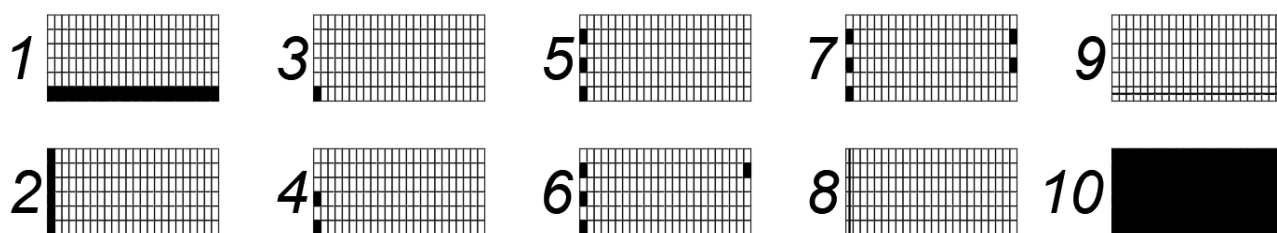
23 pav. *PVSOL Premium 2024* programinio paketo aplinka [38]



24 pav. PVSOL Premium 2024 programinio paketo vizualinis šešėliavimo įvertinimas [38]

### 2.1.1. 10-ties stacionarių šešėlių atvejų modeliavimas

Tiriama 10 skirtingų šešėlių kritimo atvejų ant fotovoltinių modulių (25 pav.)



25 pav. Tiriama šešėliavimo atvejai (1-10 variantai)

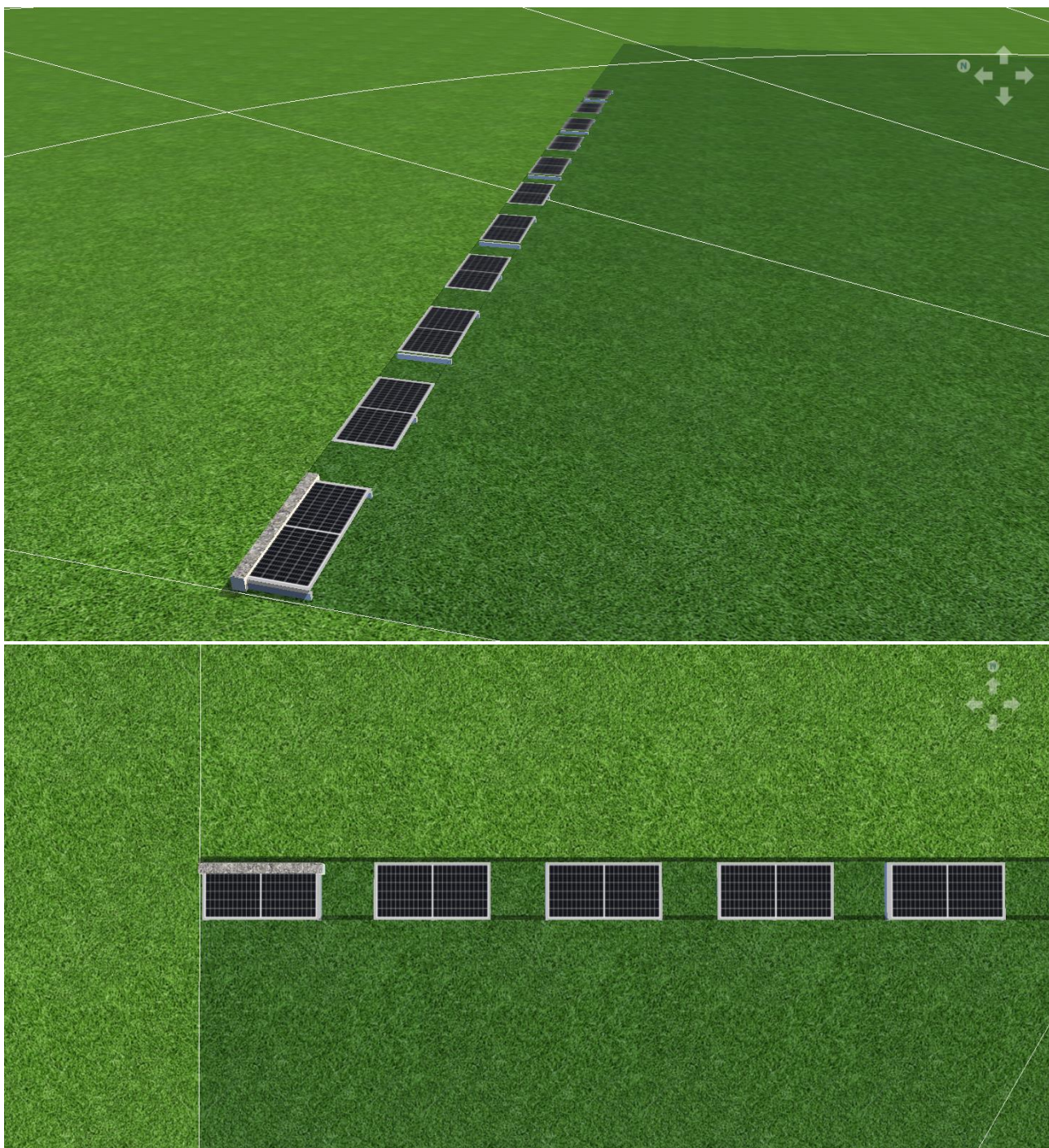
Tyrime naudojama 11 į vieną grupę sujungtų *Swiss Solar IBEX 144MHC-COSMOS* 450 Wp monokristalinių fotovoltinių modulių (žr. 1 priedą) [39], kurių parametrai esant STC sąlygoms yra:

- Vardinė galia 450 Wp;
- Trumpojo jungimo srovė 11,55 A;
- Atviros grandinės įtampa 49,8 V;
- Vardinė įtampa 41 V;
- Vardinė srovė 10,98 A.

Vieną modulį sudaro 144 pusinių celių (6x24). Celės sujungtos į tris grupes po 48 celses (2x24). Prie kiekvienos grupės prijungtas šuntavimo diodas, viso 3 vnt. Fotovoltinio modulio struktūra panaši ir šuntavimo diodų jungimas identiškas kaip 6 pav.

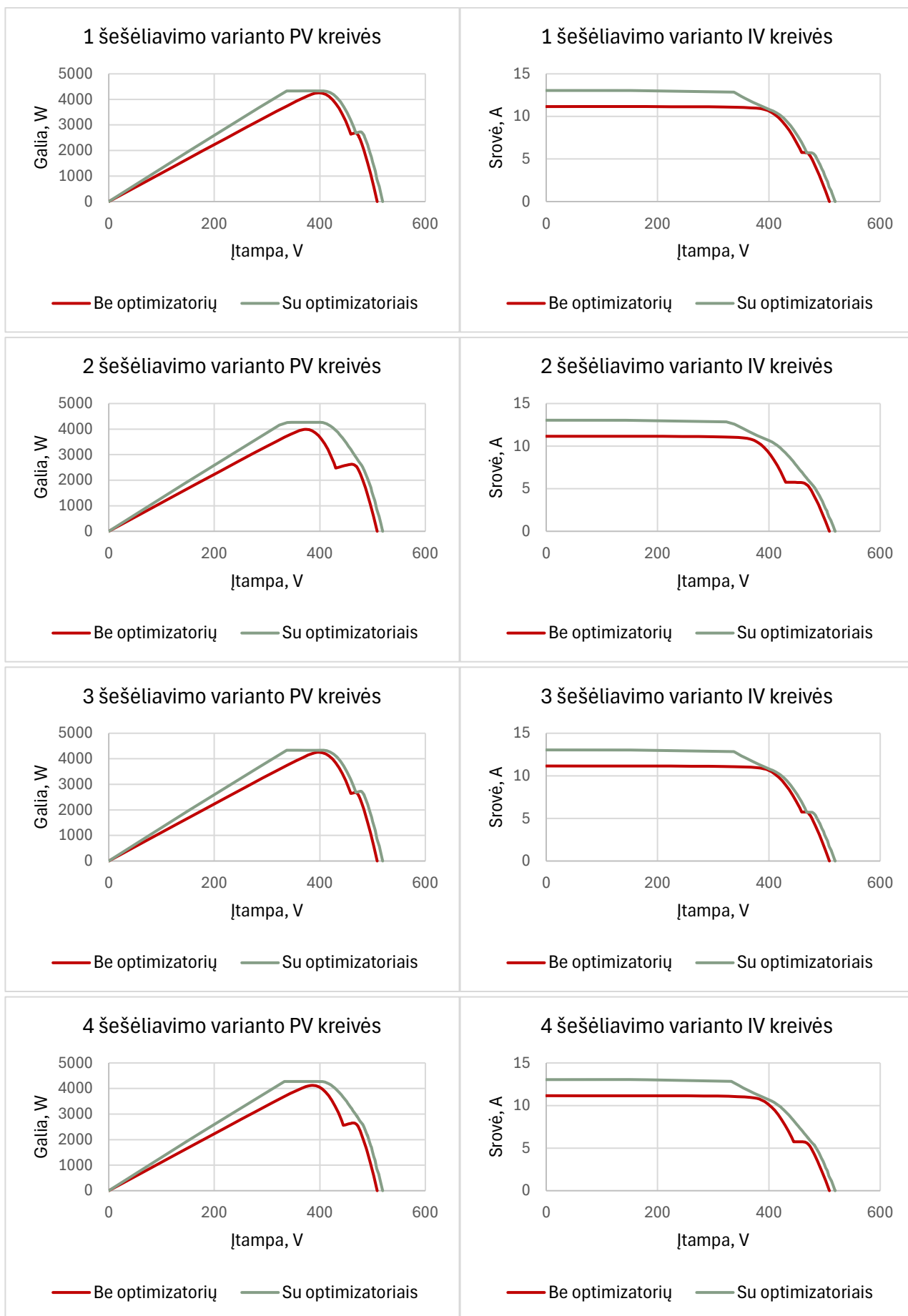
Modeliavime naudojami *Tigo TS4-A-0 700W* galios optimizatoriai (žr. 2 priedą) [40].

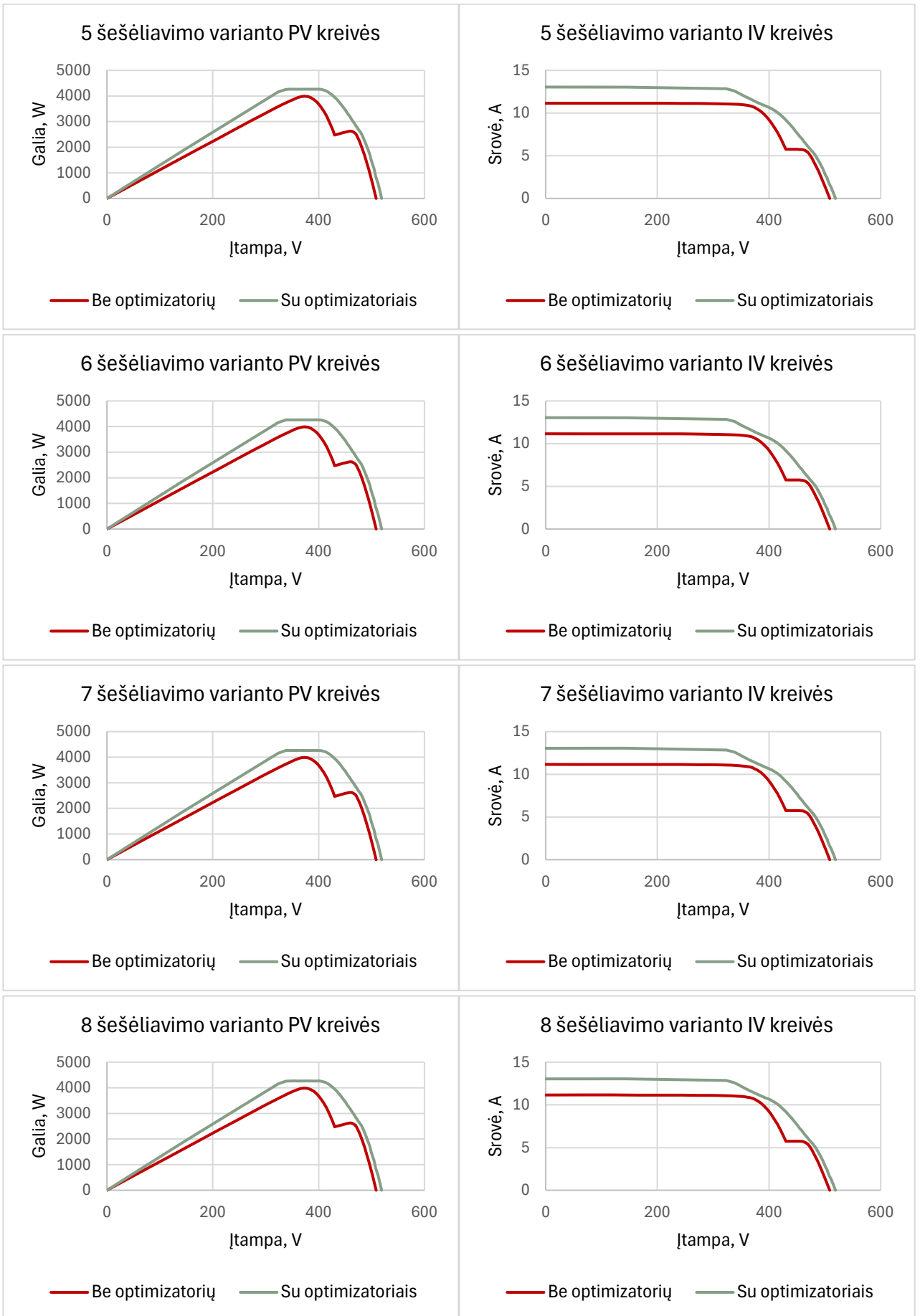
*PVSOL Premium 2024* programiniu paketu sukurtas saulės elektrinės modelis (26 pav.), kuris atitinka realią saulės elektrinę su kuria atliekami realūs bandymai. Sumodeliuota tik 11 į vieną grupę sujungtų modulių. Į maksimalaus galios taško sekimo modulį lygiagrečiai daugiau prijungtų grupių nėra.

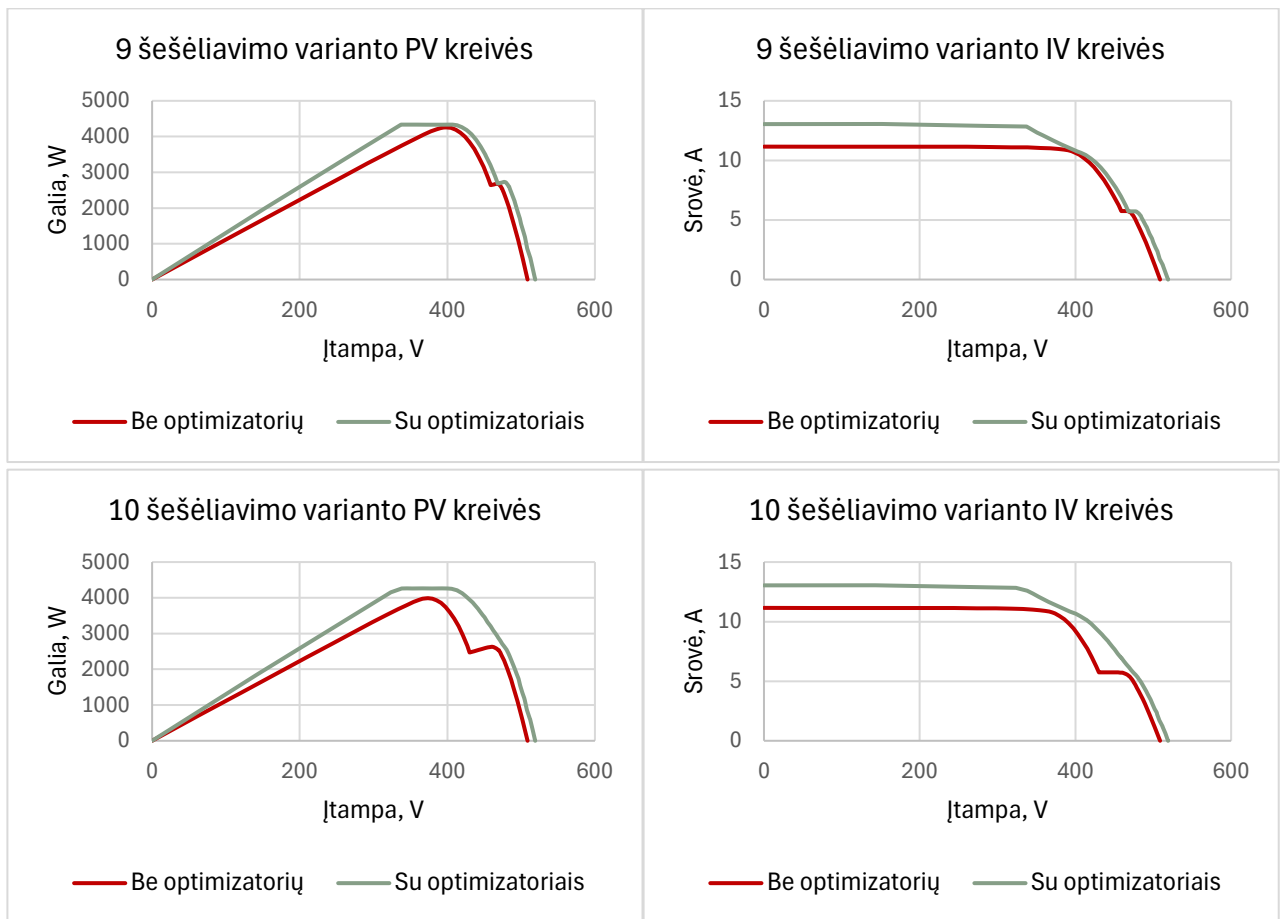


**26 pav.** Saulės elektrinės modelis *PVSOL Premium 2024* programinio paketo aplinkoje

Atliekamas modeliavimas *PVSOL Premium 2024* programiniu paketu visai 10-čiai šešėliavimo atvejų. Rezultatai pateikiami žemiau esančiame 27 pav.



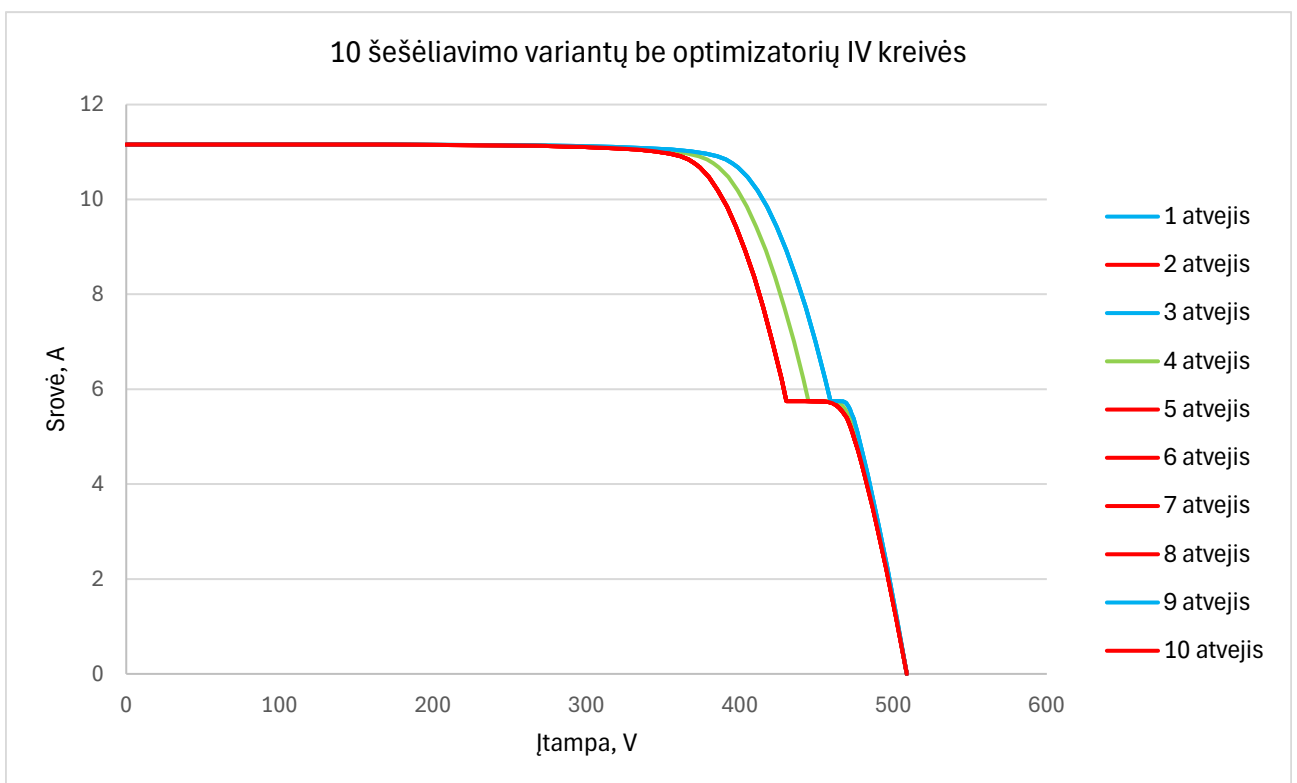
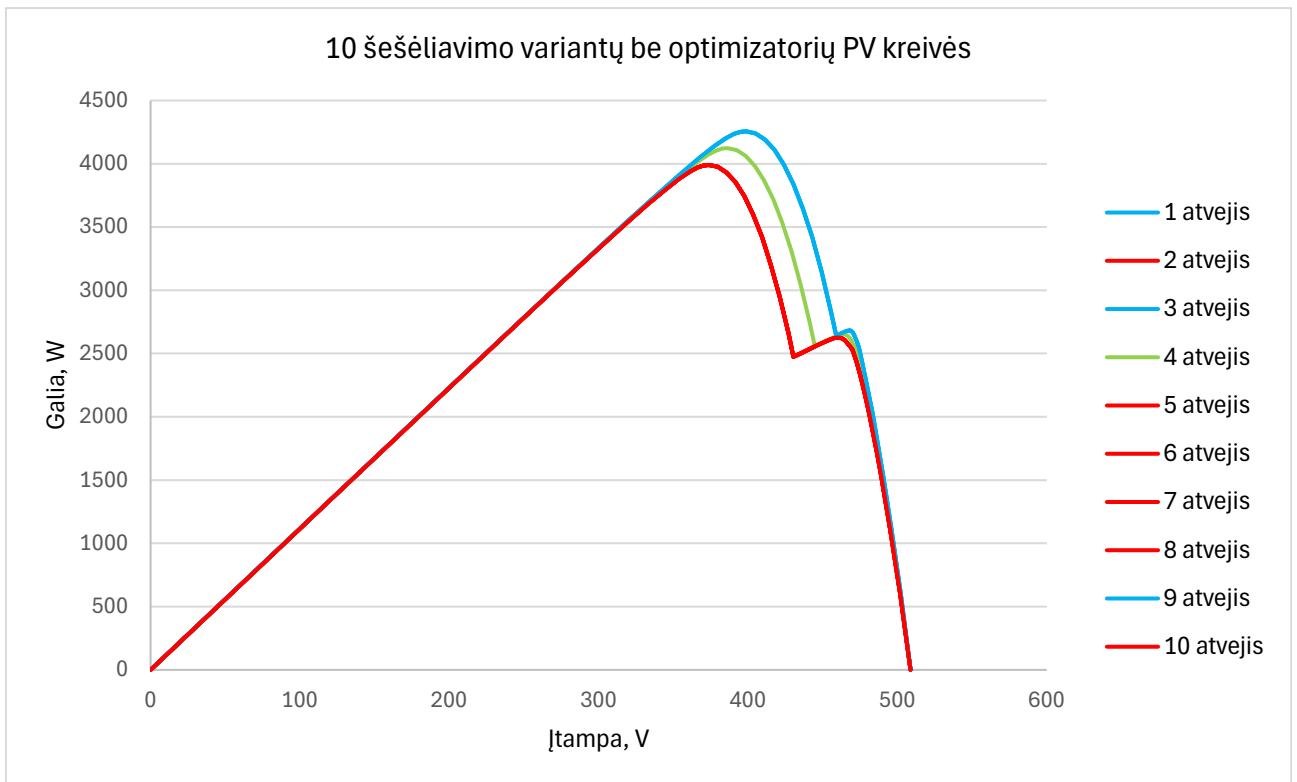




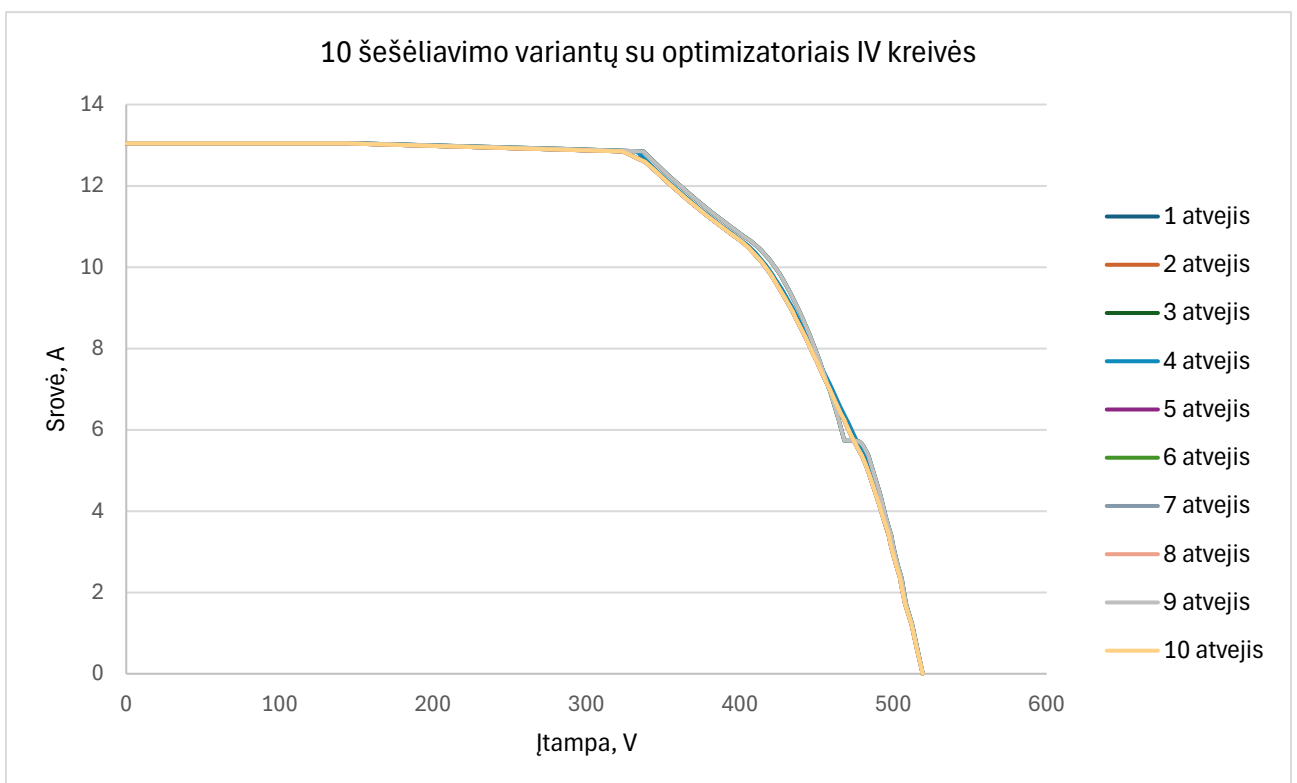
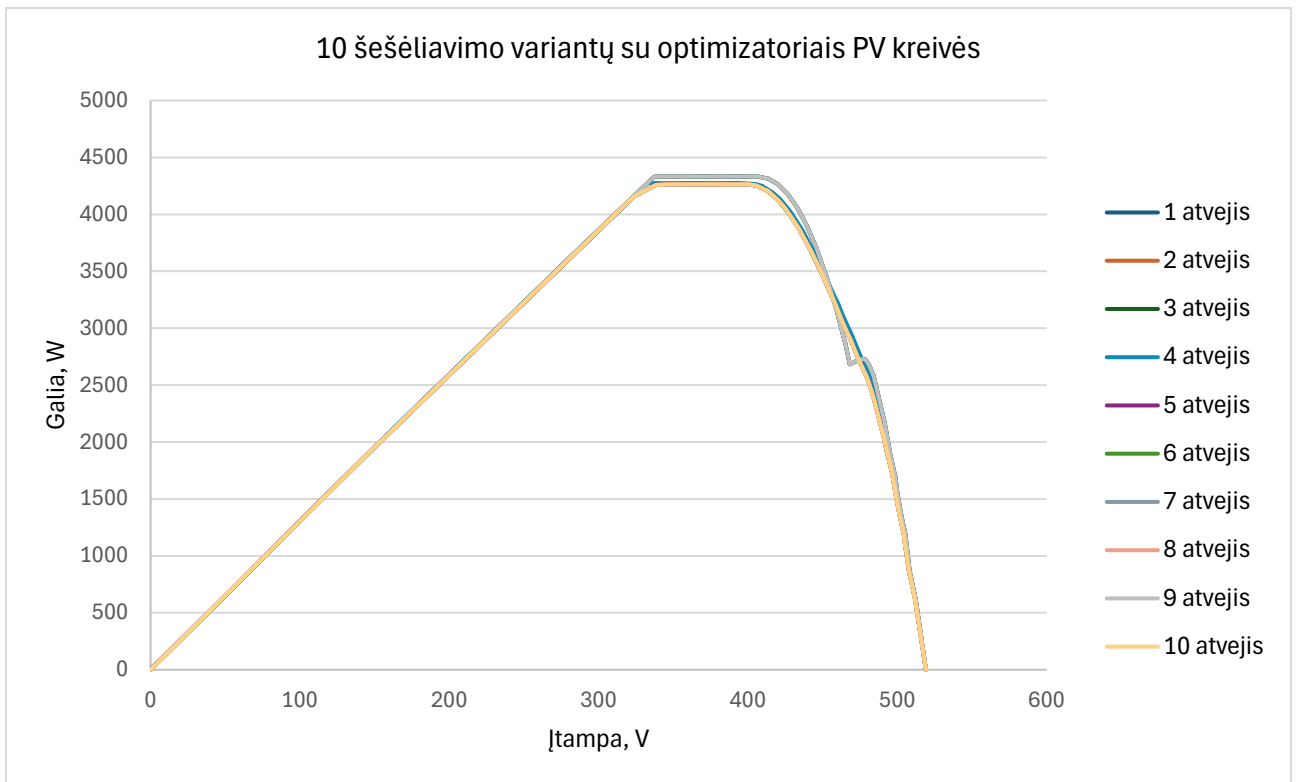
**27 pav.** 10 skirtingų šešėliavimo variantų modeliavimo rezultatai (PV ir IV kreivės)

*PVSOL Premium 2024* programiniu paketu sumodeliuota 10 skirtingų šešėliavimo atvejų esant fotovoltiniams moduliams be optimizatorių ir su optimizatoriais. 27 pav. pateikiamos PV (galios) ir IV (voltamperinės) charakteristikos. Iš charakteristikų matyti, jog visais atvejais optimizatorius padidina maksimalų tašką ( $P_{max}$ ) didindamas srovę arba įtampą. Vis tik matyti, jog optimizatorius tik minimaliai pagerina charakteristikas.

28 ir 29 pav. pateiktos visų šešėliavimo atvejų IV ir PV kreivės vienuose grafikuose.



**28 pav.** 10 skirtingų šėšėliavimo variantų be optimizatorių modeliavimo rezultatai (PV ir IV kreivės)



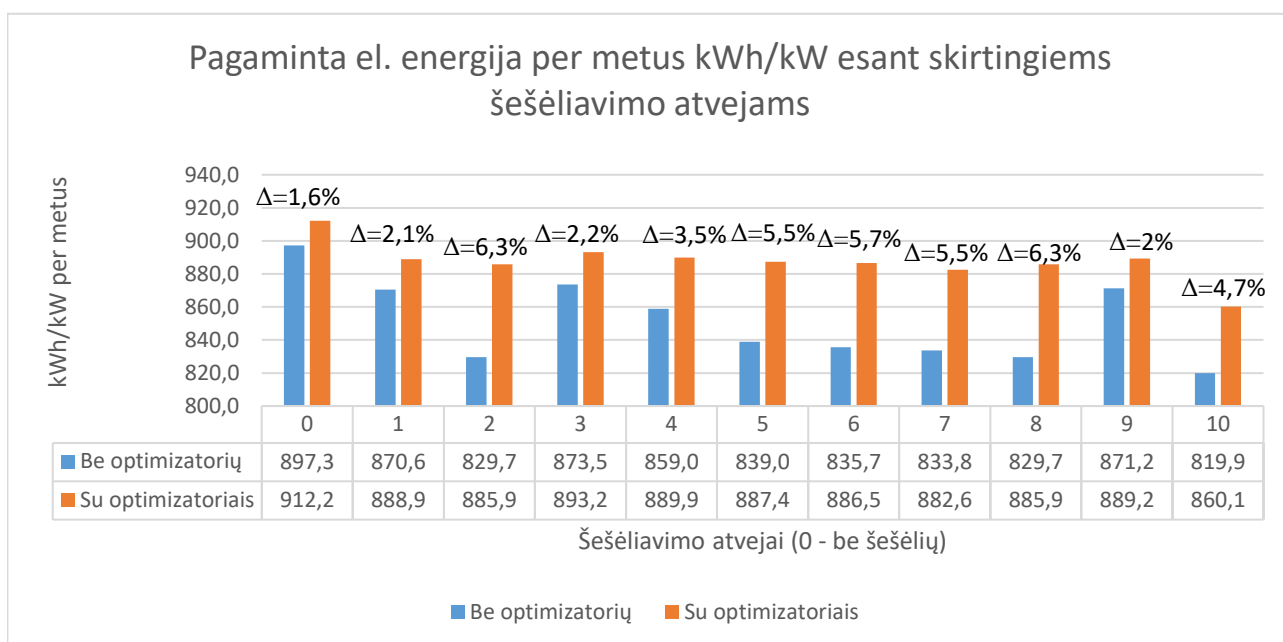
**29 pav.** 10 skirtingų šešėliavimo variantų su optimizatoriais modeliavimo rezultatai (PV ir IV kreivės)

Iš 28 pav. matyti, jog 1, 3, 9 ir 2, 5, 6, 7, 8, 10 šešėliavimo atvejais kreivės yra identiškos. Pastebėta, jog nesvarbu šešėliuojama celė pilnai ar ne, krentant šešėliui ant celės, suveikia šuntavimo diodai, kurių pagalba srovė apeina trečdalį, du trečdalius modulio (48 ir 96 celes atitinkamai iš 144) arba visą modulį (144 celes iš 144). Taip pat matyti, jog šuntavimo diodų pagalba nedaroma įtaka kitiems į

modulių grupę prijungtiems moduliams, todėl krentantis šešėlis ant vieno iš 11 į grupę sujungtų modulių paveikia visą grupės generuojamą galią minimaliai.

Iš 29 pav. matyti, jog optimizatoriai padidino srovę ir įtampą, tačiau tik minimaliai pagerino charakteristikas. Geriau sekamas maksimalus galios taškas ( $P_{max}$ ). Taip pat iš 29 pav. grafikų matyti, jog nesvarbu kokio tipo šešėlis krenta ant FV modulių, PV ir IV kreivės yra labai panašios.

Taip pat sumodeliuota visais šešėliavimo atvejais pagaminama elektros energija per metus (30 pav.). Programoje pasirinkti Kauno miesto istoriniai 1996 – 2015 metų meteorologiniai duomenys (1034 kWh/m<sup>2</sup>). Rezultatai pateikti kWh/kW siekiant geresniam rezultatų atvaizdavimui ir lyginimui. Šešėliai visais atvejais visus metus nekinta. Pateikti rezultatai yra tik vienos grupės, kurią sudaro 11 modulių. 0 atvejis – moduliai nešešėliuojami.



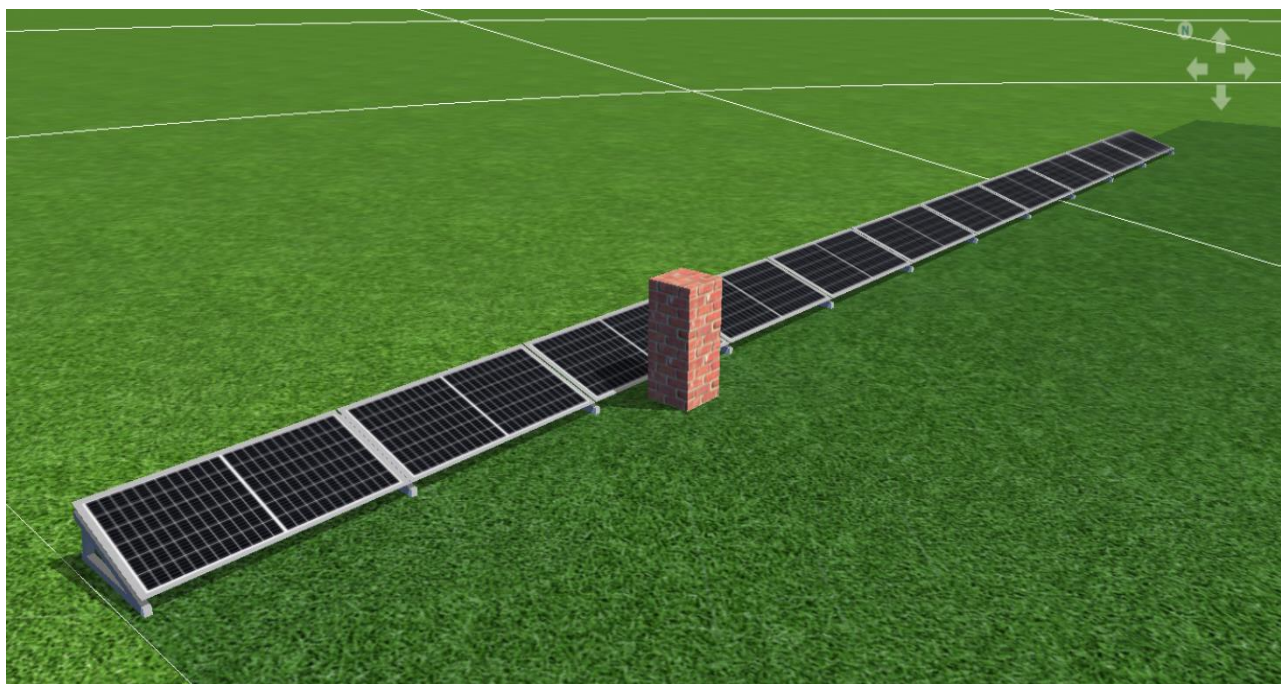
**30 pav.** Pagaminta el. energija per metus kWh/kW esant skirtingiems šešėliavimo atvejams

Iš gautų rezultatų 30 pav. matyti, jog šuntavimo diodai su šešėliais tvarkosi pakankamai gerai ir galios optimizatoriai priklausomai nuo šešėliavimo atvejo pagaminamą elektros energijos kiekį per metus padidina tik po ~36 kWh/kW arba 4,1 % kWh/kW per metus. 0 šešėliavimo atveju optimizatoriaus pagalba pagaminama 1,6 % daugiau kWh/kW per metus net ir nesant šešėlių. Taip yra dėl to, jog visų fotovoltinių modulių elektriniai parametrai minimaliai skiriasi, todėl optimizatoriai padeda išlaikyti kiekvieno individualaus fotovoltinio modulių generuojamą maksimalią galią. Atėmus 1,6 % dėl modulių parametrų išsibarstymo, galios optimizatorių nauda esant šešėliavimo sąlygoms dar labiau sumažėja.

### 2.1.2. Kintančio šešėlio atvejo modeliavimas

Anksčiau modeliuoti nekintantys šešėliai (per laiko tarpą nekeičiantys savo pozicijos modulių atžvilgiu), tačiau realybėje šešėliai kinta laiko atžvilgiu priklausomai nuo dienos ir metų laikotarpio. Todėl modeliuojamas tipinis šešėliavimo atvejis realiomis sąlygomis. Tai yra dažnai pasitaikantis šešėlis, realus atitinkmuo galėtų būti ant stogo esantis kaminas ar kondicionieriaus blokas. Fotovoltinių

modulių pasvirimo kampas 15 laipsnių. Nuo FV modulių 0,1 m atstumu pastatytas objektas, kurio plotis ir ilgis siekia po 0,5 m, aukštis 1 m (31 pav.).



**31 pav.** Realus šešėliavimo atvejo modelis

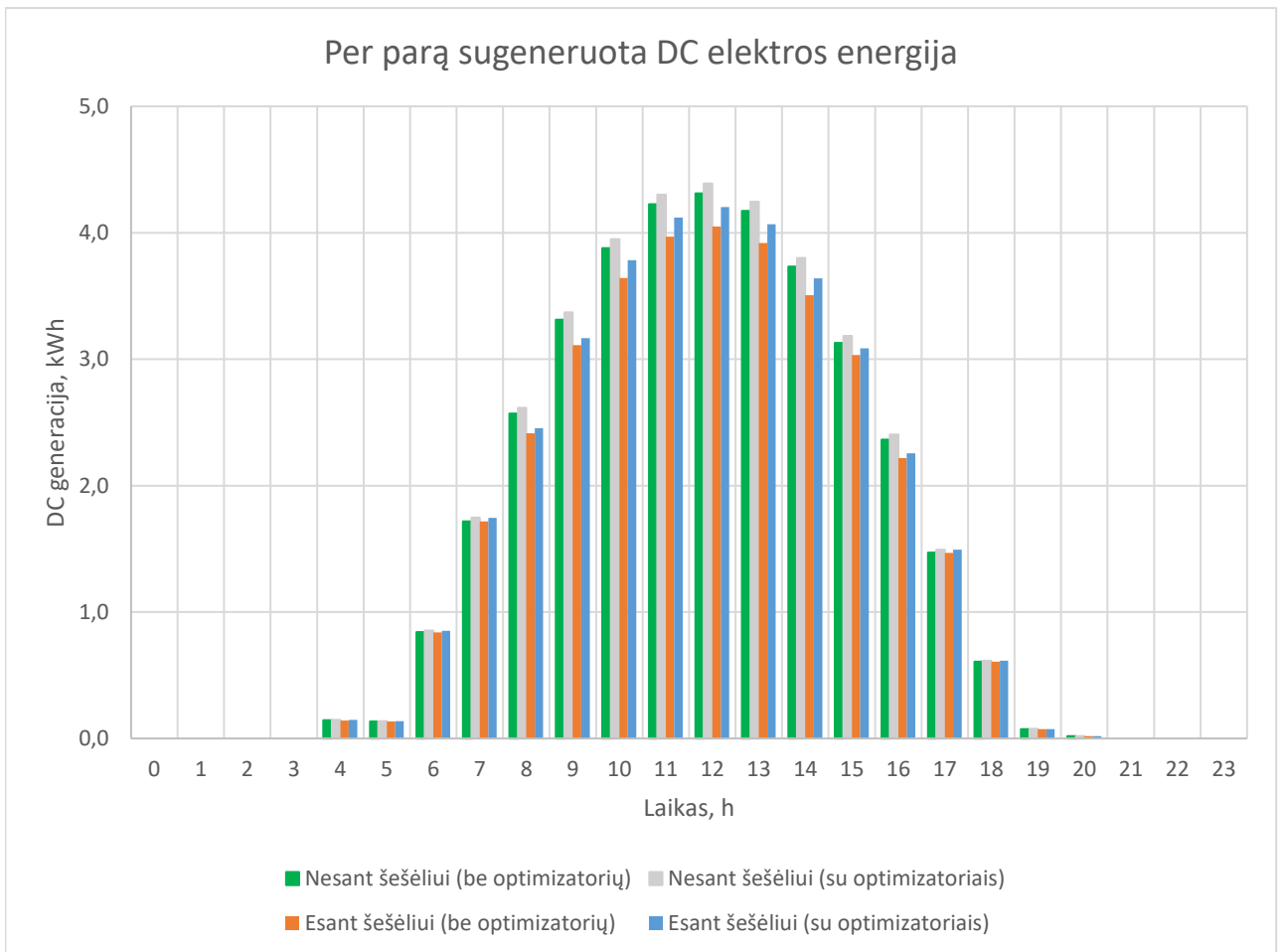
Kaip ir ankstesniame modeliavime pasirinkti Kauno miesto istoriniai 1996 – 2015 metų meteorologiniai duomenys ( $1034 \text{ kWh/m}^2$ ). Modeliuojami 11 į grupę sujungtų FV modulių *Swiss Solar IBEX 144MHC-COSMOS* 450 Wp (viso 4950 Wp). FV moduliai orientuoti idealiai į pietus, daugiau pašalinių šešėlių nėra. Modeliuojami 4 atvejai:

- Nesant šešėliui, FV moduliai be optimizatorių;
- Nesant šešėliui, FV moduliai su optimizatoriais;
- Esant šešėliui, FV moduliai be optimizatorių;
- Esant šešėliui, FV moduliai su optimizatoriais.

Atlikto vienos tipinės saulėtos vasaros dienos (birželio 4 d.) modeliavimo rezultatai pateikiami žemiau esančioje 1 lentelėje ir 32 pav. 1 lentelėje pateikiami skirtumai procentais ( $\Delta$ , %) kiekvieną valandą kiekvienam atvejui. Atskaitos taško variantas – nesant šešėliui (be optimizatorių).

**1 lentelė.** Realaus šėšėlio modeliavimo rezultatai ( $\Delta$ , % atskaitos taškas - nesant šėšėliui (be optimizatorių))

Valandos	Nesant šėšėliui (be optimizatorių), kWh	Skirtumas $\Delta$ , %	Nesant šėšėliui (su optimizatoriais), kWh	Skirtumas $\Delta$ , %	Esant šėšėliui (be optimizatorių), kWh	Skirtumas $\Delta$ , %	Esant šėšėliui (su optimizatoriais), kWh	Skirtumas $\Delta$ , %
0	0,00	-	0,00	0,0%	0,00	0,0%	0,00	0,0%
1	0,00	-	0,00	0,0%	0,00	0,0%	0,00	0,0%
2	0,00	-	0,00	0,0%	0,00	0,0%	0,00	0,0%
3	0,00	-	0,00	0,0%	0,00	0,0%	0,00	0,0%
4	0,14	-	0,15	1,7%	0,14	-1,1%	0,15	1,0%
5	0,14	-	0,14	1,7%	0,13	-1,0%	0,14	1,1%
6	0,84	-	0,85	1,4%	0,84	-0,2%	0,85	1,2%
7	1,72	-	1,75	1,6%	1,72	-0,1%	1,75	1,6%
8	2,57	-	2,62	1,7%	2,41	-6,1%	2,46	-4,5%
9	3,31	-	3,37	1,8%	3,11	-6,1%	3,17	-4,5%
10	3,88	-	3,95	1,8%	3,64	-6,1%	3,78	-2,5%
11	4,23	-	4,30	1,8%	3,97	-6,1%	4,12	-2,5%
12	4,31	-	4,39	1,8%	4,05	-6,1%	4,20	-2,5%
13	4,17	-	4,25	1,8%	3,92	-6,1%	4,07	-2,5%
14	3,73	-	3,80	1,8%	3,51	-6,1%	3,64	-2,5%
15	3,13	-	3,18	1,7%	3,03	-3,1%	3,09	-1,4%
16	2,36	-	2,40	1,7%	2,22	-6,1%	2,26	-4,5%
17	1,47	-	1,49	1,6%	1,47	-0,1%	1,49	1,5%
18	0,61	-	0,62	1,4%	0,61	-0,2%	0,62	1,3%
19	0,07	-	0,08	1,7%	0,07	-0,9%	0,08	1,1%
20	0,02	-	0,02	1,7%	0,02	-0,8%	0,02	1,1%
21	0,00	-	0,00	0,0%	0,00	0,0%	0,00	0,0%
22	0,00	-	0,00	0,0%	0,00	0,0%	0,00	0,0%
23	0,00	-	0,00	0,0%	0,00	0,0%	0,00	0,0%
<b>Viso:</b>	36,71	-	37,35	1,7%	34,86	-5,0%	35,86	-2,3%



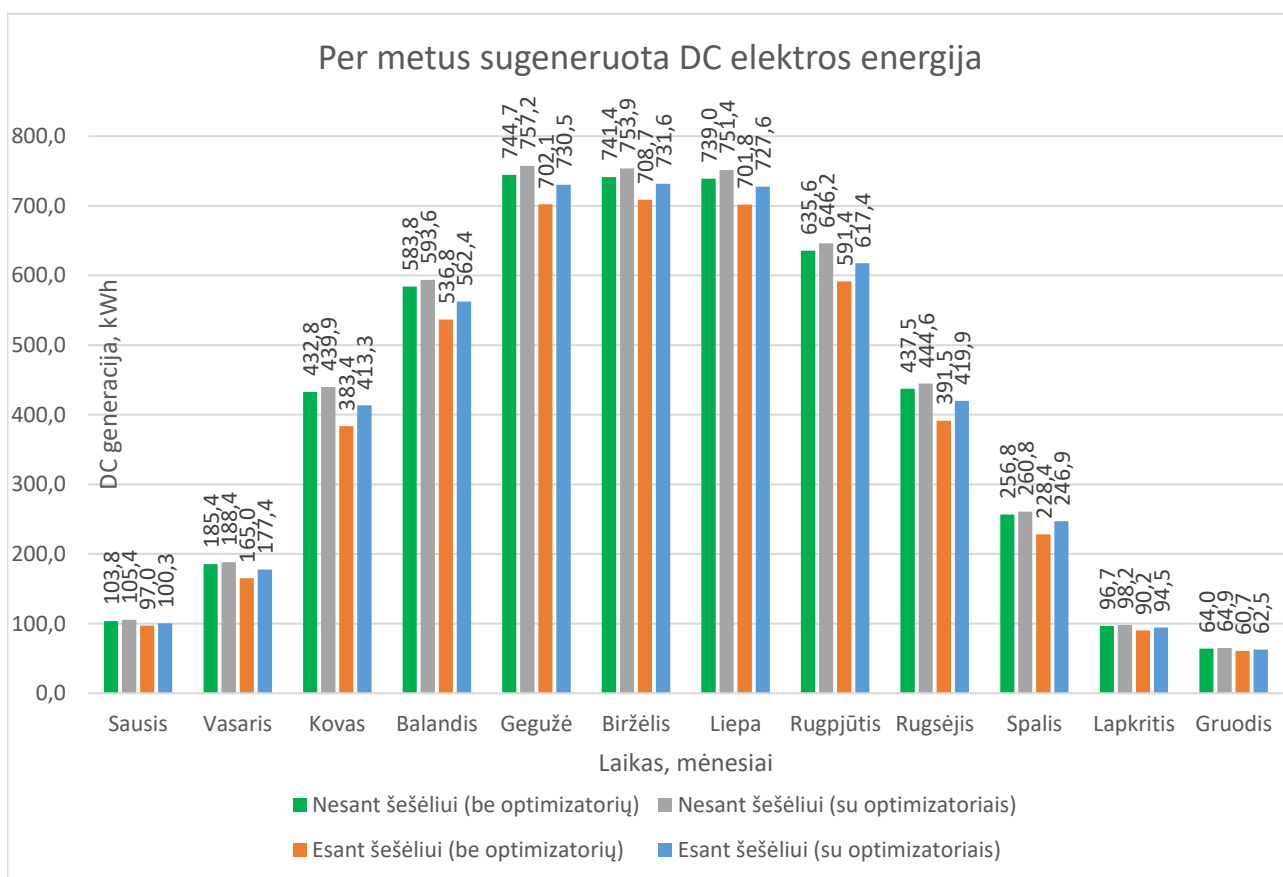
**32 pav.** Realių šešėliavimo atveju per parą sugeneruota DC elektros energija

Iš 1 lentelės matyti, jog nesant šešėliui kuomet FV moduliai be optimizatorių per dieną sugeneruota 36,71 kWh, o su optimizatoriais 37,35 kWh arba 1,7 % daugiau. Dėl modulių parametų išsibarstymo optimizatoriai leidžia kiekvienam FV moduliu dirbti nepriklausomai vienam nuo kito, o ne pagal prasčiausių parametų modulį. Todėl matoma, jog optimizatoriai 1,7 % padidina dienos generaciją eliminuodami nuostolius dėl modulių parametų išsibarstymo (angl. *mismatch effect*). Lyginant atvejį be šešėlio ir su šešėliu, moduliai be optimizatorių pagamino atitinkamai 36,71 kWh ir 34,86 kWh arba esant šešėliui 5 % mažiau. FV moduliams esant su optimizatoriais ir esant šešėliui pagamino 2,3 % mažiau lyginant su atveju be šešėlių ir be optimizatorių. O skirtumas esant šešėliui tarp atvejų be optimizatorių ir su optimizatoriais siekia 2,7 % optimizatorių naudai. Eliminavus 1,7 % generacijos padidėjimą dėl parametų išsibarstymo nuostolių, matyti, kad esant šešėliui per parą moduliai su galios optimizatoriais pagamina tik 1 % daugiau elektros energijos lyginant su šuntavimo diodų gebėjimu eliminuoti neigiamą šešėlio įtaką.

Taip pat atliktas visų metų modeliavimas. Rezultatai pateikiami pagal mėnesius žemiau esančioje 2 lentelėje ir 33 pav. 2 lentelėje pateikiami skirtumai procentais ( $\Delta$ , %) kiekvieną mėnesį kiekvienam atvejui. Atskaitos taško variantas – nesant šešėliui (be optimizatorių).

2 lentelė. Realus šėsėliu modeliavimo rezultatai ( $\Delta$ , % atskaitos taškas - nesant šėsėliui (be optimizatorių))

Mėnuo	Nesant šėsėliui (be optimizatorių), kWh	Skirtumas $\Delta$ , %	Nesant šėsėliui (su optimizatoriais), kWh	Skirtumas $\Delta$ , %	Esant šėsėliui (be optimizatorių), kWh	Skirtumas $\Delta$ , %	Esant šėsėliui (su optimizatoriais), kWh	Skirtumas $\Delta$ , %
Sausis	103,8	-	105,4	1,6%	97,0	-6,6%	100,3	-3,3%
Vasaris	185,4	-	188,4	1,6%	165,0	-11%	177,4	-4,3%
Kovas	432,8	-	439,9	1,6%	383,4	-11,4%	413,3	-4,5%
Balandis	583,8	-	593,6	1,7%	536,8	-8,1%	562,4	-3,7%
Gegužė	744,7	-	757,2	1,7%	702,1	-5,7%	730,5	-1,9%
Birželis	741,4	-	753,9	1,7%	708,7	-4,4%	731,6	-1,3%
Liepa	739,0	-	751,4	1,7%	701,8	-5%	727,6	-1,5%
Rugpjūtis	635,6	-	646,2	1,7%	591,4	-7%	617,4	-2,9%
Rugsėjis	437,5	-	444,6	1,6%	391,5	-10,5%	419,9	-4%
Spalis	256,8	-	260,8	1,6%	228,4	-11,1%	246,9	-3,8%
Lapkritis	96,7	-	98,2	1,5%	90,2	-6,7%	94,5	-2,2%
Gruodis	64,0	-	64,9	1,5%	60,7	-5,1%	62,5	-2,3%
Viso:	5021,5	-	5104,5	1,7%	4657,1	-7,3%	4884,2	-2,7%



33 pav. Realių šėsėliavimo atvejų per metus sugeneruota DC elektros energija

Iš 2 lentelės matyti, jog nesant šešėliui kuomet FV moduliai be optimizatorių per metus sugeneruota 5021,5 kWh, o su optimizatoriais 5104,5 kWh arba 1,7 % daugiau kaip ir 1 lentelėje lyginant vienos paros valandinę generaciją. Todėl matoma, jog optimizatoriai 1,7 % padidina metinę generaciją eliminuodami nuostolius dėl modulių parametrų išsibarstymo (angl. *missmatch effect*). Lyginant atvejį be šešėlio ir su šešėliu, moduliai be optimizatorių pagamino atitinkamai 5021,5 kWh ir 4657,1 kWh arba esant šešėliui 7,3 % mažiau. FV moduliams esant su optimizatoriais ir esant šešėliui pagamino 2,7 % mažiau lyginant su atveju be šešėlių ir be optimizatorių. O skirtumas esant šešėliui tarp atvejų be optimizatorių ir su optimizatoriais siekia 4,6 % optimizatorių naudai. Eliminavus 1,7 % generacijos padidėjimą dėl parametrų išsibarstymo nuostolių matyti, kad esant šešėliui per metus moduliai su galios optimizatoriais pagamina 2,9 % daugiau elektros energijos lyginant su šuntavimo diodų gebėjimu eliminuoti neigiamą šešėlio įtaką.

## 2.2. Tyrimas

Tyrimas atliekamas su 29,7 kW saulės elektrine (34 pav.), kuri pastatyta ant įmonės stogo 2021 metais. Elektrinę sudaro 2 vnt. *Fronius Symo 10.0-3-M* ir 1 vnt. *Sofar Solar 11KLX-G3* įtampos keitikliai, 66 vnt. *Swiss Solar IBEX 144MHC-COSMOS 450 Wp* fotovoltinių modulių. Moduliai sujungti į 6 grupes po 11 modulių. Laikančioji konstrukcija balastinė, su 15 ir 30 laipsnių pasvirimo kampais skirtingoms modulių grupėms. Elektrinė orientuota pietvakarių kryptimi, azimutas maždaug 234°.



34 pav. Tiriama 29,7 kW saulės elektrinė

Tyrimė naudojama įranga:

- *Fronius Symo 10.0-3-M* 10 kW keitiklis;
- 11 į grupę sujungtų *Swiss Solar IBEX 144MHC-COSMOS* 450 Wp modulių;
- *UNI-T M890C+* multimetras;
- *UNI-T UT210E* srovės matavimo replės;
- *Tigo TS4-A-0* 700W galios optimizatorius;

### 2.2.1. 10-ties šešėliavimo variantų tyrimas

Tyrimas buvo atliekamas keletą dienų, esant absoliučiai giedram dangui, 12-14 valandomis siekiant, kad elektrinė dirbtų kuo arčiau savo maksimalios galios. Bandymų metu vėjo greitis siekė 5-6 m/s, aplinkos temperatūra 20-21 °C, apšvieta 850-900 W/m<sup>2</sup>. Ant į grupę sujungtų fotovoltinių modulių atliekant bandymus nekrito jokie pašaliniai šešėliai. Fotovoltiniai moduliai turi 3 šuntavimo diodus.



35 pav. Tyrimo atlikimas

Bandymai buvo atliekami 10-čiai šešėliavimo variantų, kurie pavaizduoti 23 pav. Bandymai atlikti be galios optimizatorių siekiant patikrinti kaip su neigiama šešėliavimo įtaka susitvarkys šuntavimo diodai ir su galios optimizatoriais. Celės buvo uždengiamos tiksliai ir stebimi nuolatinės srovės ir įtampos pokyčiai. Matavimai vienam variantui buvo atliekami 10-30 s, kadangi buvo atveju, kuomet

įtampa niekaip nenusistovėdavo. Įtampa ir srovė matuota ties tiriamojo modulio pliuso ir minuso išėjimo laidais. Gauti rezultatai pateikiami 1 lentelėje (0 variantas – be šešėlių).

**3 lentelė.** 1-10 šešėliavimo atvejų tyrimo rezultatai

Šešėliavimo variantas	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Šuntavimo diodų rezultatai</b>											
$I_{DC}, A$	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
$U_{DC}, V$	40	26,2	-1,2	26,2	12,6	-1,2	-1,2	-1,2	35-38	39	-1,2
<b>Galios optimizatorių rezultatai</b>											
$I_{DC}, A$	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
$U_{DC}, V$	38-39	24-25	6,5	24-25	10,3	6,7	6,7	6	37-38	37-38	-0,9

### 10-ties šešėliavimo variantų šuntavimo diodų tyrimo rezultatai

Iš 3 lentelėje gautų bandymų su šuntavimo diodais rezultatų matyti, jog krentantys šešėliai ant fotovoltinio modulio celių nedaro įtakos srovei. Modulio darbinė įtampa prie standartinių sąlygų ( $STC$ ) yra 41 V, pagal 0 variantą be šešėlių matyti, jog buvo pasiekta 40 V darbinė įtampa.

Pagal krintančią įtampą akivaizdu, kad krintant šešėliui bent ant vienos celės (1, 3 atvejai), atsijungia visa celių grupė (1 iš 3 grupių) ir įtampa sumažėja atitinkamai 1/3. Atitinkamai įtampa sumažėja 2/3 krentant šešėliams ant 2 iš 3 celių grupių (4 atvejais). Ir nepriklausomai kiek celių uždengiama, jei bent viena celė iš visų 3 celių grupių šešėliuojama – atsijungia visas fotovoltinis modulis ir srovė apeina modulio 3 celių grupes per 3 šuntavimo diodus (2, 5, 6, 7 ir 10 atvejai).

Taip pat iš bandymų matyti, jog srovei tekant per šuntavimo diodą atsiranda 0,4 V įtampos kritimas. Srovei apeinant visas celių grupes įtampa krinta iki -1,2 V kaip ir matyti iš 1 lentelėje pateiktų rezultatų. Atitinkamai vienas dirbantis diodas visos modulių grupės generuojamą galią sumažina tik 3 W, t.y. ne tik visos modulių grupės įtampa sumažėja 40 V, bet ir dar papildomai sumažėja 1,2 V dėl įtampos kritimo srovei tekant per diodus. Srovė nekinta, todėl atitinkamai kiek diodų dirba, įtampa visoje modulių grupėje sumažėja po 13,4 V.

Taip pat iš gautų rezultatų matyti, jog 8 ir 9 atveju krintant siauram šešėliui (iki 1 cm pločio), srovė šešėliuojamų celių grupių neapeina per šuntavimo diodus. 8 šešėliavimo atveju pastebėta, jog įtampa svyravo daug didesne amplitude (~4 V) nei kitais atvejais. Galimai krentant tokio tipo šešėliui sutrinka maksimalaus galios taško sekimas įtampos keitiklyje, todėl įtampa kinta daug didesne amplitude nei kitais atvejais. 9 šešėliavimo atveju įtampa nekito, o laikėsi 1 V mažesnė nei nesant šešėlių dėl modulio celėms tenkančios mažesnės apšvietos.

### 10-ties šešėliavimo variantų galios optimizatoriaus tyrimo rezultatai

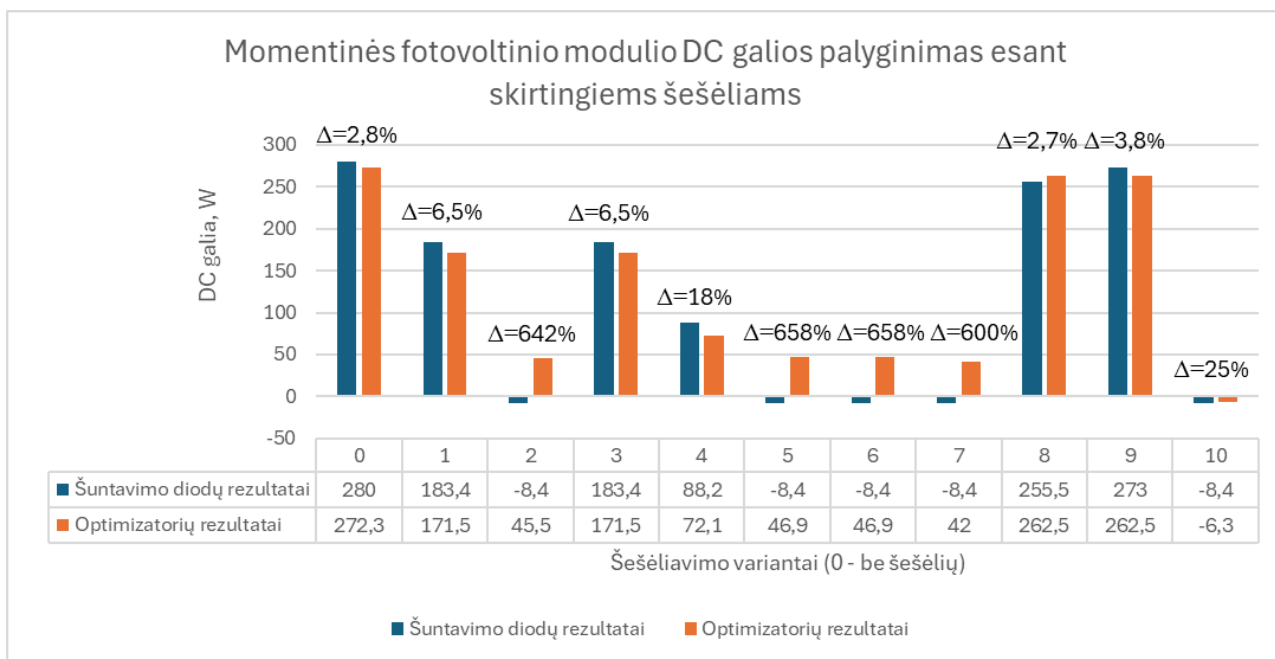
Iš 3 lentelėje gautų bandymų rezultatų su galios optimizatoriumi matyti, jog krentantys šešėliai ant fotovoltinio modulio celių nedaro įtakos srovei. Pagal 0 variantą be šešėlių matyti, jog buvo pasiekta 38-39 V darbinė įtampa, 1-2 V mažesnė nei atvejais be galios optimizatoriaus (kadangi naudojamas *Tigo TS4-A-0 700W* optimizatorius yra žeminantysis). Pastebėta, jog atvejais, kuomet bandymai atliekami su optimizatoriumi įtampos svyravimas didesnis. Taip pat pastebėta, jog atsiradus šešėliui, įtampa krinta gerokai daugiau nei atvejais be galios optimizatoriaus. Po kelių akimirų po truputi įtampa didėja (po 6-9V) ir nusistovi. Lentelėje pateikti nusistovėjusių įtampos verčių rezultatai.

Galimai įtampa labiau svyruoja dėl sutrikusio maksimalaus galios taško sekimo įtampos keitiklyje. Taip pat įtampa didėja ir po kurio laiko nusistovi galimai dėl galios optimizatoriuje esančių kondensatorių.

Pagal krintančią įtampą akivaizdu, kad krintant šešėliui bent ant vienos celės (1, 3 atvejai), atsijungia visa celių grupė (1 iš 3 grupių) ir įtampa sumažėja, tačiau sumažėjimas vienais atvejais didesnis, o kitais mažesnis nei atvejais be optimizatorių. 0, 1, 3 ir 9 atvejais įtampa mažesnė su optimizatoriumi, todėl galima daryti išvadą, kad šiems šešėliavimo atvejams galios optimizatorius sumažina generuojamą galią. Taip yra dėl to, jog dėl šešėlio atsiradę nuostoliai yra mažesni nei pats galios optimizatorius geba juos kompensuoti atsverdama savo suvartojamą energiją. Todėl reikia turėti omenyje, kad pats galios optimizatorius vartoja energiją. 2, 4, 5, 6, 7 ir 8 atvejais įtampa didesnė nei be galios optimizatoriaus, todėl bendra generuojama galia taip pat didesnė – optimizatorius padidina generuojamą galią. Pavyzdžiui kai srovė apeina visas celių grupes per 3 šuntavimo diodus (5 ir 6 atvejai), optimizatorius geba palaikyti 6,7 V įtampą, kas būtų apie 47 W arba apie 49 % daugiau nei atvejais be optimizatoriaus.

### 10-ties šešėliavimo variantų momentinės fotovoltinio modulio generuojamos DC galios tyrimo rezultatai

Apskaičiuota modulio generuojama momentinė DC galia esant skirtingiems šešėliavimo atvejams. Rezultatai pateikti 36 pav.



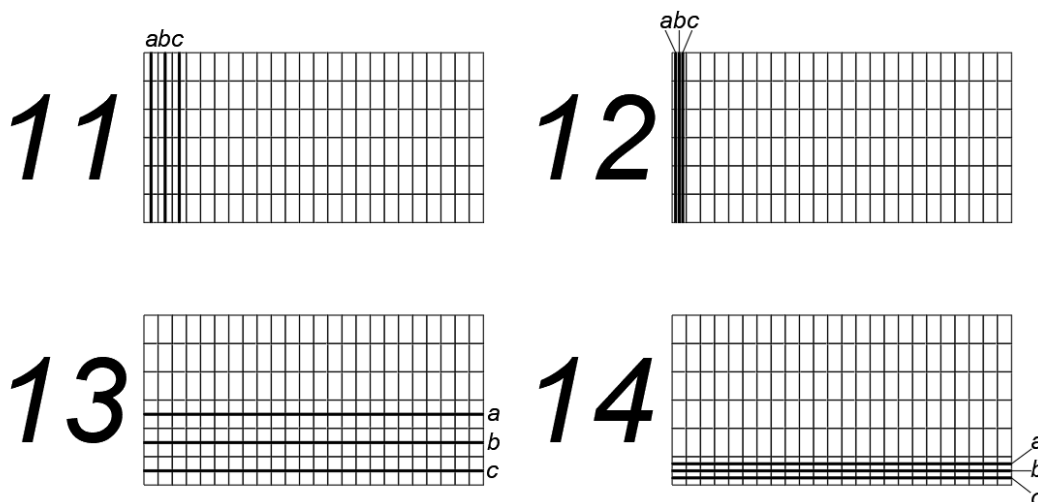
**36 pav.** Momentinės fotovoltinio modulio generuojamos DC galios palyginimas esant skirtingiems šešėliams

Iš 36 pav. matyti, kad be šešėlių (0 variantas) fotovoltinis modulis generuoja 2,8 % daugiau galios, kadangi pats optimizatorius vartoja elektros energiją. 1, 3 ir 4 šešėliavimo atvejais modulis generuoja kiek didesnę DC galią nei, kad su galios optimizatoriumi. T.y. šuntavimo diodai eliminuoja šešėlių neigiamą įtaką generacijai efektyviau nei optimizatorius. Vis tik ekstremalaus šešėliavimo atvejais, kai šuntavimo diodų pagalba srovė apeina visas tris modulio celių grupes (2, 5, 6, 7) galios optimizatorius geba pakelti įtampą 6-7 voltais (1 lentelė), todėl tuo metu generuojama apie 50-55 W daugiau arba 600-658 % daugiau nei be galios optimizatoriaus. Vis tik toks didelis skirtumas

procentais yra tik esant ekstremaliems šešėliavimo atvejais ir 50 W geresnis rezultatas ir lyginant su grupėje likusių nešešėliuojamų modulių generacija (apie 2800 W) optimizatorius padidina visos grupės generuojamą DC galią tik ~1,8 %. 10 šešėliavimo atveju galios optimizatorius sumažina 25 % krentančia įtampą dėl srovės tekėjimo per šuntavimo diodus. Vis tik šiuo atveju irgi skirtumas yra tik 2 W, todėl skirtumas yra nykstantai mažas ir nedaro įtakos visai grupės generacijai. 8 ir 9 atvejais įtampa svyravo didesne amplitude nei kitais šešėliavimo atvejais, todėl nustatyti momentinę galią sudėtinga. Tačiau faktas, kad didelio ir apčiuopiamo skirtumo tarp galios optimizatoriaus ir šuntavimo diodų efektyvumo nėra krintant tokio tipo šešėliams.

### 2.2.2. Papildomi bandymai su siaurais šešėliais (11-14 šešėliavimo variantai)

Pastebėjus, jog esant 8 ir 9 šešėliavimo variantams šuntavimo diodai nesuveikia, nutarta atlikti daugiau panašių bandymų. Todėl atliekami papildomi bandymai esant 11-14 šešėliavimo atvejams (37 pav.). Kiekvienas šešėliavimo atvejis dar skirstomas į a, b ir c variantus. T.y. a variantas viena siaura (iki 1 cm) juosta, ab – 2 juostos, o abc – 3 juostos. 11 ir 13 atvejais po vieną juostą kiekvienai celių eilei, o 12 ir 14 atvejais trys šešėlių juostos sudaromos vienoje celių eilėje.



37 pav. Tiriama šešėliavimo atvejai (11-14 variantai)

Tyrimas buvo atliekamas keletą dienų, esant absoliučiai giedram dangui, 12-14 valandomis siekiant, kad elektrinė dirbtų kuo arčiau savo maksimalios galios. Bandymų metu vėjo greitis siekė 7-8 m/s, aplinkos temperatūra 14-15 °C, apšvieta 850-900 W/m<sup>2</sup>. Ant į grupę sujungtų fotovoltinių modulių atliekant bandymus nekrito jokie pašaliniai šešėliai.

Tyrimas atliekamas be ir su optimizatoriumi ant šešėliuojamo modulio. Gauti rezultatai pateikiami 2 lentelėje. 0 atvejis – be šešėlių.

**4 lentelė.** 11-14 šešėliavimo atvejų tyrimų rezultatai

Šešėliavimo variantas	0	11a	11ab	11abc	12a	12ab	12abc
<b>Šuntavimo diodų rezultatai</b>							
$I_{DC}$ , A	7,8	7,7	7,5	7,2	7,7	7,4	7,1
$U_{DC}$ , V	42	41-42	37-41	34-41	41-42	40-42	39-40
<b>Galios optimizatorių rezultatai</b>							
$I_{DC}$ , A	7,8	7,5	7,3	7	7,4	7,2	7
$U_{DC}$ , V	41	34-38	32-38	31-36	38	33-35	32-35
<b>Šešėliavimo variantas</b>							
Šešėliavimo variantas	0	13a	13ab	13abc	14a	14ab	14abc
<b>Šuntavimo diodų rezultatai</b>							
$I_{DC}$ , A	8,2	8	8	8	8,2	8,2	8,2
$U_{DC}$ , V	46	44	44	44	45	40-46	40-46
<b>Galios optimizatorių rezultatai</b>							
$I_{DC}$ , A	8,2	7,2	7,2	7,2	8,2	8,2	8,2
$U_{DC}$ , V	45	36	35	35	36	35	34

Iš 2 lentelėje pateiktų rezultatų matyti, jog tiek su viena siauro šešėlio juosta (iki 1 cm pločio), tiek su dviem, tiek su trimis šešėlio juostomis šuntavimo diodai nesuveikia. Taip pat nepriklausomai ar šešėlis koncentruojamas į vieną celių eilę, ar į skirtingas celių eiles šuntavimo diodai nesuveikia.

11 ir 12 atvejais, kai šešėliai orientuojami skersai modulio, įtampa pradeda svyruoti 1-5 V. Kuo daugiau šešėlių juostų, tuo labiau įtampa krenta ir tuo didesne amplitudė svyruoja. Taip pat krenta modulio srovė dėl sumažėjusios apšvietos, todėl atitinkamai sumažėja ir visų į grupę sujungtų modulių srovė. Kadangi modulio celės yra sujungtos į 3 celių grupes kaip pavaizduota 6 pav., didesni galios nuostoliai patiriami, kai šešėliai koncentruojami vienoje celių eilėje, o ne skirtingose eilėse (atitinkamai 11 ir 12 šešėliavimo atvejais), kadangi šešėlis koncentruojamas ant visų 3 celių grupių. 11 ir 12 šešėliavimo atvejais su galios optimizatoriumi generuojama mažesnė momentinė galia, kadangi tiek įtampa, tiek tekanti srovė yra mažesnė nei atvejais be optimizatoriaus.

13 ir 14 atvejais, kai šešėliai orientuojami išilgai modulio, įtampa beveik nebesvyruoja (išskyrus 12ab ir 12abc atvejus, kadangi greičiausiai sutrinkta maksimalaus galios taško sekimas įtampos keitiklyje), tačiau pridėdant po vieną papildomą šešėlio juostą vis mažėja. Taip pat ant modulio krentant 1, 2 ar 3 juostų šešėliui srovė išlieka vienoda, tačiau koncentruojant šešėlius į vieną celių eilę srovė sumažėja mažiau, nei koncentruojant į 3 eiles. Kaip ir 11 ir 12 atvejais, taip ir 13 ir 14 atvejais generuojama DC galia be galios optimizatoriaus yra didesnė.

## Išvados

1. Sukūrus modelį ir atlikus modeliavimą matyti, jog krentant šešėliui bent ant vienos celės per šuntavimo diodą srovė apeina 1 iš 3 šešėliuojamų celių grupę. Dirbant šuntavimo diodui krenta FV modulio įtampa. Pagal PV ir IV kreives matoma, jog visais atvejais optimizatorius padidina maksimalų tašką ( $P_{max}$ ) didindamas srovę arba įtampą, tačiau PV ir IV charakteristikos su optimizatoriais pagerinamos minimaliai. Visais šešėliavimo atvejais su optimizatoriais pagaminamas elektros energijos kiekis esant nekintantiems šešėliams per metus padidinamas ~36 kWh/kW arba 4,1 % kWh/kW per metus.
2. Sukurtas modelis ir atliktas modeliavimas esant standartiniam kintančiam šešėliui. Esant šešėliui be optimizatorių sugeneruojama 7,3 % mažiau DC elektros energijos lyginant su atveju be šešėlio. O skirtumas esant šešėliui tarp atvejų be optimizatorių ir su optimizatoriais siekia 4,6 % optimizatorių naudai. Eliminavus 1,7 % generacijos padidėjimą dėl parametų išsibarstymo nuostolių gauta, kad esant šešėliui per metus moduliai su optimizatoriais pagamina 2,9 % daugiau nei be optimizatorių.
3. Atlikus tyrimą įvairiems šešėliavimo atvejams nustatyta, jog krentant šešėliui bent ant vienos celės, srovė apeina celių grupę per šuntavimo diodą. Taip pat nustatyta, jog šuntavimo diodas nesuveikia krintant 1, 2 ar 3 siauriems (iki 1 cm pločio) šešėliams ant FV modulio, todėl dėl mažesnės apšvietos mažėja ir srovė, neigiamai veikdama ir kitus į grupę sujungtus modulius. Vienais šešėliavimo atvejais optimizatorius palaiko didesnę modulio įtampą, kitais atvejais mažesnę.
4. Srovei tekant per šuntavimo diodą atsiranda 0,4 V įtampos kritimas. Vienas dirbantis šuntavimo diodas sumažina modulio ir visos grupės įtampą 13,4 V, o srovė nekinta. Daugumoje atvejų su optimizatoriumi modulio įtampa krinta 1-2 V. Kai šuntavimo diodų pagalba srovė apeina visas tris modulio celių grupes optimizatorius geba pakelti įtampą 6-7 V, todėl generuojama apie 50-55 W arba 600-658 % daugiau nei be galios optimizatoriaus. Tačiau lyginant su grupėje likusių nešešėliuojamų modulių generacija optimizatorius padidina visos grupės generuojamą DC galią tik ~1,8 %. Krintant šešėliams ant FV modulio didelio ir apčiuopiamo skirtumo tarp galios optimizatoriaus ir šuntavimo diodų efektyvumo nėra.

## Literatūros sąrašas

1. European Commission. Causes of climate change. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2024-04-14]. Prieiga per internetą: [https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change\\_en](https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_en)
2. International Solar Energy Society (ISES) (2024). Make PV modules as cheap as possible, but not cheaper. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2024-04-14]. Prieiga per internetą: <https://www.pv-magazine.com/2024/01/03/make-pv-modules-as-cheap-as-possible-but-not-cheaper/>
3. Sara Matasci (2022). How solar panel cost and efficiency have changed over time. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2024-04-14]. Prieiga per internetą: <https://www.energysage.com/solar/solar-panel-efficiency-cost-over-time/>
4. Gilbert M. Masters (2004). Renewable and Efficient Electric Power Systems. Stanford University, Unites States of America.
5. G. N. Tiwari ir Swapnil Dubey (2010). Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications. Centre for Energy Studien, Indian Institute of Technology (ITT), Delhi, New Delhi, India.
6. Fronius International GmbH (2023). The Impact of Shading on a PV System. Whitepaper.
7. Gytis Petrauskas ir Vytautas Adomavičius (2012). Saulės energijos naudojimas elektrai gaminti: mokomoji knyga. Kaunas, Technologija.
8. Jason Svarc (2024). Most efficient solar panels 2024. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2024-04-22]. Prieiga per internetą: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/most-efficient-solar-panels>
9. Jacob Marsh (2024). Monocrystalline vs. Polycrystalline solar panels. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2024-04-22]. Prieiga per internetą: <https://www.energysage.com/solar/monocrystalline-vs-polycrystalline-solar/>
10. Priyanka Roy, Numeshwar Kumar Sinha, Sanjay Tiwari, Ayush Khare (2020). A review on perovskite solar cells: Evolution of architecture, fabrication techniques, commercialization issues and status. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2024-04-22]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X20300888>
11. Jason Svarc (2024). Most powerful solar panels 2024. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2024-04-22]. Prieiga per internetą: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/most-powerful-solar-panels>
12. Ana Almerini (2024). What is half-cut solar cell technology? [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2024-04-22]. Prieiga per internetą: <https://www.solarreviews.com/blog/half-cut-solar-cell-technology-explained>
13. Shading Effect on output of Solar PV system. DS New Energy. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2023-05-21]. Prieiga per internetą: <https://www.dsnerg.com/info/shading-effect-on-output-of-solar-pv-system-50631996.html>
14. Alternative Energy Tutorials. Bypass Diode for Solar Panel Protection. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2023-06-25]. Prieiga per internetą: <https://www.alternative-energy-tutorials.com/photovoltaics/bypass-diode.html>
15. Minh Quan Duong, Gabriela Nicotela Sava, Gabriela Ionescu, Horia Necula, Sonia Leva ir Marco Mussetta (2017). Optimal Bypass Diode Configuration for PV Arrays under Shading Influence. The Institute of Electrical and Electronics Engineers.
16. Haider Ibrahim ir Nader Anani (2019). Variation of the performance of a PV panel with the number of bypass diodes and partial shading patterns. 5th International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies (PGSRET).

17. Pieter Bauwens, Jan Doutreloigne (2014). Reducing partial shading power loss with an integrated Smart Bypass. Solar Energy.
18. Romenia G. Vieira, Fabio M. U. de Araujo, Mahmoud Dhinish ir Maria I. S. Guerra (2020). A Comprehensive Review on Bypass Diode Application on Photovoltaic Modules. Energies.
19. Sandhya Prajapati ir Eugene Fernandez (2020). Effect of the Positioning of Single and Double Bypass Diodes in a PV String on its Reliability. International Conference on Computer, Electrical and Communicaton Engineering.
20. Laamami Samah, Abid Aicha, Benhamed Mouna ir Sbita Lassaad (2020). Investigation on Protection Diodes in PV Generator. 17th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices.
21. Kamran Ali Khan, Yongheng Yang, Hassan A Khan, Dezso Sera (2019). Performance Benchmark of Bypassing Techniques for Photovoltaic Modules. The Institute of Electrical and Electronics Engineers.
22. Nicoas Muller, Jorge Barria ir Lorenzo Reyes-Chamorro (2021). Flexible Power Point Tracking for Active Power Regulation in String-Inverter PV Plants with Power Optimizers. 2021 6th IEEE Workshop on the Electronic Grid (eGRID).
23. Qin Wang, Wei Yao, Jiakun Fang ir Mengyao Xu (2022). Dynamic Characteristics Analysis of Distributed PV Plants with Panel-level DC Optimizers Under Severe Partial Shading Conditions. 2022 7th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE).
24. Galios optimizatoriai. Giminija. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2023-05-29]. Prieiga per internetą: <https://www.giminija.lt/galios-optimizatoriai/>
25. Sandra Enkhardt (2022). Study confirms rule of thumb that PV inverters should run without fault for around 15 years. PV Magazine. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2024-04-29]. Prieiga per internetą: <https://www.pv-magazine.com/2022/07/15/study-confirms-rule-of-thumb-that-pv-inverters-should-run-without-faults-for-around-15-years/>
26. Mahuammad Afridi, Sai Tatapudi, Jack Flicker, Devarajan Srinivasan, Govindasamy Tamizhmani (2023). Reliability evaluation of DC power optimizers for photovoltaic systems: Accelerated testing at high temperatures with fixed and cyclic power stresses. Engineering Failure Analysis.
27. Olivia Lowden (2023). The top 10 companies in the power optimizers industry. BCC Research. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2024-03-17]. Prieiga per internetą: <https://blog.bccresearch.com/10-companies-in-the-power-optimizers-industry>
28. Ava Cohen (2023). Solar Innovation Unveiled: Top 10 Companies Revolutionizing Microinverters & Optimizers. Verified Market Reports. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2024-03-17]. Prieiga per internetą: <https://www.verifiedmarketreports.com/blog/top-10-solar-microinverter-and-power-optimizer-companies/>
29. G. R. Walker ir P. C. Sernia (2002). Cascaded DC-DC Converter Connection of Photovoltaic Modules. School of Information Technology and Electrical Engineering University of Queensland.
30. Ahmed Elmelegi, Mokhtar Aly, Emad M. Ahmed, Mohammed M. Alhaider (2019). An Efficient Low-Cost Distributed MPPT Method for Energy Harvesting in Grid-Tied Three-Phase PV Power Optimizers. 21 st International Middle East Power Systems Conference (MEPCON).

31. Application Note: SolarEdge Fixed String Voltage, Concept of Operation (2019). SolarEdge. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2024-04-23]. Prieiga per internetą: [https://knowledge-center.solaredge.com/sites/kc/files/se\\_application\\_fixed\\_string\\_voltage.pdf](https://knowledge-center.solaredge.com/sites/kc/files/se_application_fixed_string_voltage.pdf)
32. Xinghu Zhang, Min Chen, Yutai Fu ir Yonghao Li (2018). A Step-Down Partial Power Optimizer Structure for Photovoltaic Series-Connected Power Optimizer System. The Institute of Electrical and Electronics Engineers.
33. Hoe-Gil Lee, Jash N Shah, Panshul Tyagi ir Vigneshwar M (2018). Analysis of Partial Shading Effects of Solar PV Module Configurations Using MATLAB/Simulink. American Journal of Energy Research.
34. Huiying Zheng (2014). Design of Bypass Diodes in Improving Energy Extraction of Solar PV Systems under Uneven Shading Conditions. The Institute of Electrical and Electronics Engineers.
35. Yaw-Juen Wang ir Shu-Syuan Lin (2012). Analysis of a Partially Shaded PV Array Considering Different Module Connection Schemes and Effects of Bypass Diodes. The Institute of Electrical and Electronics Engineers.
36. Kamran Ali Khan Niazi, Yongheng Yang, Dezso Sera (2019). Review of mismatch mitigation techniques for PV modules. The Institution of Engineering and Technology.
37. Perry Tsao, Sameh Sarghan ir Ismail Jorio (2009). Distributed max power point tracking for photovoltaic arrays. The Institute of Electrical and Electronics Engineers.
38. PVSOL Premium 2024. Valentin Software. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2024-05-05]. Prieiga per internetą: <https://valentin-software.com/en/products/pvsol-premium/>
39. Swiss Solar IBEX 144MHC-COSMOS 450 Wp. Techninė specifikacija. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2024-05-05]. Prieiga per internetą: <https://www.ensolar.com/pv/panel-datasheet/crystalline/46456>
40. Tigo TS4-A-0 700W. Techninė specifikacija. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2024-05-05]. Prieiga per internetą: <https://www.tigoenergy.com/product/ts4-a-o>

## Priedai

### 1 priedas. Tiriamo fotovoltinio modulio Swiss Solar IBEX 144MHC-COSMOS 450 Wp [39] techninė specifikacija;



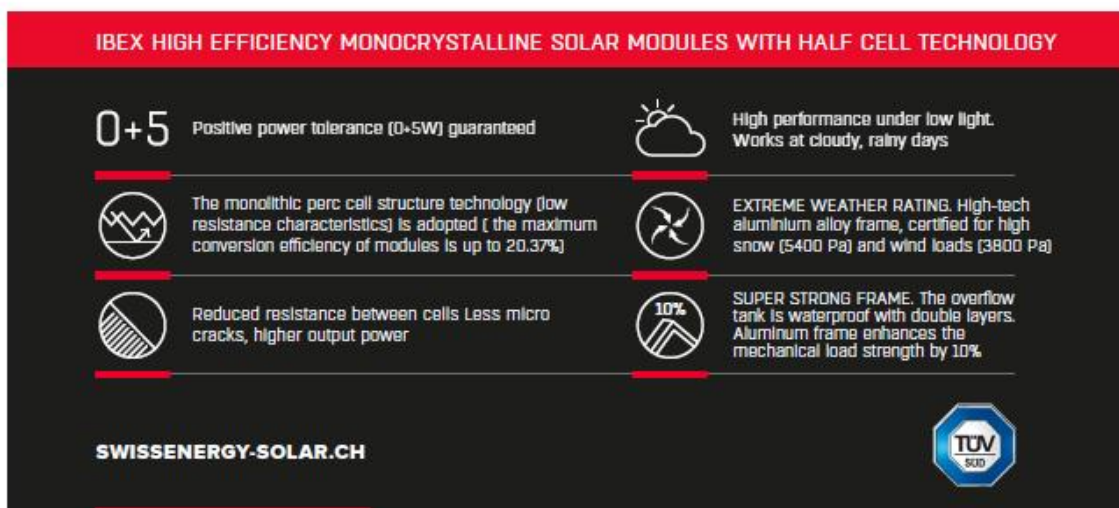
The advertisement features a large, detailed image of a solar panel on the left, set against a red background with a mountain range. The text 'swiss solar' is prominently displayed at the top left, with 'QUALITY TECHNOLOGY' and 'ENGINEERED IN SWITZERLAND' to its right. The word 'SOLAR' is written in large, stylized letters across the middle. Below the panel, the model name 'IBEX-144MHC COSMOS' and dimensions '440/445/450' are listed. A box labeled 'IBEX' contains the text 'HIGH TECHNOLOGY SOLAR MODULES'. At the bottom, it identifies the module as a '9BB HALF-CELL MONO PV MODULE'.

**swiss solar** QUALITY TECHNOLOGY ENGINEERED IN SWITZERLAND

**IBEX** HIGH TECHNOLOGY SOLAR MODULES

**IBEX-144MHC  
COSMOS**  
440/445/450

**9BB** HALF-CELL MONO PV MODULE




This section provides technical specifications for the IBEX solar modules, organized into six categories with icons and brief descriptions. The background is dark with red accents.

**IBEX HIGH EFFICIENCY MONOCRYSTALLINE SOLAR MODULES WITH HALF CELL TECHNOLOGY**

- 0+5** Positive power tolerance (0+5W) guaranteed
- High performance under low light.** Works at cloudy, rainy days
- The monolithic perc cell structure technology (low resistance characteristics) is adopted ( the maximum conversion efficiency of modules is up to 20.37%)
- EXTREME WEATHER RATING.** High-tech aluminium alloy frame, certified for high snow (5400 Pa) and wind loads (3800 Pa)
- Reduced resistance between cells Less micro cracks, higher output power
- 10%** **SUPER STRONG FRAME.** The overflow tank is waterproof with double layers. Aluminum frame enhances the mechanical load strength by 10%

**SWISSENERGY-SOLAR.CH**



# IBEX 144MHC-COSMOS 440-450

MONOCRYSTALLINE SOLAR MODULE

ELECTRICAL DATA AT STC			
Rated power P <sub>mpp</sub> [Wp]	440	445	450
P <sub>mpp</sub> range to	0/+5W	0/+5W	0/+5W
Rated current I <sub>mpp</sub> [A]	10.78A	10.88A	10.98A
Rated voltage V <sub>mpp</sub> [V]	40.80V	40.90V	41.00V
Short-circuit current I <sub>sc</sub> [A]	11.34A	11.45A	11.55A
Open-circuit voltage U <sub>oc</sub> [V]	49.60V	49.70V	49.80V
Efficiency at STC up to	19.92%	20.14%	20.37%
Application Class	Class A	Class A	Class A

Specification as per STC (Standard test conditions): Irradiance 1000 W/m<sup>2</sup> | module temperature 25°C | Air Mass = 1.5

ELECTRICAL DATA AT NOCT			
Power at P <sub>mpp</sub> [Wp]	327.90	331.60	335.30
Rated current I <sub>mpp</sub> [A]	8.73	8.81	8.89
Rated voltage V <sub>mpp</sub> [V]	37.50	37.60	37.70
Short-circuit I <sub>sc</sub> [A]	9.16	9.24	9.32
Open-circuit voltage U <sub>oc</sub> [V]	45.10	45.20	45.30

NOCT (nominal operating cell temperature): Irradiance 800 W/m<sup>2</sup> | Wind speed 1 m/sec | Ambient temperature | 20°C cell operating temperature 45 +/-2°C | Air Mass = 1.5

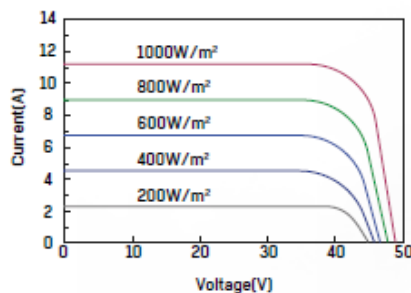
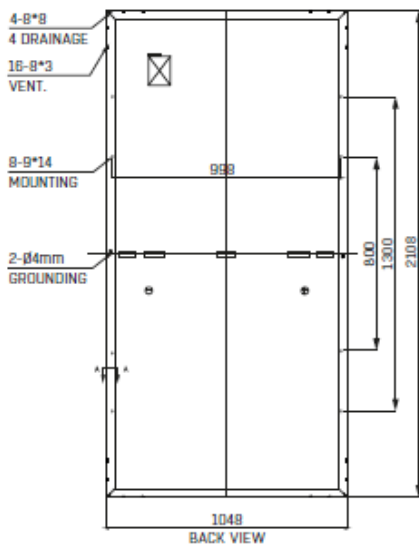
LIMITING VALUES	
Max. system voltage [V]	1500V DC (IEC)
Max. return current [I]	20A
Operating Temperature	- 40 to +85°C
Max. tested pressure load [Pa] <sup>2</sup>	5400
Max. tested tensile load [Pa] <sup>2</sup>	3800

TEMPERATURE COEFFICIENT		
I <sub>sc</sub>	V <sub>oc</sub>	P <sub>max</sub>
0.049% /°C	-0.33% /°C	-0.36% /°C

SPECIFICATIONS	
Number of cells	144 (6 x 24)   166x83 mm
Dimensions	2108 x 1048 x 35 mm
Weight	24 kg
Front-side glass	3.2 mm tempered Low Iron Glass
Frame	Stable, anodised aluminium frame, black
Junction box	Split Junction Box (IP68)
Cable	4 mm <sup>2</sup> , +400mm,-400mm Cust.Length
Diodes	3 Diodes
Plug-in connection	MC4 Compatible
Hail test (max. hailstrom)	Ø45mm   23 m/s   83 km/h

PACKING CONFIGURATION			
Container	40 HQ	Pieces Per Pallet	31
Pallets Per container	22	Pieces per Container	682

The specifications and average values can vary slightly. Relevant is the corresponding data of the individual measurement. Specifications are subject to change without notice. Measurement tolerance depending on equipment: rated power +/- 3%, other values +/- 30%. All information given in this data sheet corresponds to DIN EN 50380. A potential light-induced degradation of the power after commissioning is not considered here. Further information in the installation manuals. 1 The specific warranty conditions are given under [www.swissenergy-solar.ch](http://www.swissenergy-solar.ch) | 2 Horizontal mounted | 3 Tolerance L/W = +/- 3 mm, H +/-2mm, the dimensions given in the order confirmation will be decisive | 4 Location and dimensions of holes on request



**WARRANTY**  
**20 YEARS**  
 PRODUCT WARRANTY  
**30 YEARS**  
 POWER WARRANTY

**swiss solar**

2 priedas. Tiriama galios optimizatoriaus Tigo TS4-A-0 700W [40] techninė specifikacija;



## TS4-A-0

### Module-level optimization, monitoring, and rapid shutdown

The Tigo TS4-A-0 improves production, safety, and intelligence in new designs and existing systems. Patented technology delivers top performance with high efficiency for a fast ROI. Easy installation and long-term reliability reduce system downtime and truck rolls, while Tigo's Energy Intelligence platform enables quicker onsite commissioning and comprehensive remote monitoring.

#### Features

- Simple, fast installation – snaps to a standard PV module frame or mounts to racking
- Intelligent optimization – delivers the maximum energy from an array
- Module-level monitoring – full visibility into module- and system-level production
- Rapid shutdown – a UL Standards-certified component for photovoltaic rapid shutdown systems (PVRSS) worldwide
- Works with any system – fully compatible with thousands of different inverter models from more than 50 inverter brands
- 25-year warranty
- Monitoring, rapid shutdown, and remote troubleshooting with Tigo Access Point (TAP) and Cloud Connect Advanced (CCA)

#### Specifications

##### Electrical

Maximum current ( $I_{MP}/I_{SC}$ )	15 A/20 A
Input voltage range ( $V_{MP}$ )	16 – 80 V
Maximum input voltage	80 V
Maximum system voltage ( $V_{MAX}$ )	1000 V/1500 V*
Maximum output current ( $I_{MAX}$ )	15 A
Maximum output power ( $P_{MAX}$ )	700 W
Maximum fuse rating	25 A
Maximum efficiency	99,6%

##### AS 5033: Operational Output

Maximum output current	$I_{DCU MAX}$
Maximum output voltage	$V_{DCU MAX}$
Maximum output power	$P_{DCU MAX}$

##### Rapid Shutdown

TS4 conductor AWG	12
Rapid shutdown time limit	<30 sec.
PVRSE-controlled conductor limits	$\leq 240 VA, \leq 8 A, \leq 30 V_{DC}$
UL 1741-compliant PVRSE	Yes
Communications	Wireless

##### Connections

Input (from module) cable lengths	0.12/0.62 m
Output (to string) cable lengths	1.2/2 m
Connectors	MC4/EVO2

\* Depending on UL/IEC certification



tigoenergy.com

©20231129 Tigo Energy, Inc. 002-00143-00 Rev. 1.4

## Specifications

### Environmental

Operating temperature range	-40 – 70 °C (-40 – 158 °F)
Storage temperature range	-40 – 85 °C (-40 – 185 °F)
Maximum elevation	2000 m (6560 ft.)
Outdoor IP rating	IP68/NEMA 3R

### Mechanical

Dimensions (H/W/D)	139.7 x 138.4 x 22.9 mm (5.4 x 5.5 x 0.9 in.)
Weight	520 g (1.15 lb.)

### General

Standards compliance	FCC 15b, ETSI EN 301 489, CISPR 31, CSA 22.2, IEC 62109, NEC 690.12 UL 1741 PVRSE/PVRSS
Warranty	25 years

## Ordering Information

Part Number	V <sub>MAX</sub> Certifications UL/IEC	Cable Lengths	Connectors
461-00252-20	1500 V/1000 V	1.2/2 m	MC4
461-00252-32	1500 V/1000 V	0.12/1.2 m	MC4
461-00252-62	1500 V/1000 V	0.62/1.2 m	MC4
461-00261-32	1500 V/1500 V	0.12/1.2 m	EVO2
461-00261-62	1500 V/1500 V	0.62/1.2 m	EVO2
462-00252-32	1000 V*	0.12/1.2 m	MC4
462-00252-62	1000 V*	0.62/1.2 m	MC4
462-00261-32	1500 V*	0.12/1.2 m	EVO2
462-00261-62	1500 V*	0.62/1.2 m	EVO2

\* IEC certified only

## More Resources

