



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Rokas Zalatorius

FOTOVOLTINĖSE SISTEMOSE NAUDOJAMO
MAKSIMALIOS GALIOS TAŠKO SEKIMO TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Mindaugas Ažubalis

KAUNAS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

FOTOVOLTINĖSE SISTEMOSE NAUDOJAMO
MAKSIMALIOS GALIOS TAŠKO SEKIMO TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas
Elektros energetikos inžinerija (kodas 621H63003)

Vadovas

Doc. dr. Mindaugas Ažubalis

Recenzentas

Asist. dr. Artūras Baronas

Projektą atliko

Rokas Zalatorius

KAUNAS, 2017



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

(Fakultetas)

Rokas Zalatorius

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos inžinerija, 621H63003

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto

„Fotovoltinėse sistemose naudojamo maksimalios galios taško sekimo tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. gegužės 26 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Roko Zalatoriaus**, baigiamasis projektas tema „Fotovoltinėse sistemose naudojamo maksimalios galios taško sekimo tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Zalatorius, Rokas. Fotovoltinėse sistemose naudojamo maksimalios galios taško sekimo tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Mindaugas Ažubalis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Mokslo kryptis ir sritis: Elektros ir elektronikos inžinerija, Technologiniai mokslai

Reikšminiai žodžiai: *maksimalios galios taško sekimas, MGTS, maksimalios galios taškas, fotovoltinė sistema, saulės energija, MGTS algoritmai.*

Kaunas, 2017. 61 psl.

SANTRAUKA

Magistro baigiamojo projekto tikslas yra išanalizuoti fotovoltinėse sistemose naudojamo maksimalios galios taško sekimo veikimo principus ir palyginti dviejų dažniausiai sekimui naudojamų algoritmų veikimo parametrus esant nustatytoms meteorologinėms sąlygoms.

Išnagrinėjant fotovoltinėse sistemose naudojamų saulės modulių ir keitiklių pagrindines charakteristikas yra pagrindžiamas maksimalios galios taško sekimo (MGTS) naudojimas šiose sistemose. Išanalizuojami MGTS naudojami metodai, jų algoritmai ir veikimo principai. Remiantis nagrinėta literatūra pasirenkami du dažniausiai naudojami „kintančio laidumo“ ir „sutrikdymo ir sekimo“ algoritmai. Šių algoritmų veikimo parametrų tyrimui panaudojamas bazinis MATLAB „Simulink“ programos aplinkoje prie elektros tinklo prijungtos fotovoltinės sistemos modelis, turintis MGTS. Pagal nustatomus tyrimo etapus ir sąlygas yra ištiriami šių dviejų algoritmų veikimo parametrai. Palyginant tyrimo metu gaunamus rezultatus yra nustatoma, kokioms meteorologinėms sąlygoms esant kuris MGTS algoritmas yra efektyvesnis.

Zalatorius, Rokas. RESEARCH on MAXIMUM POWER POINT TRACKING USED in PHOTOVOLTAIC SYSTEMS: Master's thesis in *Electrical Power Engineering* / supervisor doc. dr. Mindaugas Ažubalis. Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electrical Power Systems.

Research area and field: Electrical and Electronics Engineering, Technological Sciences

Key words: *maximum power point tracking, MPPT, maximum power point, photovoltaic system, solar power, MPPT algorithms.*

Kaunas, 2017. 61 p.

SUMMARY

Aim of this project is to analyze the working principles of maximum power point tracking used in photovoltaic systems and to compare two most commonly used tracking algorithm's operation parameters under determined meteorological conditions.

By analyzing general characteristics of solar modules and power inverters, used in photovoltaic systems, the use of maximum power point tracking (MPPT) is justified. The operating principle of methods and their algorithms used for MPPT are analyzed. Based on analyzed literature two most commonly used Incremental Conductance and Perturb and Observe algorithms are chosen for further investigation. The investigation is concluded by using basic MATLAB „Simulink“ model of photovoltaic system with MPPT connected to the power grid. Both algorithm's operating parameters are examined by determined investigation stages and weather conditions. By comparing the results, obtained during the investigation, the conditions under which MPPT algorithm is more effective are determined.

TURINYS

SANTRUMPŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS	10
ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS	11
ĮVADAS	12
1. SAULĖS ELEMENTAI	13
1.1. Saulės elemento veikimo principas	13
1.2. Saulės elemento ekvivalentinė schema	15
1.3. Tuščiosios veikos įtampa, trumpojo jungimo srovė ir maksimalios galios taškas	16
1.4. Saulės elemento užpildymo faktorius.....	17
1.5. Meteorologinių sąlygų ir apkrovos įtaka saulės elemento parametrams.....	17
1.5.1. Saulės apšvietos įtaka	17
1.5.2. Temperatūros įtaka	18
1.5.3. Apkrovos įtaka.....	19
1.6. Saulės elemento efektyvumas	19
1.7. Saulės elementų tipai.....	20
1.7.1. Monokristalinio silicio elementai	20
1.7.2. Polikristalinio silicio elementai	20
1.7.3. Amorfinio silicio elementai	20
1.7.4. Kitų medžiagų elementai	21
1.8. Saulės fotovoltiniai moduliai.....	21
2. FOTOVOLTINĖS SISTEMOS STRUKTŪRA	23
2.1. Centralizuotos komutacijos struktūra.....	23
2.2. Pusiau išskirstytos komutacijos struktūra.....	24
2.3. Modulinės komutacijos struktūra	24
3. MAKSIMALIOS GALIOS TAŠKO SEKIMAS.....	25
3.1. Maksimalios galios taško sekimo principai.....	25
3.2. Sekimo metodai ir jų algoritmai.....	26
3.2.1. „Sutrikdymo ir sekimo“ metodas	26
3.2.2. „Kintančio laidumo“ metodas	27
3.2.3. „Tuščiosios veikos įtampos“ metodas	29
3.2.4. „Trumpojo jungimo srovės“ metodas.....	30
3.2.5. „Nuolatinio duomenų atnaujinimo“ metodas	31

3.2.6. „Maksimalios galios taško įtampos ir srovės apskaičiavimo“ metodas	32
3.2.7. Neraiškios logikos metodas	32
3.2.8. Neuroninių tinklų metodas	33
3.2.9. Maksimalios galios taško sekimo metodų aptarimas	34
4. FOTOVOLTINĖS SISTEMOS MODELIAVIMAS.....	36
4.1. Maksimalios galios taško sekimo algoritmų tyrimo sistemos modelis	36
4.2. Maksimalios galios taško sekimo algoritmų įgyvendinimas tyrimo sistemos modelyje	37
4.3. Maksimalios galios taško sekimo algoritmų tyrimo sąlygos.....	38
4.4. Saulės foto-modulių masyvo galios-įtampos charakteristikos tyrimas	40
4.5. Maksimalios galios taško sekimo algoritmų tyrimo etapai	41
5. TYRIMO REZULTATAI.....	42
5.1. Maksimalios galios taško sekimo algoritmų tyrimo rezultatai.....	42
5.2. Maksimalios galios taško sekimo algoritmų tyrimo rezultatų palyginimas	55
IŠVADOS.....	57
INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS.....	58
PRIEDAI	61
Priedas Nr. 1 30 kW saulės elektrinės, esančios Daubiškių k., Akmenės r. sav. elektrinių ir meteorologinių parametrų registravimo žurnalo duomenys.....	62
Priedas Nr. 2 Fotovoltinės sistemos modelyje naudojamo foto-modulių masyvo ištirtos galios-įtampos charakteristikos.....	68

LENTELIŲ SĄRAŠAS

3.1 lentelė. Pagrindinės maksimalios galios taško sekimo metodų charakteristikos	35
5.1 lentelė. MGTS algoritmų tyrimo rezultatai ir jų palyginimas	55
5.3 lentelė. MGTS algoritmų tyrimo rezultatų palyginimas su idealia foto-modulių MGT galia	56

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Saulės elemento principinė veikimo schema.....	13
1.2 pav. Puslaidininkio p-n sandūros schema	14
1.3 pav. Saulės elemento ekvivalentinė schema	15
1.4 pav. Saulės elemento voltamperinė ir galios-įtampos charakteristikos	17
1.5 pav. Saulės elemento voltamperinė ir galios-įtampos charakteristikos, kintant apšvietai	18
1.6 pav. Saulės elemento voltamperinė ir galios-įtampos charakteristikos, kintant temperatūrai	19
1.7 pav. Tipinio saulės modulio konstrukcija	21
1.8 pav. Stiklas-stiklas saulės modulio konstrukcija.....	22
2.1 pav. Centralizuotos komutacijos saulės elektrinės struktūrinė schema	24
2.2 pav. Pusiau išskirstytos komutacijos saulės elektrinės struktūrinė schema	24
2.3 pav. Modulinės komutacijos saulės elektrinės struktūrinė schema.....	24
3.1 pav. Fotovoltinės sistemos, kurioje naudojamas MGTS, struktūrinė veikimo schema	25
3.2 pav. „Sutrikdymo ir sekimo“ metodo algoritmo struktūrinė veikimo schema.....	26
3.3 pav. „Sanyo“ HIT 215W modulio U_{MPP} priklausomybė nuo apšvietos natūrinio logaritmo..	27
3.4 pav. „Sanyo“ HIT 215W modulio I_{MPP} priklausomybė nuo apšvietos	27
3.5 pav. „Kintančio laidumo“ metodo išvestinės taikymas foto-modulio galios kreivėje	28
3.6 pav. „Kintančio laidumo“ metodo algoritmo struktūrinė veikimo schema.....	29
3.7 pav. U_{OC} ir I_{SC} metodų algoritmų struktūrinė veikimo schema	30
3.8 pav. Neraiškios logikos valdymo sistemos struktūrinė veikimo schema	32
3.9 pav. Priklausomybės funkcija tarp fuzifikacijos įtaiso įvesties ir išvesties	32
3.10 pav. Paprasčiausias trijų sluoksnių neuroninis tinklas	34
4.1 pav. 100 kW saulės elektrinės su MGTS prijungtos prie 0,4/10 kV elektros tinklo modelis	36
4.2 pav. MGTS „kintančio laidumo“ algoritmo įgyvendinimas Matlab „Simulink“ programos aplinkoje	38
4.3 pav. Saulės foto-modulių masyvo galios-įtampos charakteristikų tyrimo modelis	40
5.1 pav. FVS foto-modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, esant sąlygoms Nr. 1	42
5.2 pav. FVS foto-modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, esant sąlygoms Nr. 2	43
5.3 pav. FVS foto-modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, esant sąlygoms Nr. 3	44
5.4 pav. FVS foto-modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, esant sąlygoms Nr. 4	45

5.5 pav.	FVS foto-modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, esant sąlygoms Nr. 5	46
5.6 pav.	FVS foto-modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, esant sąlygoms Nr. 6	47
5.7 pav.	FVS foto-modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, esant sąlygoms Nr. 7	48
5.8 pav.	FVS foto-modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, esant sąlygoms Nr. 8	49
5.9 pav.	FVS foto-modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, esant sąlygoms Nr. 9	50
5.10 pav.	FVS foto-modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, esant sąlygoms Nr. 10 ...	51
5.11 pav.	FVS foto-modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, esant sąlygoms Nr. 11 ...	52
5.12 pav.	FVS foto-modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, esant sąlygoms Nr. 12 ...	53
5.13 pav.	FVS foto-modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, esant sąlygoms Nr. 13 ...	54

SANTRUMPŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS

A.M.	oro masės koeficientas (angl. <i>Air Mass coefficient</i>);
AC	kintamoji srovė (angl. <i>alternating current</i>);
CdS	kadmio sulfidas;
CdTe	kadmio telūridas;
CIGS	vario indžio galio selenidas;
DC	nuolatinė srovė (angl. <i>direct current</i>);
EVA	etileno vinilacetatas;
FVS	prie elektros tinklo prijungta fotovoltinė sistema;
InC	„kintančio laidumo“ algoritmas (angl. <i>Incremental Conductance algorithm</i>);
LCD	skystųjų kristalų ekranas (angl. <i>liquid crystal display</i>);
MGT	maksimalios galios taškas;
MGTS	maksimalios galios taško sekimas;
PaO	„sutrikdymo ir sekimo“ algoritmas (angl. <i>Perturb and Observe algorithm</i>);
PVB	polivinilbutiralis;
PVF	polivinilfluoridas;
STC	standartinės bandymų sąlygos (angl. <i>standard test conditions</i>);
VS	valdymo signalas (angl. <i>duty cycle</i>).

ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS

A	diodo idealumo faktorius;
D	saulės elemento diodas;
dI	saulės elemento, modulio ar jų masyvo srovės pokytis;
dP	saulės elemento, modulio ar jų masyvo galios pokytis;
dt	laiko pokytis;
dU	saulės elemento, modulio ar jų masyvo įtampos pokytis;
E	neraiškios logikos valdymo sistemos įvesties parametras;
FF	saulės elemento, modulio ar jų masyvo užpildymo faktorius;
I	saulės elemento, modulio ar jų masyvo srovė;
I_0	sklaidos srovė;
I_D	srovė, tekanti per diodą;
I_{FM}	fotosrovė;
I_{MPP}	saulės elemento, modulio ar jų masyvo maksimalios galios taško srovė;
I_{SC}	saulės elemento, modulio ar jų masyvo trumpojo jungimo srovė;
k_B	Bolcmano dujų konstanta;
$K_{U,\%}$	koeficientas nusakantis saulės elemento temperatūros įtaką tuščiosios veikos įtampai;
k_1	proporcingumo koeficientas, nusakantis U_{OC} ir U_{MPP} tarpusavio priklausomybę;
k_2	proporcingumo koeficientas, nusakantis I_{SC} ir I_{MPP} tarpusavio priklausomybę;
n_p	lygiagrečiai sujungtų saulės elementų, modulių ar jų masyvų skaičius;
n_s	nuosekliai sujungtų saulės elementų, modulių ar jų masyvų skaičius;
P_{MPP}	maksimali saulės elemento, modulio ar jų masyvo galia;
q	elektrono krūvis;
R_L	saulės elemento, modulio ar jų masyvo apkrovos varža;
R_{OPT}	optimali saulės elemento, modulio ar jų masyvo apkrovos varža;
R_{SH}	lygiagrečioji saulės elemento varža;
R_{SR}	nuoseklioji saulės elemento varža;
T	saulės elemento, modulio ar jų masyvo absoliutinė temperatūra;
U	saulės elemento, modulio ar jų masyvo įtampa;
U_{MPP}	saulės elemento, modulio ar jų masyvo maksimalios galios taško įtampa;
U_{OC}	saulės elemento, modulio ar jų masyvo tuščiosios veikos įtampa;
U_{OC}^{STC}	tuščiosios veikos įtampa standartinėmis bandymų sąlygomis;
ΔE	neraiškios logikos valdymo sistemos įvesties parametro pokytis;
ΔP	saulės elemento, modulio ar jų masyvo galios pokytis;
ΔU	saulės elemento, modulio ar jų masyvo įtampos pokytis;
w_{ij}	neuroninio tinklo jungties tarp mazgų i ir j stiprumo koeficientas.

ĮVADAS

Lietuva yra tarp 54 ir 56 laipsnių šiaurės platumos, todėl įvairiose Lietuvos vietose saulės ekspozicija per metus į horizontalaus paviršiaus kvadratinį metrą svyruoja nuo 926 kWh (Biržai) iki 1042 kWh (Nida). Vidutinė daugiametė saulės ekspozicija per metus tenkanti Lietuvos žemės paviršiaus kvadratiniam metrui – 1000 kWh [1]. Įvertinant šį saulės energijos panaudojimo potencialą, Lietuvoje buvo užsibrėžta įgyvendinti *Europos Parlamento ir Tarybos Direktyvos 2009/28/EB* nustatytus įsipareigojimus. Pagal šią direktyvą Lietuva turi užtikrinti, kad 2020 m. atsinaujinančių išteklių energijos dalis bendrajame galutiniame energijos suvartojime sudarytų ne mažiau kaip 23 %. Šį tikslą Lietuva pasiekė 2014 m. (23,66 %) [2]. Pagal AB „Litgrid“ 2016 m. atsinaujinančių energijos šaltinių pagaminamos elektros energijos ataskaitą [3], Lietuvoje veikė 2246 saulės elektrinės, kurių bendroji instaliuota galia siekė 60,6 MW. 2017 m. pradžioje veikė 2291 saulės elektrinės, kurių bendroji instaliuota galia siekė 73,09 MW. Šios saulės elektrinės per 2016 metus pagamino apie 3,3 % visos šalyje iš atsinaujinančių energijos šaltinių pagamintos elektros energijos. Siekiant pagerinti šiuos saulės elektrinių rodiklius yra didinamas saulės modulio, keitiklio arba maksimalios galios taško sekimo (MGTS) efektyvumas. Kadangi saulės modulio ir keitiklio veikimo naudingumas yra sąlygojamas sudėtingos gamybos technologijos bei reikalingų brangių komponentų, MGTS efektyvumo didinimas yra paprastesnis, pigesnis ir paprasčiau pritaikomas sprendimas. MGTS algoritmų tobulinimas, atnaujinimas ir pritaikymas pagal saulės elektrinės veikimo sąlygas sudarytų galimybę padidinti generuojamą elektros energijos kiekį tiek veikiančiose, tiek naujose saulės elektrinėse.

Šio **projekto tikslas** – išanalizuoti fotovoltinėse sistemose naudojamo maksimalios galios taško sekimo principus ir palyginti dviejų dažniausiai sekimui naudojamų algoritmų veikimo parametrus esant nustatytoms meteorologinėms sąlygoms.

Projekto uždaviniai:

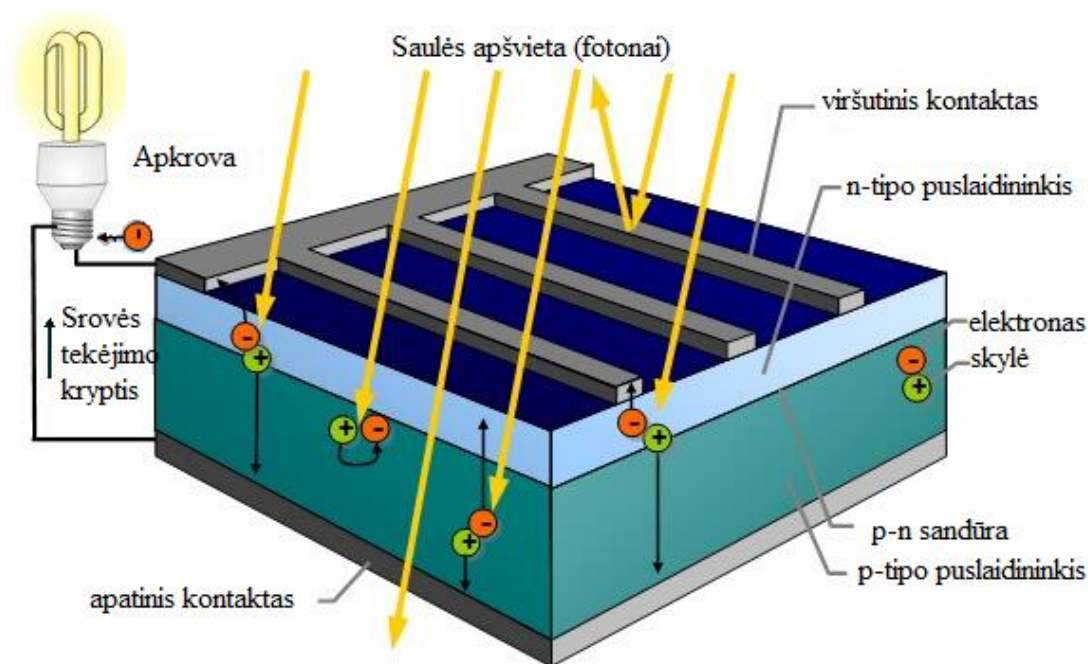
- 1) išnagrinėti maksimalios galios taško sekimo panaudojimo galimybes fotovoltinėse sistemose;
- 2) ištirti MGTS naudojamus algoritmus ir jų veikimo principą;
- 3) sudaryti MATLAB „Simulink“ programos aplinkoje tyrimui naudojamą prie elektros tinklo prijungtos fotovoltinės sistemos su MGTS modelį;
- 4) ištirti dviejų dažniausiai fotovoltinėse sistemose naudojamų MGTS algoritmų veikimo parametrus esant nustatytoms sąlygoms;
- 5) atlikti MGTS algoritmų veikimo tyrimo metu gautų rezultatų analizę.

1. SAULĖS ELEMENTAI

1.1. Saulės elemento veikimo principas

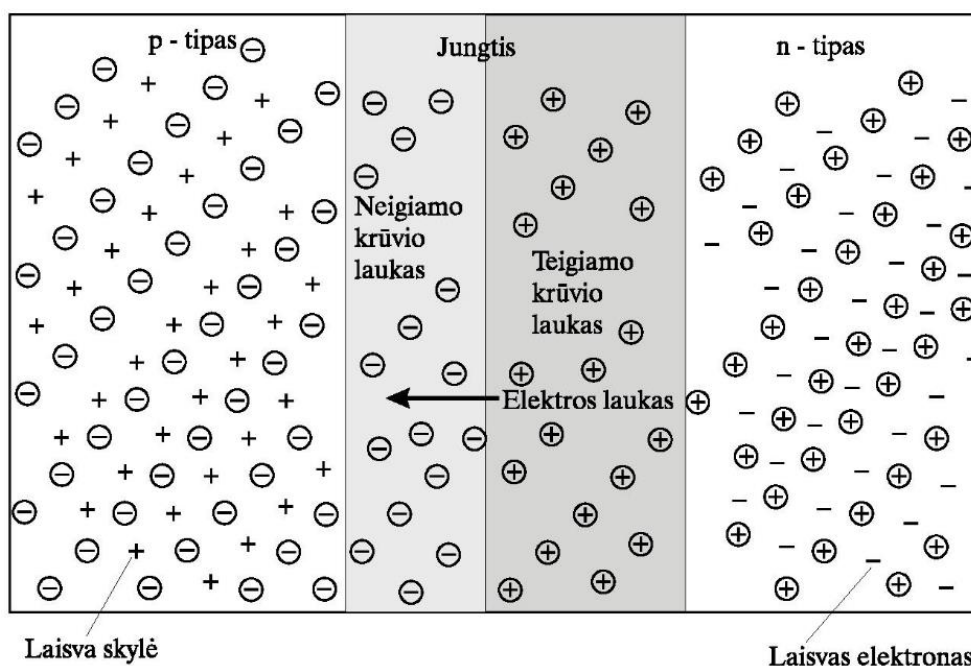
Saulės elementas yra pagrindinis saulės foto-modulio komponentas, kurio gamybai dažniausiai naudojama medžiaga yra silicis. Tai puslaidininkinis įtaisas, skirtas Saulės šviesos energiją paversti į nuolatinės srovės elektros energiją panaudojant fotoelektrinį efektą. Šis procesas pagrįstas kai kurių puslaidininkių savybe tiesiogiai keisti elektromagnetinę spinduliuotę į elektros srovę [1].

Saulės elementas – tai p - n sandūra sudaryta iš dviejų puslaidininkių sluoksnių, turinčių nedidelį kiekį skirtingų atomų priemaišų. Elemento n -tipo puslaidininkio sluoksnis turi donorinių priemaišų, padidinančių laisvųjų elektronų (neigiamų krūvininkų) kiekį medžiagoje, o p -tipo turi akceptorinių priemaišų, padidinančių skylių (teigiamų krūvininkų – tuščių vietų elektronams) kiekį medžiagoje. Prie šių p -tipo ir n -tipo sluoksnių paviršių yra prijungiami metaliniai kontaktai, kurie jungiami prie išorinės apkrovos. Viršutinis kontaktas (n -tipo sluoksnis) būna šukų arba tinklelio formos, nes pro jį turi praeiti saulės spinduliuojami fotonai, o apatinis (p -tipo sluoksnis) – ištisinis metalo sluoksnis (žr. 1.1 pav.) [4].



1.1 pav. Saulės elemento principinė veikimo schema [5]

Šiuos sluoksnius sujungus, arti sąlyčio vietos esantys n -tipo sluoksnio elektronai pereina į p -tipo sluoksnį ir taip sudaro teigiamo krūvio lauką, o p -tipo sluoksnio skylės pereina į n -tipo sluoksnį ir taip sudaro neigiamo krūvio lauką (žr. 1.2 pav.). Tokiu principu susidaro p - n sandūros elektrinis laukas, kuris sukuria barjerą tolimesniam laisvųjų krūvininkų, esančių toliau nuo sąlyčio vietos, judėjimui ir traukia laisvus elektronus iš p -tipo sluoksnio į n -tipo sluoksnį, o laisvas skyles iš n -tipo sluoksnio į p -tipo sluoksnį. Sandūroje nusistovi laisvųjų krūvininkų pusiausvyra [4].



1.2 pav. Puslaidininkio p-n sandūros schema [4]

Kai ši sandūra apšviečiama, įvyksta trys dalykai:

- 1) vieni fotonai atsispindi nuo saulės elemente esančių metalinių kontaktų paviršiaus;
- 2) fotonai, turintys lygią arba didesnę energiją negu puslaidininkio draudžiamosios juostos plotis, išmuša puslaidininkio elektronus iš valentinės juostos (tolimiausio stabilaus atomo branduolio lygmens) į laidumo juostą (atomo branduolio lygmenį, iš kurio elektronai gali pereiti į kitą atomą) abiejuose sandūros sluoksniuose;
- 3) kiti, turintys mažai energijos, pereina saulės elementą kiaurai arba virsta šiluma (elementas sugeria fotoną, nes nepakanka energijos išmušti puslaidininkio elektronų iš valentinės juostos) [6].

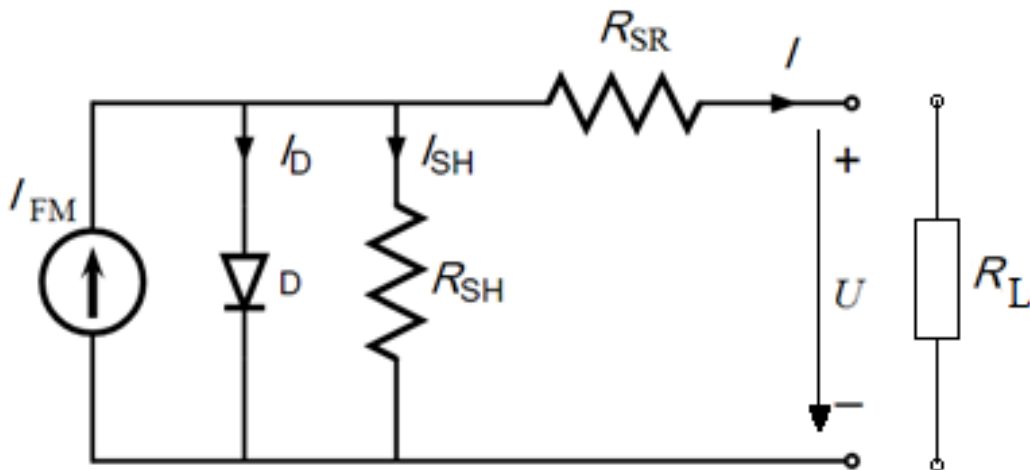
Fotonams išmušus puslaidininkio elektronus, atsiranda papildomi laisvieji krūvininkai (elektronams laidumo juostoje ir skylėms valentinėje juostoje), vadinami elektronas-skylė pora, ir yra sutrikdoma laisvųjų krūvininkų pusiausvyra $p-n$ sandūroje. Todėl veikiami elektrinio lauko, susidarę laisvieji krūvininkai išskiriami: skylės pernešamos per sandūrą į p -tipo sluoksnį, o elektronai į n -tipo sluoksnį. Susidarius elektronų pertekliui n -tipo sluoksnyje, jie veikiami elektrinio lauko juda per metalinį elektrodą išorine grandine per apkrovą [6]. Pasiekę kitą metalo ir p -tipo puslaidininkio kontaktą, elektronai susiduria su priešinga kryptimi judančiomis skylėmis ir rekombinuoja. Taip saulės elemente teka nuolatinė elektros srovė, vadinama fotosrove. Ši srovė teka tol, kol $p-n$ sandūra (elementas) yra apšviečiama šviesa, kuri generuoja laisvuosius krūvininkus puslaidininkyje. Kadangi fotonas gali išlaisvinti tik vieną elektroną, šios srovės dydis tiesiogiai priklauso nuo saulės apšvietos. Esant didesnei apšvietai, saulės spinduliuotėje yra daugiau fotonų, turinčių pakankamai energijos sudaryti daugiau elektronas-skylė porų, todėl saulės elementas generuoja didesnę srovę [7].

1.2. Saulės elemento ekvivalentinė schema

Saulės elemento ekvivalentinę schemą sudaro idealus srovės šaltinis su lygiagrečiai prijungtu diodu D ir varža R_{SH} bei nuosekliai prijungta varža R_{SR} . Ši ekvivalentinė schema, prie kurios prijungta apkrovą atstojanti varža R_L , pavaizduota 1.3 pav. Jos srovės ir įtampos charakteristika yra išreiškiama 1.1 formule [1].

$$I = I_{FM} - I_D = I_{FM} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{q \cdot (U + R_{SR} \cdot I)}{A \cdot k_B \cdot T}} - 1 \right) - \frac{U + R_{SR} \cdot I}{R_{SH}}; \quad 1.1$$

- čia
- A – diodo idealumo faktorius, s.v.;
 - I – saulės elemento srovė, A;
 - I_D – srovė, tekanti per diodą, A;
 - I_{FM} – fotosrovė, A;
 - I_0 – sklaidos srovė, A;
 - k_B – Bolcmano dujų konstanta, J/K;
 - R_{SH} – saulės elemento lygiagrečioji varža, Ω ;
 - R_{SR} – saulės elemento nuosekloji varža, Ω ;
 - q – elektrono krūvis, J;
 - T – saulės elemento absoliutinė temperatūra, K;
 - U – saulės elemento įtampa, V.



1.3 pav. Saulės elemento ekvivalentinė schema [8]

Nuosekliai prijungta R_{SR} nuosekloji varža – tai puslaidininkio plokštelės, kontaktų ir sujungimo laidų bendroji varža. R_{SH} lygiagreči varža parodo p - n sandūros netobulumą ir elemento kraštų efekto įtaką. Elemento kraštų efektas – tai trumpasis jungimas atsirandantis aplink sandūrą elemento kraštuose dėl elemente esančių priemaišų [7]. Idealiu atveju R_{SH} būtų lygi begalybei, o R_{SR} lygi nuliui. Tačiau šis idealus atvejis yra neįmanomas ir saulės elementų gamintojai stengiasi sumažinti šių dviejų varžų neigiamą įtaką elemento efektyvumui (dėl šių varžų mažėja elemento

generuojamos srovės dydis (žr. 1.1 formulę)). Siekiant supaprastinti šią schemą R_{SH} varža dažnai yra laikoma begaline ir jos įtaka elemento darbui yra neįvertinama [9].

Saulės modulis yra sudarytas iš dešimčių saulės elementų sujungtų, nuosekliai ir lygiagrečiai, kad jo išėjimo srovė ir įtampa būtų pakankamai aukšta ir atitiktų tinklo ar įrangos, prie kurios jis būtų jungiamas, parametrus. Įvertinant anksčiau minėtą schemos supaprastinimą, saulės modulio išėjimo srovės ir įtampos charakteristika išreiškiama 1.2 formule [9].

$$I \approx I_{FM} \cdot n_p - n_s \cdot I_0 \cdot \left(e^{\frac{q \cdot (U + R_{SR} \cdot I)}{A \cdot k_B \cdot T}} - 1 \right); \quad 1.2$$

čia n_p – lygiagrečiai sujungtų saulės elementų skaičius, vnt.;

n_s – nuosekliai sujungtų saulės elementų skaičius, vnt.

1.3. Tuščiosios veikos įtampa, trumpojo jungimo srovė ir maksimalios galios taškas

Saulės elemento voltamperinė charakteristika turi tris būdingus taškus – tuščiosios veikos įtampos U_{OC} (angl. *open circuit voltage*), trumpojo jungimo srovės I_{SC} (angl. *short circuit current*) ir maksimalios galios (suderintojo režimo). Pirmuose dviejuose taškuose saulės elemento generuojama galia yra lygi nuliui. U_{OC} gali būti aproksimuojama pagal 1.1 formulę, kai elemento išėjimo srovė $I=0$ A ir neįvertinama R_{SH} varžos įtaka. Atsižvelgiant į šias sąlygas gaunama 1.3 formulė. Trumpojo jungimo srovė I_{SC} – tai srovė, kai elemento įtampa $U=0$ V. Ji apytiksliai yra lygi fotosrovei, kaip pavaizduota 1.4 formulėje ir tiesiogiai priklauso nuo saulės apšvietos dydžio [1].

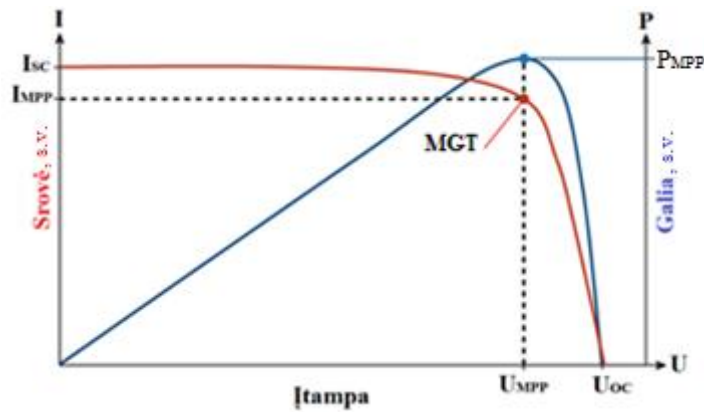
$$U_{OC} \approx \frac{A \cdot k_B \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{FM}}{I_0} + 1 \right). \quad 1.3$$

$$I_{SC} \approx I_{FM}. \quad 1.4$$

čia I_{SC} – saulės elemento trumpojo jungimo srovė, A;

U_{OC} – saulės elemento tuščiosios veikos įtampa, V.

Trečiasis maksimalios saulės elemento galios taškas yra pasiekiamas unikaliame voltamperinės charakteristikos taške, kai elemento srovės I ir įtampos U sandauga yra maksimali. Šis taškas vadinamas maksimalios galios tašku MGT (angl. *maximum power point*), o jį nurodanti srovė, įtampa ir galia vadinami atitinkamai maksimalios galios taško srove I_{MPP} , įtampa U_{MPP} ir galia P_{MPP} . Visi šie taškai yra pavaizduoti 1.4 pav. esančiose tipinėse saulės elemento voltamperinėje ir galios-įtampos charakteristikose [1].



1.4 pav. Saulės elemento voltamperinė ir galios-įtampos charakteristikos [10]

1.4. Saulės elemento užpildymo faktorius

Panaudojant maksimalios galios taško srovę I_{MPP} ir įtampą U_{MPP} bei trumpojo jungimo srovę I_{SC} ir tuščiosios veikos įtampą U_{OC} , yra nusakomas saulės elemento užpildymo faktorius FF (žr. 1.5 formulė). Tai santykis tarp idealios maksimalios galios ($I_{MPP} \cdot U_{MPP}$) ir teorinės maksimalios galios ($I_{SC} \cdot U_{OC}$), kuris naudojamas įvertinti saulės elemento pagaminimo kokybę [7].

$$FF = \frac{I_{MPP} \cdot U_{MPP}}{I_{SC} \cdot U_{OC}} \quad 1.5$$

čia FF – saulės elemento užpildymo faktorius, s.v.;

I_{MPP} – saulės elemento maksimalios galios taško srovė, A;

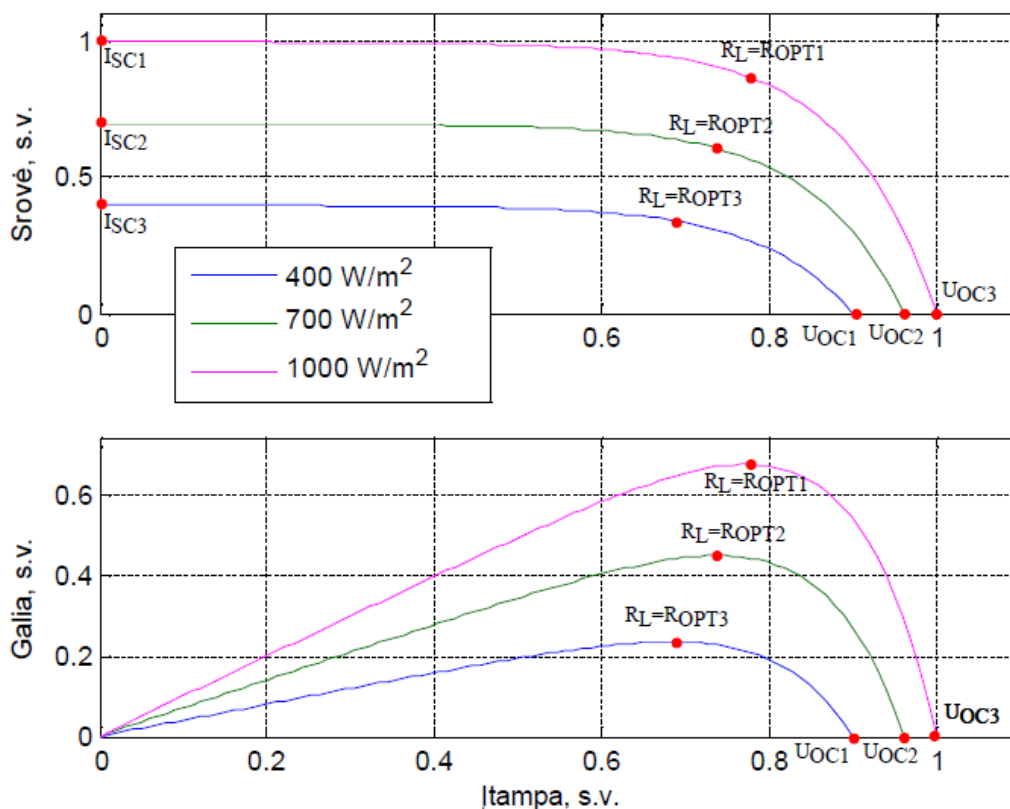
U_{MPP} – saulės elemento maksimalios galios taško įtampa, V.

Teorinė maksimali galia realiai yra nepasiekiamo dėl saulės elemento sandaros netobulumo (žr. 1.1 poskyrį): nuoseklios varžos R_{SR} , lygiagrečios varžos R_{SH} ir diodo D , kurie pavaizduoti 1.3 pav. ekvivalentinėje schemeje. Todėl realios maksimalios galios taško įtampos ir srovės vertės visada yra mažesnės atitinkamai nei tuščiosios veikos įtampos ir trumpojo jungimo srovės. Komercinių saulės elementų užpildymo faktorius dažniausiai būna apie 0,8 [11].

1.5. Meteorologinių sąlygų ir apkrovos įtaka saulės elemento parametrų

1.5.1. Saulės apšvietos įtaka

Saulės apšvietos įtaka saulės elemento voltamperinei ir įtampos-galios charakteristikoms yra pateikiama 1.5 pav., kuriame matavimo vienetai yra pateikti santykiniais vienetais dėl paprastesnio įtakos įvertinimo. Kaip aptarta 1.1 poskyryje, fotosrovė yra tiesiogiai proporcinga apšvietos dydžiui, todėl apšvietos padidėjimas lemia ir fotosrovės padidėjimą. Kadangi trumpojo jungimo srovė tiesiogiai priklauso nuo fotosrovės (žr. 1.4 formulę), tai ji taip pat yra tiesiogiai proporcinga apšvietai – fotosrovė padidėja, kai apšvieta padidėja ir atvirkščiai.



1.5 pav. Saulės elemento voltamperinė ir galios-įtampos charakteristikos, kintant apšvietai [12]

Apšvietos įtaka tuščiosios veikos įtampai yra žymiai mažesnė nei trumpojo jungimo srovei, nes šios įtampos priklausomybė nuo fotosrovės, išreikštos 1.3 formulėje, yra logaritminė. Todėl padidėjus apšvietai, įtampa padidėja santykinai mažesniu dydžiu nei pasikeičia srovė. Dėl santykinai mažo pasikeitimo praktiniuose skaičiavimuose ši priklausomybė dažniausiai yra nevertinama [13]. Daroma išvada, kad, dirbant ne trumpojo jungimo režimu, o normaliu darbo režimu, pagrindinis faktorius lemiantis saulės elemento generuojamą galią yra fotosrovė.

1.5.2. Temperatūros įtaka

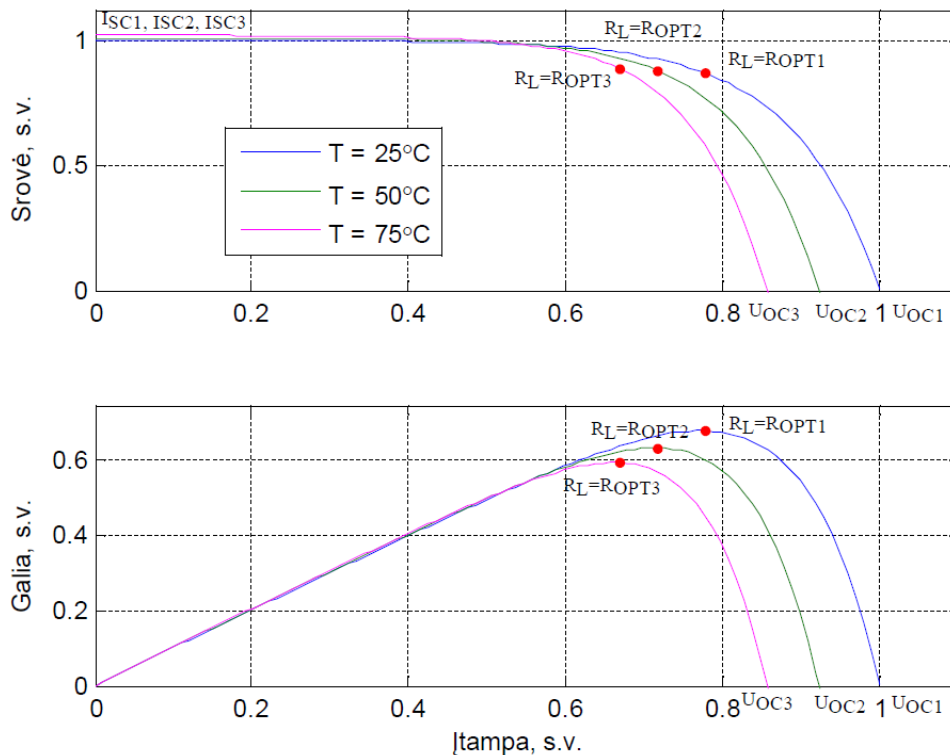
Saulės elemento temperatūra, kuri priklauso nuo meteorologinių sąlygų, labiausiai įtakos turi saulės elemento įtampai. Ši priklausomybė yra tiesiška ir išreiškiama 1.6 formule [12].

$$U_{oc}(T) = U_{oc}^{STC} + \frac{K_{U,\%}}{100} \cdot (T - 273,15); \quad 1.6$$

čia $K_{U,\%}$ – temperatūrinis koeficientas tuščiosios veikos įtampai, V/°C.

U_{oc}^{STC} – tuščiosios veikos įtampa standartinėmis bandymų sąlygomis, V;

Kadangi temperatūrinis koeficientas $K_{U,\%}$ yra neigiamas [14], padidėjus temperatūrai, įtampa sumažėja – atvirkštinė priklausomybė. Kita vertus, padidėjus temperatūrai padidėja srovė, tačiau šis pokytis yra toks mažas, kad negali kompensuoti įtampos sumažėjimo ir elemento galia sumažėja [12]. Temperatūros įtaka saulės elemento voltamperinei ir įtampos-galios charakteristikoms yra pateikiama 1.6 pav., kuriame matavimo vienetai yra pateikti santykiniais vienetais dėl paprastesnio įtakos įvertinimo.



1.6 pav. Saulės elemento voltamperinė ir galios-įtampos charakteristikos, kintant temperatūrai [12]

Saulės modulių gamintojai saulės elementų specifikacijose pateikia koeficientus, kurie nusako, kaip tuščiosios veikos įtampa, trumpojo jungimo srovė ir maksimali elemento galia kinta keičiantis saulės elemento temperatūrai. Kadangi įtaka srovei yra maža, dažniausiai ji skaičiavimuose yra nevertinama [14].

1.5.3. Apkrovos įtaka

Meteorologinės sąlygos (temperatūra ir apšvieta) yra nepastovios ne tik vertinant metų laikotarpį, bet ir dienos laikotarpį. Jos gali keistis labai greitai dėl greitai besikeičiančių oro sąlygų, pavyzdžiui debesuotumo. Todėl daroma išvada, kad maksimalios galios taško vieta saulės elemento charakteristikos kreivėje pastoviai kinta, dėl pastoviai kintančių saulės apšvietos ir temperatūros sąlygų. Jeigu elementas darbo taške yra toli nuo MGT, yra negeneruojama visa galima generuoti galia. Todėl norint išgauti maksimalią galią iš saulės elemento, yra būtina sekti šį MGT esant bet kokioms oro sąlygoms [12]. Šiam tikslui pasiekti yra panaudojama trečioji saulės elemento voltamperinės charakteristikos priklausomybė nuo prijungtos prie jo apkrovos. Kaip matoma 1.5 ir 1.6 pav. kiekvienoms skirtingoms meteorologinėms sąlygoms egzistuoja tokia optimali saulės elemento apkrovos varža $R_L = R_{OPT}$, kuriai esant yra pasiekiamas maksimalios galios taškas.

1.6. Saulės elemento efektyvumas

Viena svarbiausių saulės elementų charakteristikų yra efektyvumas, kuris nusako, kiek procentų saulės spinduliuotės yra paverčiama į elektros energiją. Šis dydis yra išmatuojamas

standartinėmis bandymų sąlygomis (angl. *Standart Test Conditions (STC)*) – saulės apšvieta 1000 W/m², oro masės koeficientas 1.5 (angl. *Air Mass coefficient (A.M.)*) ir *p-n* sandūros temperatūra 25 °C. Oro masės koeficientas A.M. 1.5 parodo, kiek kartų ilgesnį atstumą saulės spinduliuotė nukeliauja atmosferoje lyginant su trumpiausiu įmanomu atstumu [15]. Kuo didesnis elemento efektyvumas, tuo mažesnis plotas yra reikalingas norimai galiai generuoti.

1.7. Saulės elementų tipai

Dabartinėje saulės elementų gamybos pramonėje pagrindinės naudojamos medžiagos yra monokristalinis, polikristalinis ir amorfinis silicis. Tai yra todėl, nes Žemės paviršiuje yra gausu šios medžiagos silicio dioksido pavidale, jis yra nekenksmingas ir elementų gamybos procesas iš šios medžiagos yra išstbulintas. Nors ir yra bandoma atrasti naujus medžiagų junginius saulės elementų gamybai, iki šiol nėra komercinio pakaitalo iš silicio pagamintiems saulės elementams [7].

1.7.1. Monokristalinio silicio elementai

Monokristalinio silicio saulės elementai yra patys efektyviausi. Jie yra gaminami iš labai plonų silicio plokštelių, kurios yra išpjautos iš gryno lydyto monokristalinio silicio. Šios plokštelės turi iš anksto numatomą, aiškią ir tvarkingą struktūrą. Jų gamybai reikalinga aukšta temperatūra, dėl ko pats gamybos procesas turi būti atliktas kruopščiai. Šių elementų efektyvumas siekia 20-21% [1], o reikalingas plotas norint pasiekti 1 kW galią yra apie 7 m² [12].

1.7.2. Polikristalinio silicio elementai

Šie saulės elementai taip pat yra gaminami iš labai plonų plokštelių išpjautų iš gryno išlydyto polikristalinio silicio, tačiau jų struktūra yra nenuspėjama. Vėsinant šį išlydytą silicį, jis tuo pačiu metu kristalizuojasi daugybėje vietų, kas nulemia nesimetrišką kristalų struktūrą – jie susidaro skirtingų dydžių, formų ir padėties. Dėl šių priežasčių šių saulės elementų efektyvumas siekia tik 11-14% [16], tačiau tuo pačiu jų gamybos procesas yra pigesnis lyginant su monokristalinio silicio saulės elementais. Reikalingas plotas norint pasiekti 1 kW galią yra apie 8 m² [12].

1.7.3. Amorfinio silicio elementai

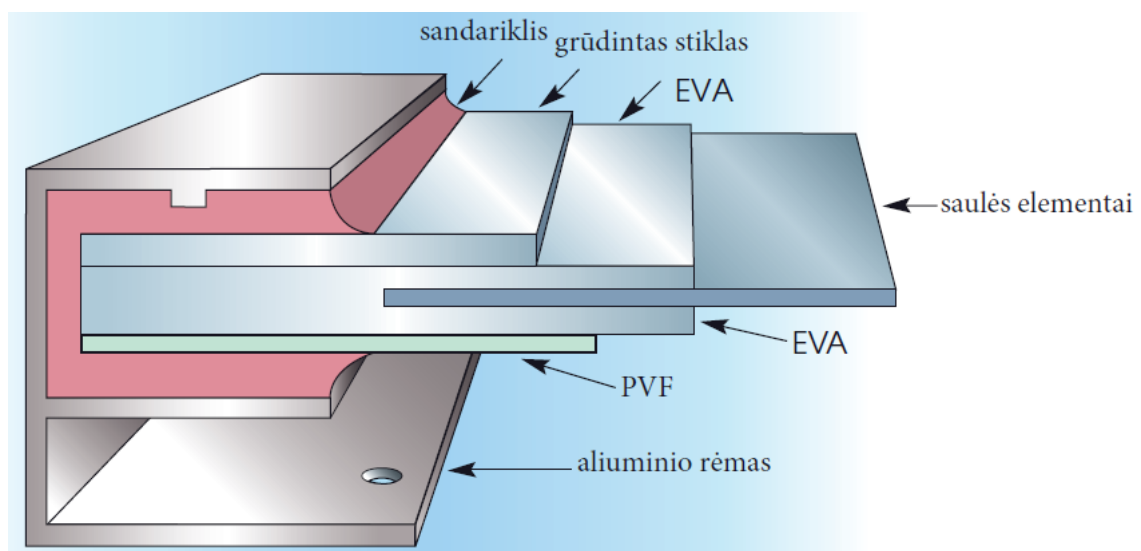
Amorfinis silicis yra nekristalinė silicio forma, kuri yra nusodinama plona plėvele ant skirtingų pagrindų. Kadangi nusodinimui yra nereikalinga aukšta temperatūra, pagrindų medžiagos yra pigios. Šių elementų gamybos procesas yra paprastesnis ir pigesnis, lyginant su kristalinių elementų gamybos procesais. Tačiau šių elementų efektyvumas yra žymiai mažesnis ir siekia tik 4-8% [16].

1.7.4. Kitų medžiagų elementai

Saulės elementai gali būti gaminami panaudojant ne tik silicij, bet ir kitų medžiagų junginius. Šie junginiai yra nusodinami plona plėvele, kaip ir gaminant elementus panaudojant amorfinį silicij, tačiau dėl gamybai naudojamų medžiagų savybių yra pasiekiamas didesnis efektyvumas. Du pagrindiniai komercinėje gamyboje naudojami junginiai yra vario indžio galio selenidas CIGS ir kadmio telūridas CdTe. Iš šių junginių pagamintų saulės elementų efektyvumas yra apie 10-13%. Pagrindiniai šių elementų trūkumai yra naudojamų junginių toksiškumas ir kai kurių elementų visuotinis trūkumas (dėl ko išauga elementų kaina). Pavyzdžiui, gaminant CIGS elementus yra naudojamas indis, kuris yra retas elementas, dėl plataus jo naudojimo skystųjų kristalų ekranams (angl. *liquid crystal display (LCD)*) gaminti. Toliau norint sudaryti šiuose elementuose *p-n* sandūrą, yra panaudojamas kadmio sulfidas CdS, kuris yra nuodingas sunkusis metalas. Elementams gaminti naudojamas CdTe nėra toks kenksmingas, bet yra privaloma laikytis specialių gamybos proceso priemonių [7].

1.8. Saulės fotovoltiniai moduliai

Saulės foto-moduliai – junginys, kuris yra sudarytas iš lygiagrečiai ir nuosekliai tarpusavyje sujungtų saulės elementų, siekiant pasiekti norimas generuoti sroves ir įtampas. Kadangi šis junginys turi būti atsparus atmosferiniams veiksniams, o jo elektriniai išvadai tvirti ir atsparūs korozijai, jis dažniausiai yra izoliuojamas. Tipinio kristalinių saulės elementų modulio konstrukcija yra pavaizduota 1.7 pav. [7].



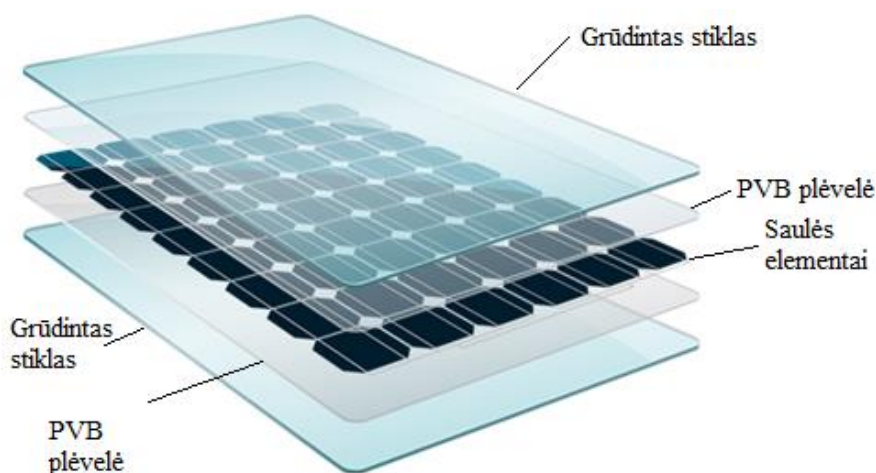
1.7 pav. Tipinio saulės modulio konstrukcija [7]

Saulės elementai yra trapūs, todėl jie yra hermetiškai izoliuojami minkštame etileno vinilacetato sluoksnyje (EVA). Taip jie yra apsaugomi transportavimo ir eksploatavimo metu. Ant šio EVA sluoksnio viršaus yra dedamas grūdintas stiklas, kuris kartais yra padengiamas antirefleksine danga, kad saulės elementus pasiektų maksimalus kiekis saulės spindulių. EVA

sluoksniu apačia padengiama polivinilfluoridu (PVF) – šis sluoksnis veikia kaip barjeras drėgmei ir apsaugo saulės elementus nuo galimo neigiamo cheminio poveikio. Visas šis sluoksnių junginys yra įmontuojamas į aliuminio rėmą, kuriame yra sutvirtinamas sandarikliu. Rėmas naudojamas ne tik sutvirtinti saulės modulį, bet ir palengvinti jo transportavimą bei montavimą [7].

Tokia tipinė konstrukcija yra naudojama, kad saulės elementas efektyviai veiktų ne mažiau kaip 25-30 metus, esant įvairiems atmosferiniams veiksniams. Todėl saulės elementų gamintojai suteikia garantijas bent 20-čiai metų. Pavyzdžiui, vienas iš Lietuvoje veikiančių saulės modulių gamintojų MG AB „Precizika“ savo gaminamiems saulės moduliams „Solet“ suteikia 12 metų veikimo garantiją ir 25 metų garantiją, kad per šį laikotarpį saulės modulio galia nenukris daugiau nei iki 85% nominalios galios [17].

Pastaruoju metu rinkoje pasirodė naujos stiklas-stiklas (kitaiip dar vadinamos dvigubo stiklo) konstrukcijos moduliai. Saulės elementai yra laminuojami tarp dviejų grūdinto stiklo lakštų, stiklą ir saulės elementus sutvirtinant elastinga polivinilbutirialio (PVB) plėvele (žr. 1.8 pav.). Dėl naudojamo galinio grūdinto stiklo ši konstrukcija tampa atsparesne atmosferiniams poveikiams. PVB plėvelės naudojimas padidina efektyviai elektros energijos gamybai tinkamo šviesos spektro diapazoną (saulės moduliai sugeria platesnio šviesos bangos ilgio diapazono šviesos bangas). Ši konstrukcija skiriasi nuo tipinės tuo, kad vietoje galinio modulių izoliacinio PVF sluoksniu yra naudojamas grūdintas stiklas, o pats saulės modulis – berėmis. Dėl šių priežasčių padidėja jų panaudojimo galimybės – tokios konstrukcijos moduliai gali būti integruojami į pastatus, naudojami vietoje įprastų stogo ar sienų dangų ir panaudojami įgyvendinant įvairiausių architektūrinius sprendimus [18].



1.8 pav. Stiklas-stiklas saulės modulio konstrukcija [19]

2. FOTOVOLTINĖS SISTEMOS STRUKTŪRA

Fotovoltinių saulės modulių generuojamai nuolatinės srovės elektros energijai tiekti į elektros energetikos sistemos tinklą turi būti naudojami keitikliai, kurių junginiai su saulės moduliai sudaro fotovoltinę sistemą.

Keitikliai – tai tarpinė grandis tarp saulės modulių ir elektros tinklo, kuri atlieka šias funkcijas:

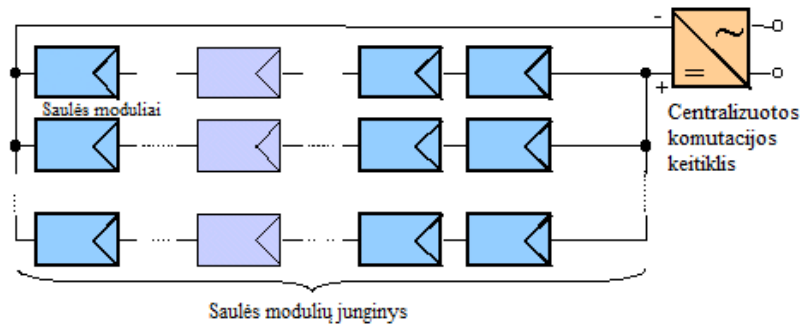
- 1) keičia nuolatinę foto-modulių srovę ir įtampą į esamų tinklo parametrų kintamąją srovę ir įtampą;
- 2) suderina keitiklio išėjimo įtampos fazes ir amplitudes su tinklo įtampos fazėmis ir amplitudėmis, kad srovė tekėtų į elektros tinklą;
- 3) maksimizuoja saulės modulių generuojamą galią, priklausomai nuo momentinių meteorologinių sąlygų (apšvietos ir temperatūros kaitos), surasdama ir palaikydama optimalią jų apkrovą (keitiklio-elektros tinklo varžą suderintą su atstojamąja saulės modulių vidine varža) [1].

Fotovoltinių sistemų struktūra skirstoma į trys grupes pagal tai, kokie naudojami keitikliai ir kaip prie jų jungiami saulės moduliai: centralizuotos komutacijos keitiklius (angl. *central inverter*), pusiau išskirstytos komutacijos keitiklius (angl. *string inverter*) ir modulinės komutacijos keitiklius (angl. *module inverter*) [1].

Jeigu naudojami saulės moduliai yra ne vienodi arba dirba ne tomis pačiomis meteorologinėmis sąlygomis, MGT kiekviename foto-modulyje yra vis kitoks. Dėl to saulės modulių masyvas turi daug maksimalios galios taškų, o ne vieną. Kadangi dažniausiai keitikliai ieško tik bendro masyvo MGT, o ne kiekvieno atskiro saulės modulio, yra nepasiekama galima maksimali galia. Siekiant surasti didžiausią visos sistemos efektyvumą, keitiklio tipas kartu su saulės elektrinės sistemos struktūra yra parenkamas atsižvelgiant į aplinkos sąlygas ir finansines galimybes [12].

2.1. Centralizuotos komutacijos struktūra

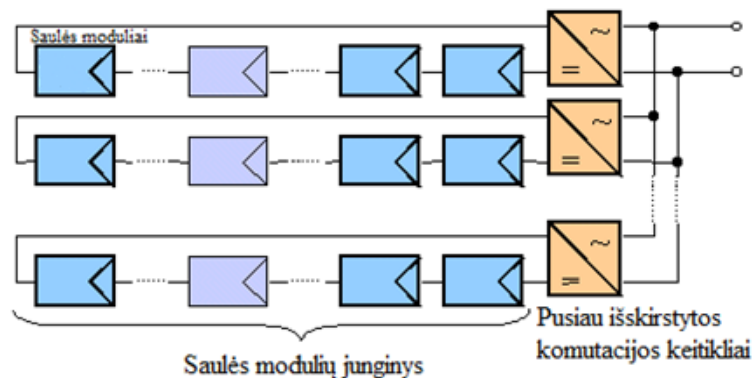
Centralizuoto jungimo saulės elektrinėse saulės foto-moduliai jungiami nuosekliai į junginius, o šie sujungiami lygiagrečiai. Generuojamai elektros energijai tiekti į elektros tinklą toks modulių masyvas yra prijungiamas prie vieno bendro keitiklio (žr. 2.1 pav.), kurio galia būna nuo 1 iki 100 kW. Tokios sistemos privalumas yra finansinis, nes yra reikalingas tik vienas, nors ir galingesnis, keitiklis. Tačiau dėl atskirų saulės modulių skirtumų ir jiems tenkančių meteorologinių sąlygų nevienodumo yra neįmanoma tiksliai maksimizuoti galios ir bendras sistemos efektyvumas mažėja [1].



2.1 pav. Centralizuotos komutacijos saulės elektrinės struktūrinė schema [20]

2.2. Pusiau išskirstytos komutacijos struktūra

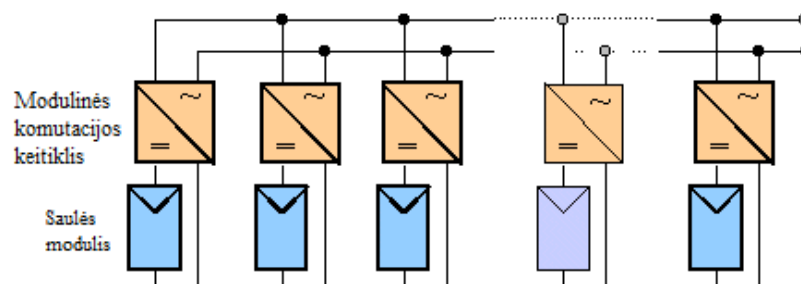
Pusiau išskirstyto jungimo saulės elektrinėse nuosekliai sujungti foto-modulių junginiai jungiami prie kiekvienam junginiui priskirto keitiklio (žr. 2.2 pav.). Šie keitikliai būna mažesnės galios, o saulės modulių nevienodumas ir meteorologinių sąlygų nevienodas pasiskirstymas daro įtaka tik tam vienam junginiui [1]. Tokios sistemos galios maksimizavimas yra efektyvesnis, tačiau padidėja sistemos įrengimo kaina, nes padidėja reikalingų keitiklių kiekis.



2.2 pav. Pusiau išskirstytos komutacijos saulės elektrinės struktūrinė schema [20]

2.3. Modulinės komutacijos struktūra

Modulinio jungimo saulės elektrinėse prie keitiklio yra prijungiamas tik tai vienas saulės foto-modulis (žr. 2.3 pav.) ir tokie junginiai yra tiesiogiai jungiami prie elektros tinklo. Dėl to yra išvengiama galios maksimizavimo nuostolių, kurių kitų struktūrų saulės elektrinėse visiškai išvengti neįmanoma. Šios struktūros elektrinių sistemų efektyvumas yra didžiausias, tačiau jų įrengimo kaina, dėl reikalingo didelio kiekio keitiklių, taip pat didžiausia [1].



2.3 pav. Modulinės komutacijos saulės elektrinės struktūrinė schema [20]

3. MAKSIMALIOS GALIOS TAŠKO SEKIMAS

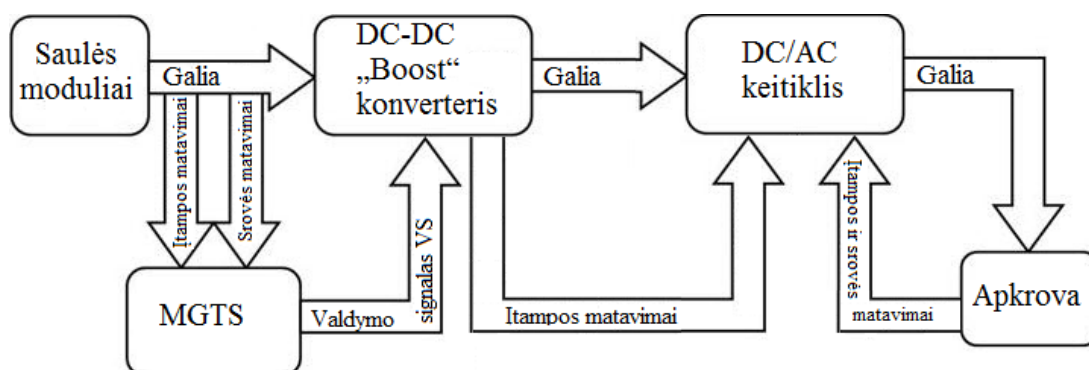
3.1. Maksimalios galios taško sekimo principai

Fotovoltinės elektros generavimo sistemos turi tris pagrindines problemas:

- energijos konversijos efektyvumas yra mažas (siekia 17-21%), ypač prie mažos apšvietos;
- gaminamas elektros energijos kiekis visada kinta priklausomai nuo meteorologinių sąlygų;
- saulės modulio voltamperinė charakteristika yra netiesinė ir priklauso nuo apšvietos, temperatūros ir apkrovos [21].

Nors šių sistemų įrenginių efektyvumas didėja, o kainos mažėja, išlieka tikslas toliau ieškoti būdų kaip išgauti maksimalią galią iš fotovoltinės sistemos esant įvairioms meteorologinėms sąlygoms. Kaip aptarta 1.5 poskyryje, fotovoltinės sistemos, kurią sudaro bent vienas saulės elementas, galia priklauso nuo apšvietos, temperatūros ir apkrovos srovės. Pagal maksimalios galios perdavimo teoremą, galios šaltinis turintis baigtinę atstojamąją varžą gali perduoti maksimalią savo galimą galią tik tada, kai šio šaltinio ir jo apkrovos atstojamios varžos sutaps [22]. Kadangi aplinkos temperatūros ir apšvietos pakeisti neįmanoma, pasiekti MGT yra naudojamas maksimalios galios taško sekimas. MGTS sistema matuoja foto-modulio ar viso jų masyvo išėigos parametrus ir, panaudojant įvairius skaičiavimo ir sekimo algoritmus (kurie aptariami tolimesniuose šio skyriaus poskyriuose), suranda unikalų tašką saulės foto-modulio ar jų masyvo voltamperinėje ir galios kreivėse (žr. 1.3 poskyrį). Pagal šį surastą maksimalios galios tašką MGTS sistema apskaičiuoja valdymo signalą VS (angl. *duty cycle*) ir siunčia jį DC-DC konverteriui. Dėl savo efektyvumo ir žemos įdiegimo kainos dažniausiai yra naudojamas „Boost“ tipo DC-DC konverteris. Šis konverteris pagal gautą VS signalą sureguliuoja foto-modulių ar jų masyvo įtampą dirbti maksimalios galios taške bei suderina keitiklio-elektros tinklo atstojamąją varžą, atitinkančią maksimalios galios perdavimą į elektros tinklą, su MGT dirbančių foto-modulių vidine atstojamąją varžą [23], [24].

Tipinės fotovoltinės sistemos, kurioje naudojamas MGTS, veikimo struktūrinė schema pateikiama 3.1 pav.

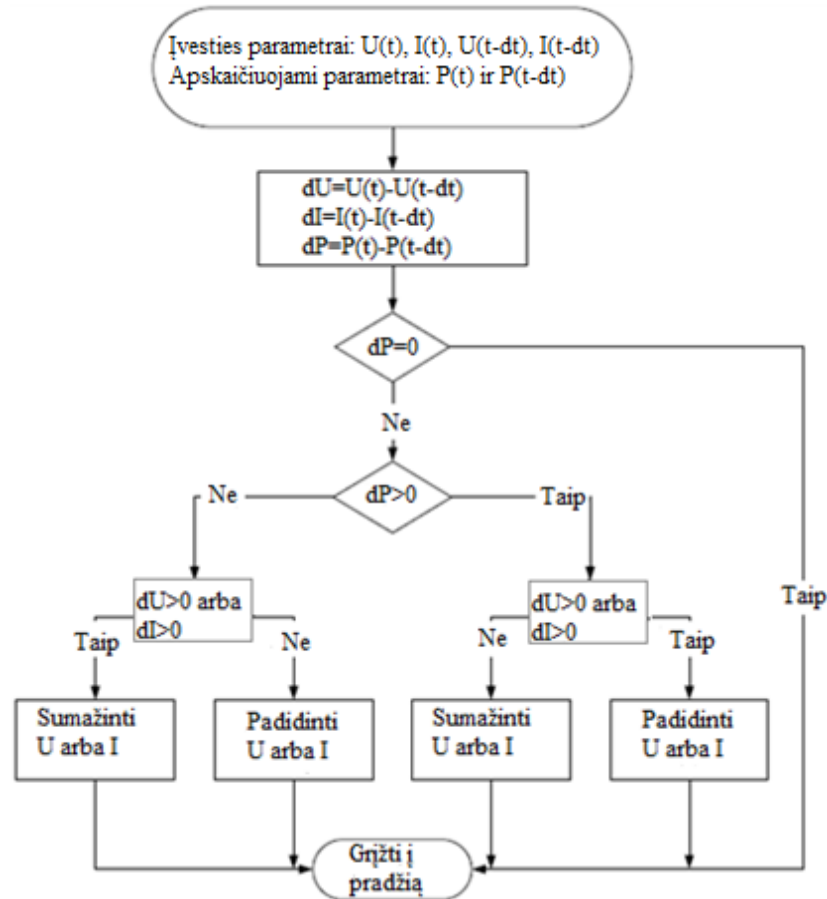


3.1 pav. Fotovoltinės sistemos, kurioje naudojamas MGTS, struktūrinė veikimo schema [23]

3.2. Sekimo metodai ir jų algoritmai

3.2.1. „Sutrikdymo ir sekimo“ metodas

Pirmasis yra „sutrikdymo ir sekimo“ metodas (angl. *Perturb and Observe method*), kurio algoritmo veikimo struktūrinė schema pateikiama 3.2 pav.



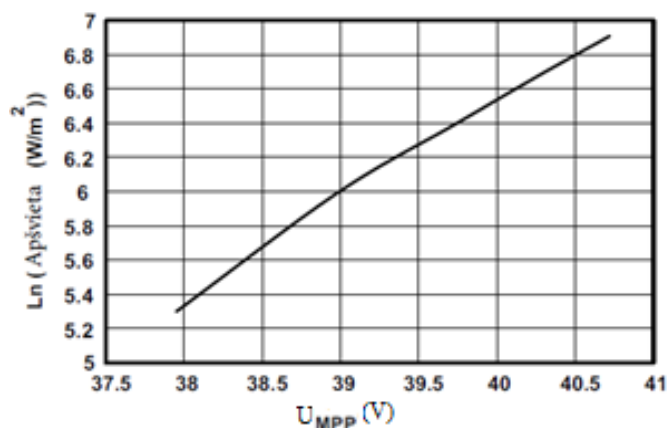
3.2 pav. „Sutrikdymo ir sekimo“ metodo algoritmo struktūrinė veikimo schema [12]

Šiuo būdu sekimo algoritmas ieško maksimalios galios taško, reguliariais intervalais ir labai mažu dydžiu pakeisdamas foto-modulių masyvo įtampą arba srovę („sutrikdo“) ir išmatuodamas jų galią („seka“). Išmatuota masyvo galia yra palyginama su prieš tai buvusio darbo taško galia. Jeigu galia padidėja, įtampa ar srovė toliau yra keičiama ta pačia kryptimi, o galiai sumažėjus įtampa ar srovė yra pakeičiama priešinga kryptimi. Šie foto-modulio masyvo elektriniai parametrai yra keičiami iki tol, kol yra pasiekiamas maksimalios galios taškas. Pasiekus jį, darbo taškas dėl nuolatos vykstančio algoritmo darbo svyruoja su nedidele paklaida aplink idealų MGT, kuris šiuo atveju nėra pasiekiamas [9], [12], [21], [23], [25], [26].

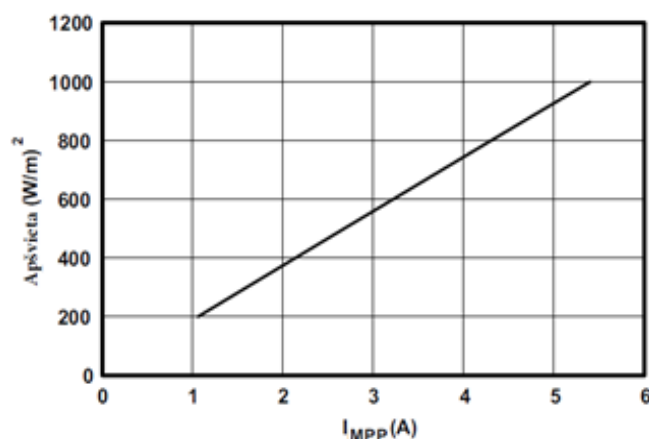
Šio metodo algoritmas dažniausiai yra naudojamas dėl savo paprasto įgyvendinimo, tačiau jis turi ir neigiamų aspektų. Esant mažai apšvietai gali susidaryti galios svyravimai, o esant greitai besikeičiančioms meteorologinėms sąlygoms (esant debesuotai dienai) algoritmas gali parinkti ne tą sekimo kryptį ir taip sumažinti foto-modulio galią, o ne ją padidinti. Algoritmas turi parinkti sekimo objektą, tai yra sekti įtampą ar srovę, ir optimalų sekimo žingsnį – per mažo

sekimo žingsnio parinkimas lems greitus galios svyravimus, o per didelio – lėtą reagavimą į apšvietos pasikeitimą [25].

Iš 3.3 pav. pateiktos „Sanyo“ HIT 215W modulio U_{MPP} priklausomybės nuo apšvietos natūrinio logaritmo matoma, kad maksimalios galios įtampa yra glaudžiai susijusi su apšvietos natūriniu logaritmu ir lėtai reaguoja į apšvietos pokytį. Iš 3.4 pav. pateiktos modulio I_{MPP} priklausomybės nuo apšvietos matyti, kad maksimalios galios srovė yra tiesiogiai proporcinga apšvietai ir greitai reaguoja į jos pokytį [26].



3.3 pav. „Sanyo“ HIT 215W modulio U_{MPP} priklausomybė nuo apšvietos natūrinio logaritmo [26]



3.4 pav. „Sanyo“ HIT 215W modulio I_{MPP} priklausomybė nuo apšvietos [26]

Pagal 3.3 pav. ir 3.4 pav. pateiktas saulės modulio priklausomybes nuo apšvietos galima teigti, kad maksimalios galios taško sekimas esant didelei apšvietai yra efektyvesnis vykdant įtampos sekimą, o esant mažai apšvietai – srovės sekimą [26].

3.2.2. „Kintančio laidumo“ metodas

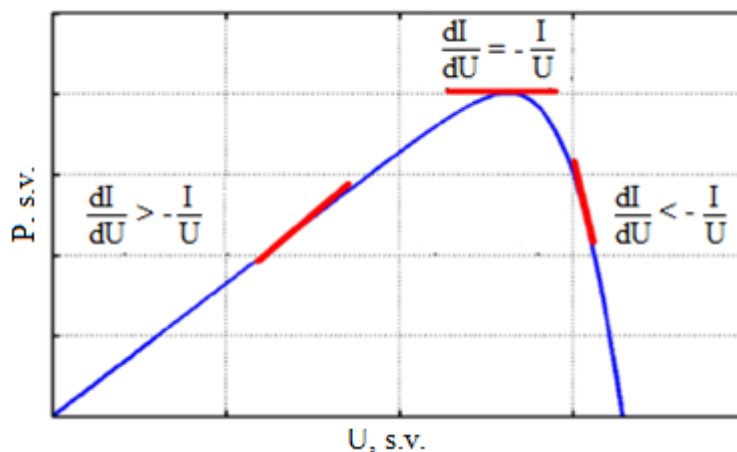
Antrasis yra „kintančio laidumo“ metodas (angl. *Incremental Conductance method*). Šio metodo veikimo principas pagrįstas funkcijos išvestinės taikymu foto-modulių galios-įtampos charakteristikos kreivei. Foto-modulių galios išvestinė įtampos atžvilgiu yra teigiama, kai didėjant įtampai didėja ir galia. Tokiu atveju darbo taškas yra kairėje kreivės dalyje, kylančioje iki MGT. Galios išvestinė įtampos atžvilgiu yra neigiama, kai didėjant įtampai mažėja galia. Tokiu atveju

darbo taškas yra dešinėje kreivės dalyje, besileidžiančioje nuo MGT. Kai ši išvestinė yra lygi nuliui, yra pasiekiamas MGT. Šios trys sąlygos išreikštos 3.2 formulių sistemoje, panaudojant 3.1 lygybę yra matomos 3.5 pav. pateiktoje foto-modulio galios-įtampos charakteristikos kreivėje [12], [21], [25], [26], [27].

$$\frac{dP}{dU} = \frac{d(I \cdot U)}{dU} = I + U \cdot \frac{dI}{dU}; \quad 3.1$$

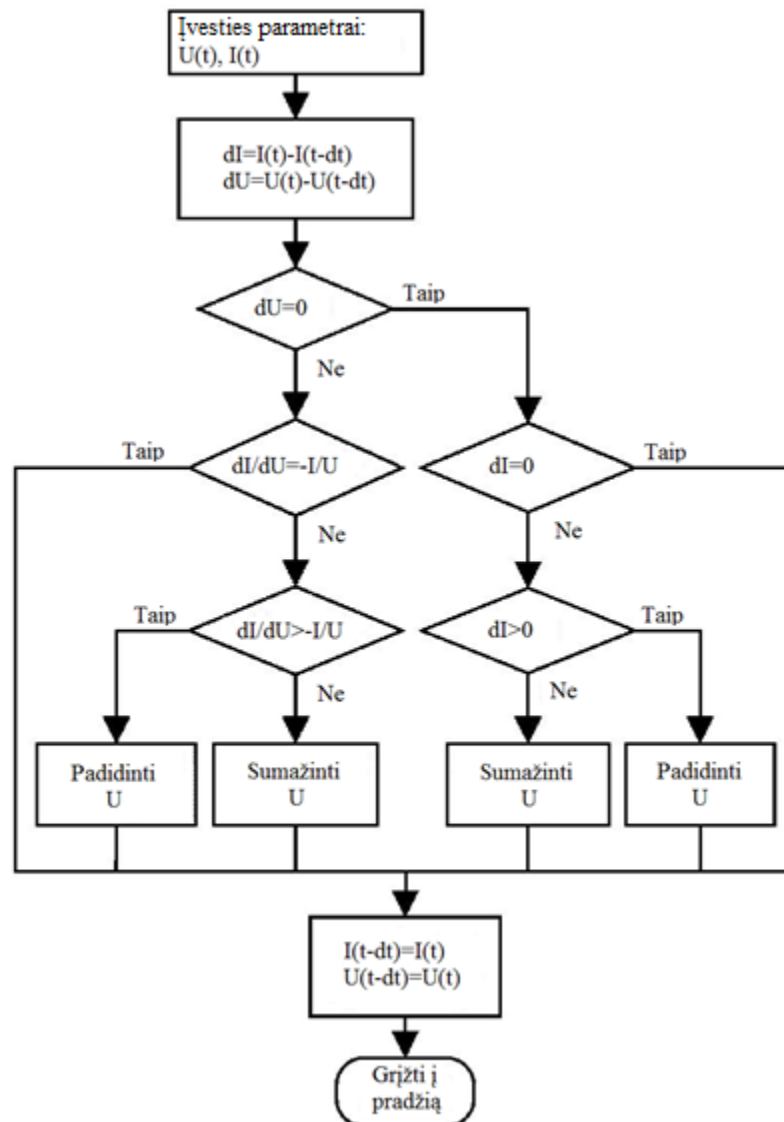
$$\begin{cases} \frac{dP}{dU} = 0 & \gg & \frac{dI}{dU} = -\frac{I}{U}, \text{ pasiektas MGT;} \\ \frac{dP}{dU} > 0 & \gg & \frac{dI}{dU} > -\frac{I}{U}, \text{ darbo taškas yra kairiau MGT;} \\ \frac{dP}{dU} < 0 & \gg & \frac{dI}{dU} < -\frac{I}{U}, \text{ darbo taškas yra dešiniau MGT.} \end{cases} \quad 3.2$$

čia dI – saulės elemento, modulio ar jų masyvo srovės pokytis, A;
 dP – saulės elemento, modulio ar jų masyvo galios pokytis, W;
 dU – saulės elemento, modulio ar jų masyvo įtampos pokytis, V.



3.5 pav. „Kintančio laidumo“ metodo išvestinės taikymas foto-modulio galios kreivėje [27]

Sekimo algoritmas pirmiausia išmatuoja foto-modulių masyvo srovę bei įtampą ir apskaičiuoja jo laidumą I/U . Toliau yra pakeičiama masyvo įtampą dydžiu dU , išmatuojamas srovės pokytis dI ir apskaičiuojamas pokyčio laidumas dI/dU . Šie laidumai yra sudedami ir, pasiekus jų sumą lygią nuliui, nustojama keisti įtampą - maksimalios galios taškas yra pasiektas. Šis procesas pradedamas kartoti tik tada, kai yra išmatuojamas srovės pokytis, o tai įvyksta pasikeitus meteorologinėms sąlygoms (apšvietai ar temperatūrai). Kol ši suma yra didesnė už nulį, didinama įtampą, jeigu suma tampa mažesnė už nulį – įtampą mažinama. Šio metodo algoritmo veikimo struktūrinė schema pateikiama 3.6 pav. [12], [25], [28].



3.6 pav. „Kintančio laidumo“ metodo algoritmo struktūrinė veikimo schema [25]

Šis metodas tinkamiausias taikyti, kai apšvieta keičiasi dažnai, kadangi jis gali reaguoti greitai į meteorologinių sąlygų pokyčius. Įtampos pokyčio dU dydis nusako šio MGT taško sekimo greitį. Kuo dU didesnis tuo jis greičiau suranda maksimalios galios tašką, tačiau didesnis suradimo greitis sąlygoja, kad surandamas ne visiškai tikslus MGT, o tik apytikslis. Parinktas labai mažas dU dydis lemtų tikslesnį, bet lėtesnį MGT sekimą. Itin lėtas MGT sekimas gali sąlygoti per didelę sistemos triukšmų įtaką, kas sukeltų begalinius MGT ieškojimus [12], [25].

3.2.3. „Tuščiosios veikos įtampos“ metodas

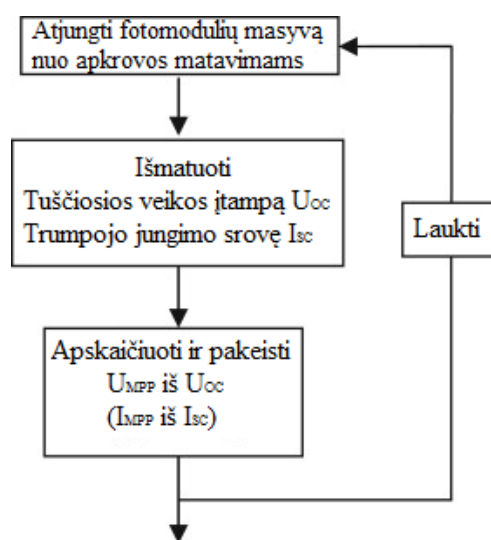
Trečiasis yra „tuščiosios veikos įtampos“ metodas (angl. *Open Circuit Voltage method*). Šiuo būdu sekimo algoritmas panaudoja apytikslę tiesinę priklausomybę, išreikštą 3.3 formulėje, tarp foto-modulių masyvo tuščiosios veikos įtampos U_{OC} ir maksimalios galios taško įtampos U_{MPP} , kuri priklauso nuo meteorologinių sąlygų (apšvietos ir temperatūros) [25].

$$U_{MPP} \approx k_1 \cdot U_{OC}; \quad 3.3$$

Čia k_1 – koeficientas, nusakantis U_{OC} ir U_{MPP} tarpusavio priklausomybę, s.v.

Šis k_1 koeficientas leidžia įvertinti meteorologinių sąlygų įtaką maksimalios galios taško įtampai U_{MPP} ir yra nustatomas empiriniu arba modeliavimo būdu įvairioms tikėtinioms apšvietos ir temperatūros sąlygoms. Šio koeficiento reikšmė yra tarp 0,73 ir 0,8 [26].

Pirmiausia foto-modulių masyvas yra momentaliai atjungiamas nuo apkrovos su nuosekliai į grandinę įjungtu jungikliu, o su lygiagrečiai įjungtu voltmetru yra išmatuojama šio masyvo tuščiosios veikos įtampa U_{OC} . Tada pakeičiama masyvo įtampa tam tikru koeficientu k_1 (žr. 3.3 formulę) ir prijungiama buvusi apkrova. Laikoma, kad foto-modulių masyvas pasiekė savo maksimalios galios tašką MGT. Šio metodo algoritmo struktūrinė veikimo schema pateikiama 3.7 pav. [21].



3.7 pav. U_{OC} ir I_{SC} metodų algoritmo struktūrinė veikimo schema [29]

Vienas iš šio metodo trūkumų yra tas, kad jis negali sekti MGT nuolatos, dėl U_{OC} matavimo metu patiriamų galios nuostolių. Ši problema gali būti išspręsta įrengus atskirą, prie foto-modulio masyvo neprijungtą, bandomąjį saulės modulį, kuris atstotų viso foto-modulių masyvo parametrus ir būtų naudojamas nustatyti U_{OC} neatjungiant viso foto-modulių masyvo nuo apkrovos. Kitas trūkumas yra tai, kad dėl apytikslės priklausomybės tikras maksimalios galios taškas niekada nėra pasiekiamas. Taip pat, esant šešėliavimo atvejui, naudojamą tiesioginę priklausomybę yra sudėtinga įvertinti dėl koeficiento k_1 nustatymo sudėtingumo [12].

3.2.4. „Trumpojo jungimo srovės“ metodas

Ketvirtasis yra „trumpojo jungimo srovės“ metodas (angl. *Short Circuit Current method*). Šiuo būdu sekimo algoritmas panaudoja apytikslę tiesinę priklausomybę, išreikštą 3.4 formulėje, tarp foto-modulių masyvo trumpojo jungimo srovės I_{SC} ir maksimalios galios taško srovės I_{MPP} , kuri priklauso nuo meteorologinių sąlygų (apšvietos ir temperatūros).

$$I_{MPP} \approx k_2 \cdot I_{SC}; \quad 3.4$$

Čia k_2 – koeficientas, nusakantis I_{SC} ir I_{MPP} tarpusavio priklausomybę, s.v.

Šis k_2 koeficientas leidžia įvertinti meteorologinių sąlygų įtaką maksimalios galios taško srovei I_{MPP} ir yra nustatomas empiriniu arba modeliavimo būdu įvairioms tikėtinioms apšvietos ir temperatūros sąlygoms. Šio koeficiento reikšmė yra tarp 0,78 ir 0,92 [25].

Pirmiausia foto-modulių masyvas yra momentaliai užtrumpinamas su lygiagrečiai į grandinę įjungtu jungikliu, o su nuosekliai įjungtu ampermetru yra išmatuojama šio masyvo trumpojo jungimo srovė I_{SC} . Tada pakeičiama masyvo srovė tam tikru koeficientu k_2 (žr. 3.4 formulę) ir sistema grąžinama į buvusį darbo režimą. Laikoma, kad foto-modulių masyvas pasiekė savo maksimalios galios tašką MGT. Šio metodo algoritmo struktūrinė veikimo schema pateikiama 3.7 pav. [21].

Šio metodo trūkumai yra panašūs į 3.2.3 punkte aptarto „tuščiosios veikos įtampos“ metodo. Pirmiausia jis negali sekti MGT nuolatos, dėl I_{SC} matavimo metu patiriamų galios nuostolių, o dėl apytikslės priklausomybės tikras maksimalios galios taškas niekada nėra pasiekiamas. Taip pat, esant šešėliavimo atvejui, naudojamą priklausomybę yra sudėtinga įvertinti dėl koeficiento k_2 nustatymo sudėtingumo [12].

3.2.5. „Nuolatinio duomenų atnaujinimo“ metodas

Penktasis yra „nuolatinio duomenų atnaujinimo“ metodas (angl. *Current Sweep method*). Šio metodo taikymo metu yra gaunama voltamperinė foto-modulio ar masyvo charakteristika. Tai atliekama periodiškai, esant nustatytam laiko intervalui. Pasikeitus meteorologinėms sąlygoms iš naujai gautų voltamperinės charakteristikos duomenų yra surandama nauja maksimalios galios taško įtampa ir į ją pakeičiama prieš tai buvusi. Taip pasiekiami maksimali foto-modulių ar jų masyvo galia [12], [25].

Panaudojant šį metodą praktiškai neįmanoma sekti MGT, kai apšvieta pasikeičia ne tolygiai. Taip yra todėl, kad periodinis duomenų atnaujinimas trunka 50 ms laikotarpį, per kurį MGT nenustojamai keičiasi. Šiuo 50 ms laikotarpiu foto-moduliai dirba ne maksimalios galios taške – patiriami galios nuostoliai. Todėl šį metodą verta taikyti tik tada, kai patiriami galios nuostoliai yra mažesni už surasto MGT galios vertės padidėjimą [25]. Taip pat šio metodo pritaikymas yra sudėtingas, nes reikia matuoti įtampą ir srovę vienu metu.

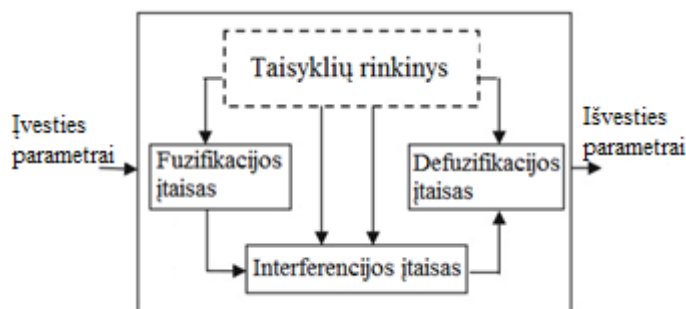
Nepaisant aukščiau išvardintų trūkumų, šiuo metodu yra gaunamas tikrasis maksimalios galios taškas. Šį metodą tikslinga panaudoti sistemoje su kitais MGTS metodais, pavyzdžiui, nustatyti MGT pačioje saulės elektrinės darbo pradžioje ir pereiti prie kito metodo naudojimo arba atlikti periodinę kitų naudojamų MGTS algoritmų patikrą ar sistema dirba realiame MGT [12].

3.2.6. „Maksimalios galios taško įtampos ir srovės apskaičiavimo“ metodas

Šeštasis yra maksimalios galios taško srovės I_{MPP} ir įtampos U_{MPP} apskaičiavimo metodas, pagrįstas MGT ieškojimu panaudojant apšvietos ir temperatūros duomenis saulės foto-modulio kompiuteriniam modeliavimui. Šiam metodui yra reikalingi papildomi realaus laiko parametrų matavimai bei tikslus saulės foto-modulio ar jų masyvo kompiuterinis modelis, kuris yra sudėtingas ir sunkiai sukuriamas. Tačiau turint tokį modelį, panaudojus realaus laiko matavimus, MGT taškas yra sekamas esant bet kokioms (lėtai ir greitai kintančioms) meteorologinėms sąlygoms. Dėl tokios MGT sekimo sistemos sukūrimo kainos, jos yra naudojamos didelėse saulės elektrinėse, kuriose nedideli efektyvumo padidėjimai lemia labai didelius elektros energijos gamybos kiekio padidėjimus [12], [25].

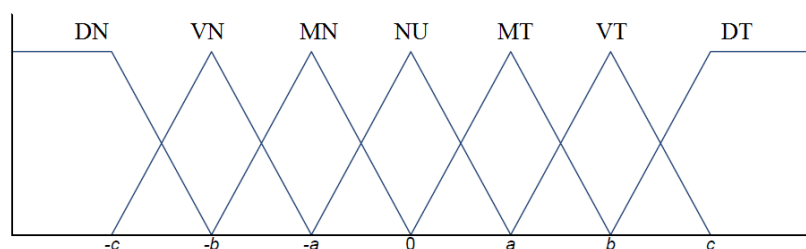
3.2.7. Neraiškios logikos metodas

Septintasis metodas yra neraiškios logikos valdymo sistemos panaudojimas MGT sekimui. Šios sistemos veikimo struktūrinė schema pavaizduota 3.8 pav. Ji susideda iš 4 pagrindinių dalių: interferencijos įtaiso (angl. *interference mechanism*), fuzifikacijos įtaiso (angl. *fuzzification*), defuzifikacijos įtaiso (angl. *defuzzification*), taisyklių rinkinio (angl. *rule base*) [29].



3.8 pav. Neraiškios logikos valdymo sistemos struktūrinė veikimo schema [29]

Pirmiausia fuzifikacijos įtaisas pakeičia sekimui reikalingų skaitinių reikšmių įvestis į lingvistines reikšmes, pagal priklausomybės funkciją taisyklių rinkinyje (žr. 3.9 pav.). Naudojamų lingvistinių reikšmių kiekis priklauso nuo valdymo sistemos tikslumo. 3.9 pav. pateiktame pavyzdyje yra panaudojamos 7 lingvistinės reikšmės: DN (didelis neigiamas), VN (vidutinis neigiamas), MN (mažas neigiamas), NU (nulis), MT (mažas teigiamas), VT (vidutinis teigiamas), DT (didelis teigiamas). Dydžiai a , b ir c nurodo skaitinių reikšmių įvesties intervalą [25], [28].



3.9 pav. Priklausomybės funkcija tarp fuzifikacijos įtaiso įvesties ir išvesties [12]

Įvestis yra pasirinkto parametro pokytis E per laiko vienetą k ir šio pokyčio pasikeitimas ΔE per laiko vienetą k . Parametrus parenka sekimo algoritmo kūrėjas, bet dažniausiai, siekiant surasti MGT fotovoltinėse sistemose, yra parenkamas foto-modulių galios P ir įtampos U pokyčių santykis $\Delta P/\Delta U$ (žr. 3.5 ir 3.6 formules).

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{U(k) - U(k-1)}; \quad 3.5$$

$$\Delta E(k) = E(k) - E(k-1). \quad 3.6$$

čia $E(k)$ – neraiškios logikos valdymo sistemos įvesties parametras;

$\Delta E(k)$ – neraiškios logikos valdymo sistemos įvesties parametro pokytis.

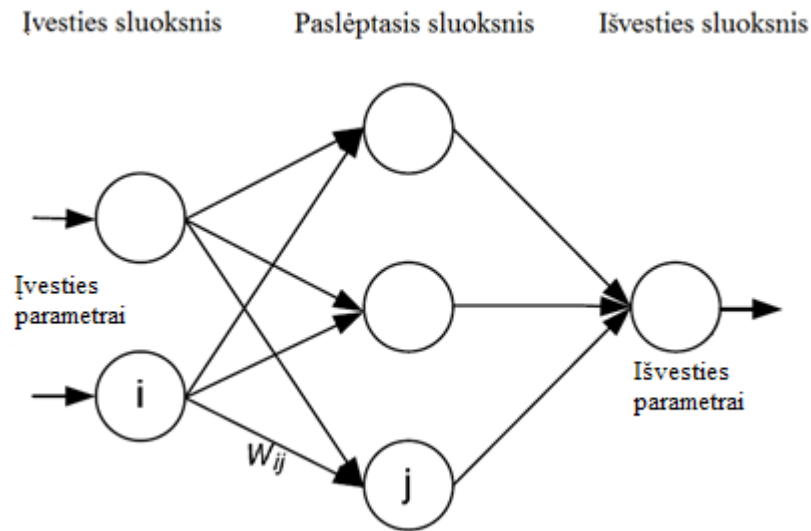
Interferencijos įtaisas panaudoja taisyklių rinkinį, kuriame yra sukaupti duomenys apie tai, kaip kiekvienu E ir ΔE pokyčių kombinacijų atveju reikia keisti foto-modulių sistemos įtampa U , ir nustato valdymo komandą, kad darbo taškas judėtų link MGT. Išeinantis lingvistinis atsakymas iš interferencijos įtaiso yra verčiamos atgal į skaitines reikšmes, panaudojant defuzifikacijos įtaisą. Šis panaudoja taisyklių rinkinyje sukauptą informaciją ir kiekvieną interferencijos įtaiso komandą paverčia skaitine reikšme, pagal kurią yra sekamas MGT [25].

Pagrindinis šio metodo privalumas yra tas, kad jis gali apdoroti netikslius duomenis. Jam yra nereikalingas tikslus matematinis modelis ir susidaro minimalūs svyravimai apie MGT. Tačiau šio metodo efektyvumas tiesiogiai priklauso nuo jo kūrėjo išmanymo, tinkamo parametro pokyčio sekimo pasirinkimo ir tikslaus taisyklių rinkinio sukūrimo [29], [30].

3.2.8. Neuroninių tinklų metodas

Aštuntasis metodas – neuroninis tinklas – struktūra skirta apdoroti informacijai, kuri yra paremta biologinės nervų sistemos veikimu. Jį sudaro daug tarpusavyje sujungtų ir skaičiavimus atliekančių komponentų, vadinamų neuronais. Tam, kad neuroninis tinklas gebėtų taisyklingai išspręsti paskirtas užduotis, jis turi būti „išmokomas“ iš turimų pavyzdžių ir realių duomenų. Šie pavyzdžiai ir duomenys turi būti kruopščiai parenkami, siekiant išvengti netaisyklingo ir ilgo informacijos apdorojimo („mokymosi“) laiko. Tinklo „mokymas“ vyksta keičiant tarp neuronų (mazgų) esančių jungčių stiprumo koeficientą [25].

Paprasčiausias neuroninis tinklas sekti MGT fotovoltinėse sistemose turi tris sluoksnius: įvesties, paslėptąjį ir išvesties (žr. 3.10 pav.). Sluoksnių ir neuronų (mazgų) skaičius kiekviename sluoksnyje tiesiogiai priklauso nuo šio tinklo sudarinėtojo patirties. Įvesties parametrai gali būti saulės foto-modulių masyvo tuščiosios veikos įtampa U_{OC} , trumpojo jungimo srovė I_{SC} , meteorologinės sąlygos (temperatūra ir apšvieta) arba įvairios šių parametru kombinacijos. Išvestis dažniausiai būna vienas signalas, valdantis keitiklio darbo ciklą, kad būtų pasiektas foto-modulių masyvo MGT ar artimas galios taškas [29].



3.10 pav. Paprasčiausias trijų sluoksnių neuroninis tinklas [25]

Kaip arti MGT yra pasiekiamas darbo taškas priklauso nuo skaičiavimų ir algoritmų, kuriuos naudoja paslėptieji sluoksniai ir kaip gerai yra „išmokytas“ sukurtasis neuroninis tinklas. Siekiant kuo tiksliau sukurti neuroninį tinklą, turi būti įvertinamas jungčių tarp mazgų stiprumas, nurodantis kaip stipriai mazgai yra susiję tarpusavyje, pvz., jungtis tarp mazgų i ir j turi w_{ij} stiprumą (žr. 3.10 pav.). Kad sėkmingai būtų surastas MGT, šie stiprumai turi būti kruopščiai nustatomi „mokymosi“ metu, kai foto-modulių masyvas yra išbandomas esant įvairiausioms (įvesties) sąlygoms ir visi gauti išvesties rezultatai yra įrašomi į neuroninį tinklą [12], [25], [29].

Pagrindinis šio metodo trūkumas yra tai, kad kiekvieno saulės foto-modulių masyvo charakteristikos yra skirtingos. Neuroninis tinklas turi būti „išmokytas“ tik tam specifiniam masyvui sekti. Kadangi pačių foto-modulių masyvų charakteristikos keičiasi laiko atžvilgiu, neuroninis tinklas turi periodiškai „mokintis“, kad būtų pasiektas efektyvus MGT sekimas [25].

3.2.9. Maksimalios galios taško sekimo metodų aptarimas

Didelė dalis fotovoltinėse sistemose naudojamų maksimalios galios taško sekimo metodų ir jų algoritmų veikimo principų yra aprašyti 3.2.1 – 3.2.8 punktuose. Pagrindinės šių 8-ių metodų charakteristikos yra pateiktos 3.1 lentelėje. „Tuščiosios veikos įtampos“ ir „trumpojo jungimo srovės“ bei „sutrikdymo ir sekimo“ ir „kintančio laidumo“ algoritmai atitinkamai yra labai panašūs. Pagrindinis skirtumas tarp MGT sekimui naudojamų „tuščiosios veikos įtampos“ ir „trumpojo jungimo srovės“ algoritmų yra tik sekamas objektas, o „sutrikdymo ir sekimo“ ir „kintančio laidumo“ algoritmų tik sekimo principai. Svarbiausi šiuos metodus apibūdinantys parametrai yra jų įgyvendinimo sudėtingumas, MGT suradimo greitis ir tikrojo MGT pasiekimas. Pagal meteorologines sąlygas tinkamai parinkus MGTS algoritmą, galima pasiekti iki 99,98% maksimalios saulės foto-modulio galios [9], [12], [21-30].

3.1 lentelė. Pagrindinės maksimalios galios taško sekimo metodų charakteristikos [25]

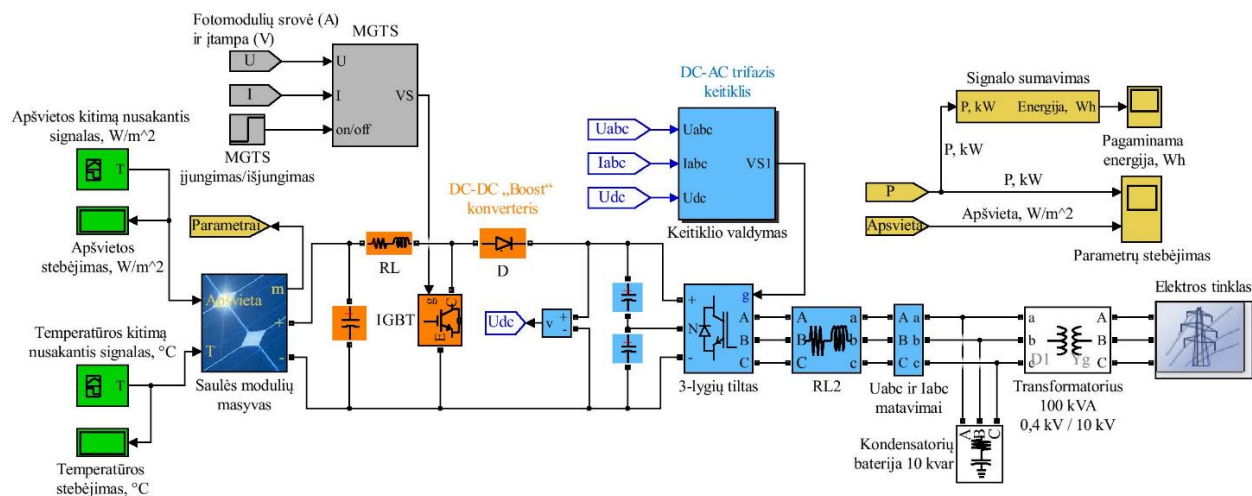
MGTS metodas	Ar priklauso nuo saulės modulio masyvo parametrų?	Ar pasiekiamas tikras MGT?	Analoginis ar skaitmeninis metodo įgyvendinimas?	Ar reikalingas periodiškasis reguliavimas?	MGT taško suradimo greitis	Įgyvendinimo sudėtingumas	Sekami parametrai
„Sutrikdymo ir sekimo“	Ne	Taip	Abu	Ne	Kinta	Lengvas	Įtampa arba srovė
„Kintančio laidumo“	Ne	Taip	Skaitmeninis	Ne	Kinta	Vidutinis	Įtampa arba srovė
„Tuščiosios veikos įtampos“	Taip	Ne	Abu	Taip	Vidutinis	Lengvas	Įtampa
„Trumpojo jungimo srovės“	Taip	Ne	Abu	Taip	Vidutinis	Vidutinis	Srovė
„Nuolatinio duomenų atnaujinimo“	Taip	Taip	Skaitmeninis	Taip	Lėtas	Sudėtingas	Įtampa ir srovė
„Maksimalios galios taško įtampos ir srovės apskaičiavimo“	Taip	Taip	Skaitmeninis	Taip	Lėtas	Sudėtingas	Temperatūra ir apšvieta
Neraiškios logikos	Taip	Taip	Skaitmeninis	Taip	Greitas	Sudėtingas	Įvairūs
Neuroninių tinklų	Taip	Taip	Skaitmeninis	Taip	Greitas	Sudėtingas	Įvairūs

Remiantis analizuota [9], [12], [21-30] literatūra, dažniausiai naudojami MGTS metodų algoritmai yra „sutrikdymo ir sekimo“ ir „kintančio laidumo“. Šių dviejų metodų algoritmai yra vieni iš lengviausiai įgyvendinamų, jie yra universalūs (jų nereikia pritaikyti kiekvienai fotovoltinei sistemai), nereikalauja priežiūros (nereikalingas nuolatinis duomenų atnaujinimas) ir jie geba surasti galios taškus artimus tikrajam MGT. Todėl tolimesnėje projekto dalyje yra sudaroma prie elektros tinklo prijungta fotovoltinė sistema, kurią panaudojant tiriama šių dviejų MGTS algoritmų veikimo parametrai, esant nustatytoms meteorologinėms sąlygoms. Palyginant gautus tyrimo rezultatus, nustatoma kuriomis sąlygomis, kuris MGTS algoritmas yra efektyvesnis.

4. FOTOVOLTINĖS SISTEMOS MODELIAVIMAS

4.1. Maksimalios galios taško sekimo algoritmų tyrimo sistemos modelis

Maksimalios galios taško sekimo „kintančio laidumo“ ir „sutrikdymo ir sekimo“ algoritmų tyrimui sudaromas Matlab „Simulink“ programos aplinkoje prie elektros tinklo prijungtos 100 kW galios saulės elektrinės su MGTS modelis (žr. 4.1 pav.), kurio struktūrinė veikimo schema pateikiama aukščiau aptartame 3.1 poskyryje (žr. 3.1 pav.). Šis modelis sudaromas panaudojant bazinius Matlab „Simulink“ programos aplinkoje prie elektros tinklo prijungtos saulės elektrinės su MGTS modelius [31], [32].



4.1 pav. 100 kW saulės elektrinės su MGTS prijungtos prie 0,4/10 kV elektros tinklo modelis

Foto-modulių masyvas (tamsiai mėlynas blokas) yra sudarytas iš 66 lygiagrečiai sujungtų eilių, sudarytų iš 5 nuosekliai sujungtų „SunPower“ gamintojo SPR-305E-WHT-U foto-modulių. Šio bloko įvesties parametrai yra saulės elemento temperatūros ir apšvietos pokyčius (meteorologines sąlygas) nusakantys signalai (žalia spalva pažymėti blokai). Foto-modulio gamintojo pateikiami elektriniai parametrai, esant standartinėms bandymų sąlygoms (STC):

- tuščiosios veikos įtampa $U_{OC} = 64,2 \text{ V}$;
- trumpojo jungimo srovė $I_{SC} = 5,96 \text{ A}$;
- MGT įtampa $U_{MPP} = 54,7 \text{ V}$, srovė $I_{MPP} = 5,56 \text{ A}$ [33].

Viso masyvo maksimali galia P_{MPP} esant STC yra lygi 100364 W (žr. 4.1 formulę).

$$P_{MPP} = n_s \cdot n_p \cdot U_{MPP} \cdot I_{MPP} = 5 \cdot 66 \cdot 54,7 \cdot 5,56 = 100364 \text{ W}; \quad 4.1$$

Čia P_{MPP} – maksimali foto-modulių masyvo galia esant STC, W.

DC-DC „Boost“ konverteris (oranžine spalva pažymėti blokai), reguliuoja foto-modulių masyvo įtampą, kad būtų pasiektas MGT. Reguliavimui panaudojamas iš MGTS (pilka spalva pažymėti blokai) gaunamas valdymo signalas VS, kurį MGTS algoritmai apskaičiuoja iš išmatuotų foto-modulių masyvo įtampos U ir srovės I . DC-AC trifazis keitiklis (šviesiai mėlyna

spalva pažymėti blokai), pagal išmatuotus tinklo ir DC pusės elektrinius parametrus, keičia foto-modulių nuolatinę įtampą į elektros tinklo parametrus atitinkančią kintamą įtampą (400 V, 50 Hz). MGTS ir DC-AC trifazis keitiklis yra įjungiami su 0,05 s delsa, siekiant imituoti realios sistemos darbą, kai šie įrenginiai pradeda veikti tik tai tada, kai saulės foto-modulių įtampa pasiekia tam tikrą vertę [32].

Visa ši fotovoltinė sistema yra prijungta prie 0,4/10 kV elektros tinklo (balta spalva pažymėti blokai). Prijungta kondensatorių baterija yra naudojama keitiklio sukeltoms harmonikoms nufiltruoti.

MGTS algoritmų veikimo parametrai tiriami stebint jų kitimą ir suintegruojant foto-modulių masyvo galios signalą laiko atžvilgiu (geltonai pažymėti blokai).

4.2. Maksimalios galios taško sekimo algoritmų įgyvendinimas tyrimo sistemos modelyje

Maksimalios galios taško sekimo „sutrikdymo ir stebėjimo“ algoritmas, kurio veikimo struktūrinė schema yra pateikta 3.2 pav., tyrimo sistemos modelyje (žr. 4.1 poskyrį) yra įgyvendinamas žemiau pateikiamo Matlab programos kodu (MGT sekimas vyksta sekant įtampą), kuris yra pateikiamas baziniame Matlab „Simulink“ programos aplinkoje prie elektros tinklo prijungtos elektrinės su MGTS modelyje [31].

```
function VS = MGTS(Ijungimas, U, I)
% Maksimalios galios taško sekimo „Sutrikdymo ir sekimo“ algoritmo (angl. Perturb & Observe algorithm) įdiegimas
į prie elektros tinklo prijungtos fotovoltinės sistemos modelį;
% „VS“ išvestis = surandama valdymo signalo vertė, pagal kurią ieškomas maksimalios galios taškas (reikšmė kinta
tarp 0 ir 1);
% „Ijungimas“ įvestis = 1, jei norima įjungti maksimalios galios sekimą;
% „U“ įvestis = saulės modulių masyvo įtampa (V);
% „I“ įvestis = saulės modulių masyvo srovė (A);
VSinit = 0.5; %Pradinė reikšmė VS išvesčiai;
VSmax = 1; %Maksimali VS vertė;
VSmin = 0; %Minimali VS vertė;
deltaVS = 1e-4; %Dydis naudojamas padidinti arba sumažinti VS vertę priklausomai nuo galios P pokyčio;
persistent Uold Pold VSold;
dataType = 'double';
if isempty(Uold)
    Uold=0;
    Pold=0;
    VSold=VSinit;
end
P= U*I;
dU= U - Uold;
dP= P - Pold;
if dP ~= 0 & Ijungimas ~=0
    if dP < 0
        if dU < 0
            VS = VSold - deltaVS;
        else
            VS = VSold + DeltaVS;
        end
    else
end
end
```

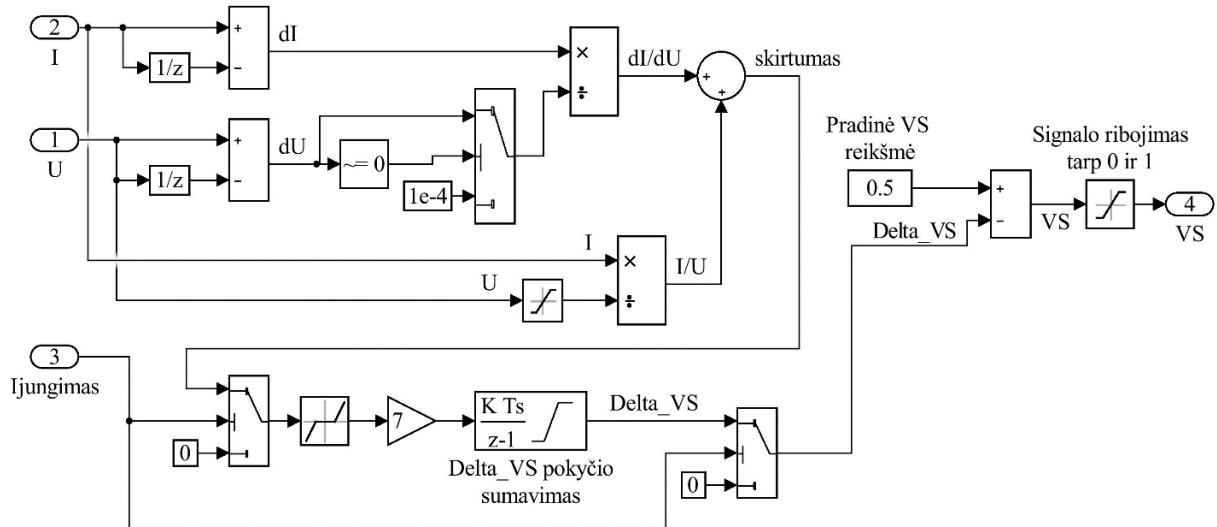
```

if dU < 0
    VS = VSold + deltaVS;
else
    VS = VSold - deltaVS;
end
end
else VS=VSold;
end
if VS >= VSmax | VS<= VSmin
    VS=VSold;
end
VSold=VS;
Uold=U;
Pold=P.

```

Nustatyti algoritmo parametrai: laiko žingsnis 10^{-4} s, valdymo signalo (VS) pokyčio dydis per laiko žingsnį 10^{-4} s.v., įtampos pokyčio dydis per laiko žingsnį 0,2 V, VS kitimo ribos tarp 0 ir 1, pradinė VS vertė 0,5 [31].

Maksimalios galios taško sekimo „kintančio laidumo“ algoritmas, kurio veikimo struktūrinė schema yra pateikta 3.6 pav., tyrimo sistemos modelyje (žr. 4.1 poskyrį) yra įgyvendinamas žemiau pateikiama Matlab „Simulink“ programos funkcinė blokų sandara (žr. 4.2 pav.), kuri yra pateikiama baziniame Matlab „Simulink“ programos aplinkoje prie elektros tinklo prijungtos elektrinės su MGTS modelyje [32].



4.2 pav. MGTS „kintančio laidumo“ algoritmo įgyvendinimas Matlab „Simulink“ programos aplinkoje

Nustatyti algoritmo parametrai: laiko žingsnis 10^{-4} s, valdymo signalo (VS) pokyčio dydis per laiko žingsnį 10^{-4} s.v., įtampos pokyčio dydis per laiko žingsnį 0,2 V, VS kitimo ribos tarp 0 ir 1, pradinė VS vertė 0,5 [32].

4.3. Maksimalios galios taško sekimo algoritmų tyrimo sąlygos

„Kintančio laidumo“ ir „sutrikdymo ir sekimo“ algoritmų tyrimui parenkamas $t=2$ s trukmės modeliavimo laikas, kurio pakanka, kad nusistovėtų MGTS surandama maksimali fotomodulių galia. Sudarytos prijungtos prie elektros tinklo fotovoltinės sistemos modeliavimai

atliekami esant standartinėms bandymų sąlygoms (STC) ir pasirinktoms meteorologinėms sąlygoms vasaros ir žiemos laikotarpiais. STC metu apšvieta yra 1000 W/m^2 , o foto-modulių temperatūra $25 \text{ }^\circ\text{C}$, tačiau realiomis meteorologinėmis sąlygomis, esant 1000 W/m^2 foto-modulių temperatūra būna žymiai didesnė [34]. Todėl nustatyti ribiniams vasaros ir žiemos laikotarpių apšvietos ir temperatūros parametrų dydžiams yra panaudojami veikiančios 30 kW saulės elektrinės, esančios Daubiškių k., Akmenės r. sav., realių parametrų registravimo žurnalo duomenys (žr. Priedas Nr. 1). Ši saulės elektrinė turi meteorologinių sąlygų stebėjimo stotelę, todėl teikia ne tik saulės elektrinės elektrinių parametrų, bet ir saulės modulių temperatūros ir apšvietos parametrų kitimo laike duomenis. Duomenų analizei pasirenkamos 2016 m. liepos mėn. (vasaros laikotarpiui) ir 2016 m. gruodžio mėn. (žiemos laikotarpiui) 15-tos dienos. Pagal pateiktus duomenis matoma, kad vasaros laikotarpio saulėto vidudienio metu apšvieta priklausomai nuo debesuotumo kinta $600\text{-}1000 \text{ W/m}^2$ intervale, o saulės foto-modulių temperatūra, priklausomai nuo aplinkos temperatūros ir esant tokiam apšvietos intervalui, yra vidutiniškai apie $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Žiemos laikotarpio saulėto vidudienio metu apšvieta priklausomai nuo debesuotumo kinta $300\text{-}600 \text{ W/m}^2$ intervale, o saulės foto-modulių temperatūra, priklausomai nuo aplinkos temperatūros ir esant tokiam apšvietos intervalui, yra vidutiniškai apie $10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Fotovoltinės sistemos MGTS algoritmo efektyvumas tiriamas esant laiptiškam apšvietos padidėjimui ir sumažėjimui (angl. *step change*), tolygiam apšvietos padidėjimui ir sumažėjimui per 1 s laikotarpį (angl. *ramp change*) bei esant pastovioms ribinėms apšvietos vertėms. Temperatūra parenkama kiekvienam apšvietos kitimo atvejui pastovi, kadangi realiomis sąlygomis per tokį trumpą laiką ($t=2 \text{ s}$) ji nepasikeičia tiek, kad turėtų įtakos tyrimo rezultatams [21].

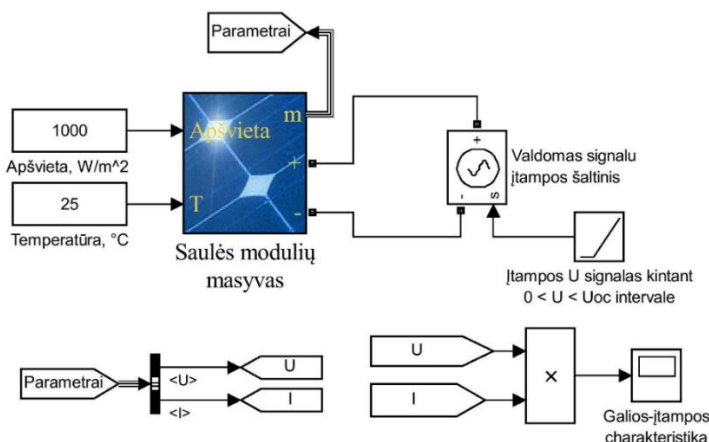
Visos tyrimo apšvietos ir saulės modulių temperatūros sąlygos yra pateikiamos žemiau esančiame sąrašė:

- 1) standartinių bandymų sąlygos: apšvieta 1000 W/m^2 (pastovi), temperatūra $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (pastovi);
- 2) žiemos laikotarpis: apšvieta 600 W/m^2 (pastovi), temperatūra $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (pastovi);
- 3) žiemos laikotarpis: apšvieta 300 W/m^2 (pastovi), temperatūra $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (pastovi);
- 4) žiemos laikotarpis: laiptiškas apšvietos didėjimas nuo 300 iki 600 W/m^2 , temperatūra $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (pastovi);
- 5) žiemos laikotarpis: laiptiškas apšvietos mažėjimas nuo 600 iki 300 W/m^2 , temperatūra $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (pastovi);
- 6) žiemos laikotarpis: tolygus apšvietos didėjimas per 1 s nuo 300 iki 600 W/m^2 , temperatūra $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (pastovi);
- 7) žiemos laikotarpis: tolygus apšvietos mažėjimas per 1 s nuo 600 iki 300 W/m^2 , temperatūra $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (pastovi);

- 8) vasaros laikotarpis: apšvieta 1000 W/m^2 (pastovi), temperatūra $40 \text{ }^\circ\text{C}$ (pastovi);
- 9) vasaros laikotarpis: apšvieta 600 W/m^2 (pastovi), temperatūra $40 \text{ }^\circ\text{C}$ (pastovi);
- 10) vasaros laikotarpis: laiptiškas apšvietos didėjimas nuo 600 iki 1000 W/m^2 , temperatūra $40 \text{ }^\circ\text{C}$ (pastovi);
- 11) vasaros laikotarpis: laiptiškas apšvietos mažėjimas nuo 1000 iki 600 W/m^2 , temperatūra $40 \text{ }^\circ\text{C}$ (pastovi);
- 12) vasaros laikotarpis: tolygus apšvietos didėjimas per 1 s nuo 600 iki 1000 W/m^2 , temperatūra $40 \text{ }^\circ\text{C}$ (pastovi);
- 13) vasaros laikotarpis: tolygus apšvietos mažėjimas per 1 s nuo 1000 iki 600 W/m^2 , temperatūra $40 \text{ }^\circ\text{C}$ (pastovi).

4.4. Saulės foto-modulių masyvo galios-įtampos charakteristikos tyrimas

Siekiant ištirti saulės foto-modulių masyvo galios-įtampos charakteristiką ir surasti idealaus MGT galią yra panaudojamos 1.3 poskyryje aptartos foto-modulių savybės. Šios charakteristikos tyrimui Matlab „Simulink“ programos aplinkoje sudaromas 4.3 pav. pateikiamas modelis.



4.3 pav. Saulės foto-modulių masyvo galios-įtampos charakteristikų tyrimo modelis

Nustačius apšvietos ir saulės modulių masyvo temperatūros sąlygas ir panaudojant signalu valdomą įtampos šaltinį yra keičiama foto-modulių masyvo apkrova nuo trumpojo jungimo metu esančios įtampos vertės (0 V) iki tuščiosios veikos įtampos U_{OC} vertės. Išmatuojama galios nuo įtampos priklausomybė yra atvaizduojama grafiškai, kurioje yra nustatoma idealaus MGT galios vertė.

Ištiriamos 4.1 poskyryje aptartame FVS modelio naudojamo saulės foto-modulių masyvo galios-įtampos charakteristikos, esant šioms ribinėms apšvietos ir saulės modulių masyvo temperatūros vertėms (žr. 4.3 poskyrį):

- apšvieta yra lygi 1000 W/m^2 , o temperatūra $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (STC);
- apšvieta yra lygi 1000 W/m^2 , o temperatūra $40 \text{ }^\circ\text{C}$ (vasaros laikotarpis);

- apšvieta yra lygi 600 W/m^2 , o temperatūra $40 \text{ }^\circ\text{C}$ (vasaros laikotarpis);
- apšvieta yra lygi 600 W/m^2 , o temperatūra $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (žiemos laikotarpis);
- apšvieta yra lygi 1000 W/m^2 , o temperatūra $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (žiemos laikotarpis).

Gautos galios-įtampos charakteristikos pateikiamos Priedas Nr. 2. Šie saulės foto-modulių masyvo galios-įtampos charakteristikos tyrimo rezultatai panaudojami PaO ir InC algoritmų efektyvumo įvertinimui esant nustatytoms meteorologinėms sąlygoms.

4.5. Maksimalios galios taško sekimo algoritmų tyrimo etapai

Panaudojant 4.1 poskyryje aptartą fotovoltinės sistemos modelį ir esant 4.3 poskyryje nustatytomis sąlygomis, MGTS algoritmų parametrų tyrimas atliekamas šiais etapais:

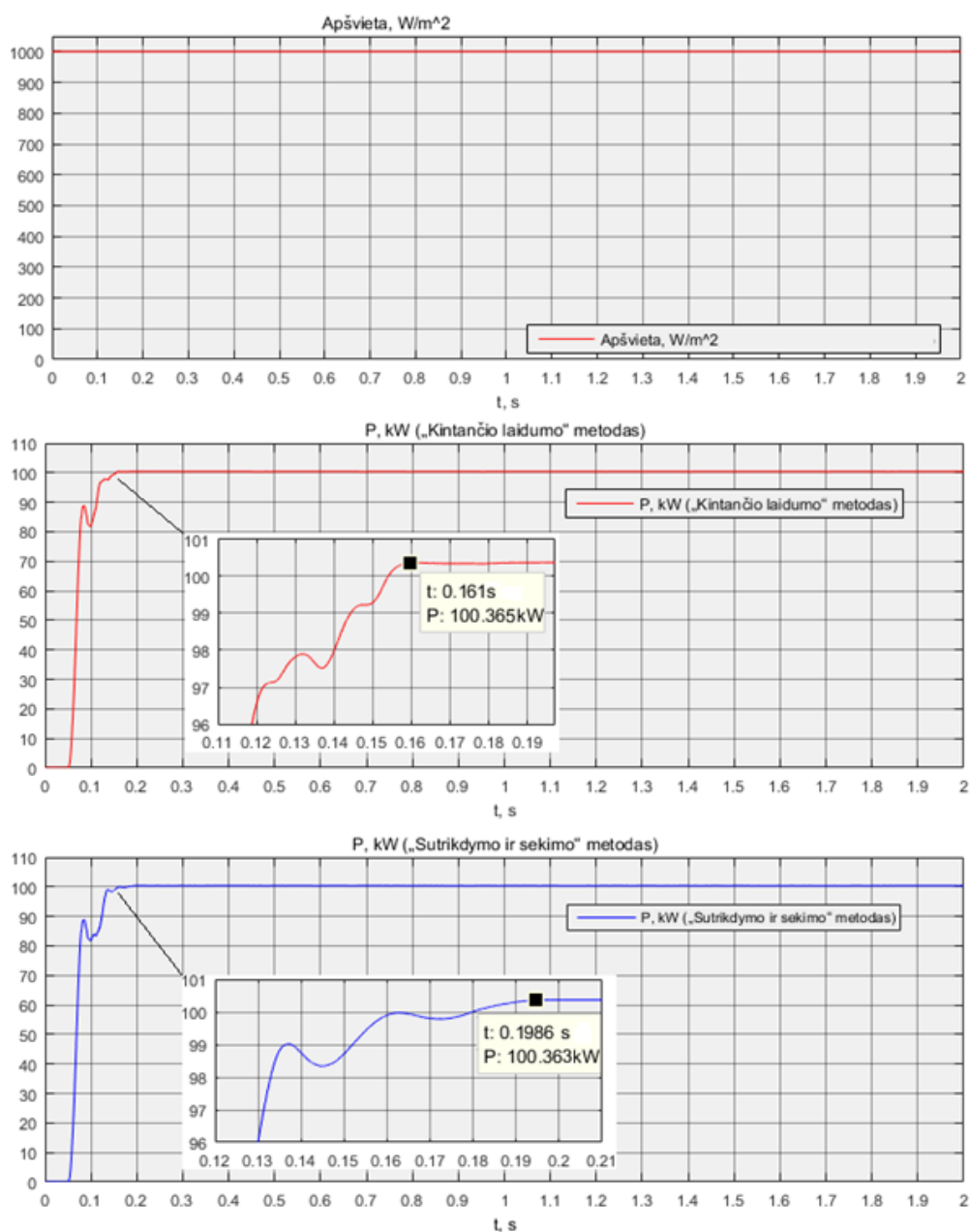
- 1) stebimi foto-modulių masyvo galios kitimai laike;
- 2) palyginamas MGTS algoritmų efektyvumas pagal sugeneruotą foto-modulių elektros energiją, kuri gaunama suintegruojant gautus galios kitimo signalus laiko atžvilgiu;
- 3) nustatomos MGTS algoritmų surastos maksimalios foto-modulių galios vertės;
- 4) palyginamos MGTS algoritmų surastos maksimalios foto-modulių galių vertės su idealia foto-modulių MGT galia (žr. 4.4 poskyrį), esant atitinkamoms tyrimo sąlygoms;
- 5) nustatomi laikai per kuriuos MGTS algoritmų surastos foto-modulių maksimalios galios vertės nusistovi.

5. TYRIMO REZULTATAI

5.1. Maksimalios galios taško sekimo algoritmų tyrimo rezultatai

Maksimalios galios taško sekimo algoritmų tyrimui panaudojamas poskyryje 4.1 aptartas fotovoltinės sistemos prijungtos prie elektros tinklo (FVS) modelis. Tyrimas yra atliekamas esant poskyryje 4.3 nustatytomis meteorologinėmis sąlygomis ir atliekant poskyryje 4.5 išvardintus tyrimo etapus. Modeliavimo rezultatai, gauti panaudojant atitinkamai „kintančio laidumo“ (InC) ir „sutrikdymo ir sekimo“ (PaO) metodus, yra pateikiami žemiau 5.1-5.13 pav.

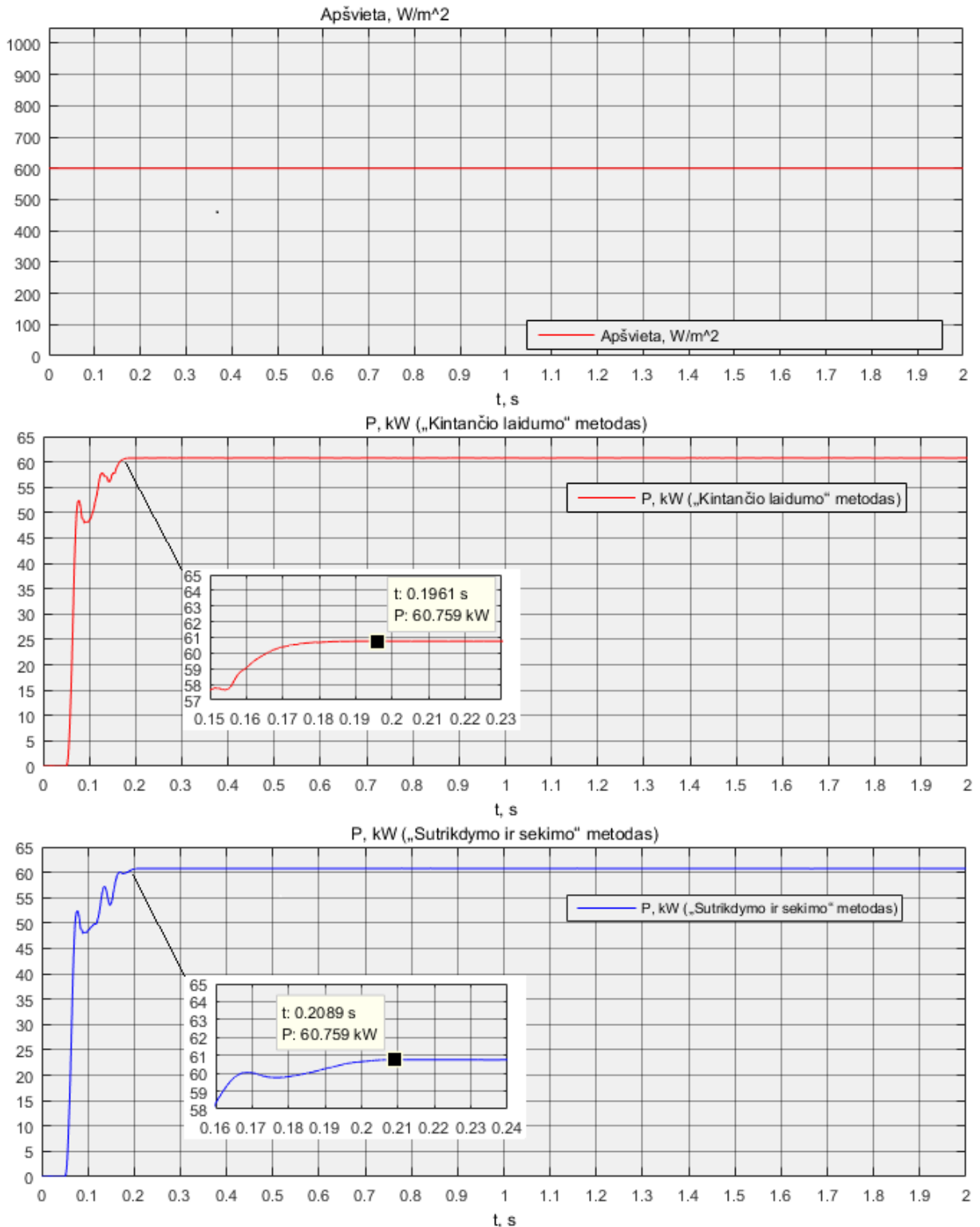
FVS saulės modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, kai apšvieta pastovi ir lygi 1000 W/m^2 , o temperatūra pastovi ir lygi $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (standartinės bandymų sąlygos, STC) yra pateikiama 5.1 pav.



5.1 pav. FVS foto-modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, esant sąlygoms Nr. 1

Šiomis sąlygomis naudojant InC metodą saulės modulių masyvas per 16,1 ms pasiekia 100,365 kW maksimalią galią ir per visą modeliavimo laikotarpį sugeneruoja 53,67 Wh elektros energijos kiekį. O naudojant PaO metodą maksimalią 100,363 kW galią pasiekia per 19,86 ms ir per visą modeliavimo laikotarpį sugeneruoja 53,62 Wh elektros energijos kiekį.

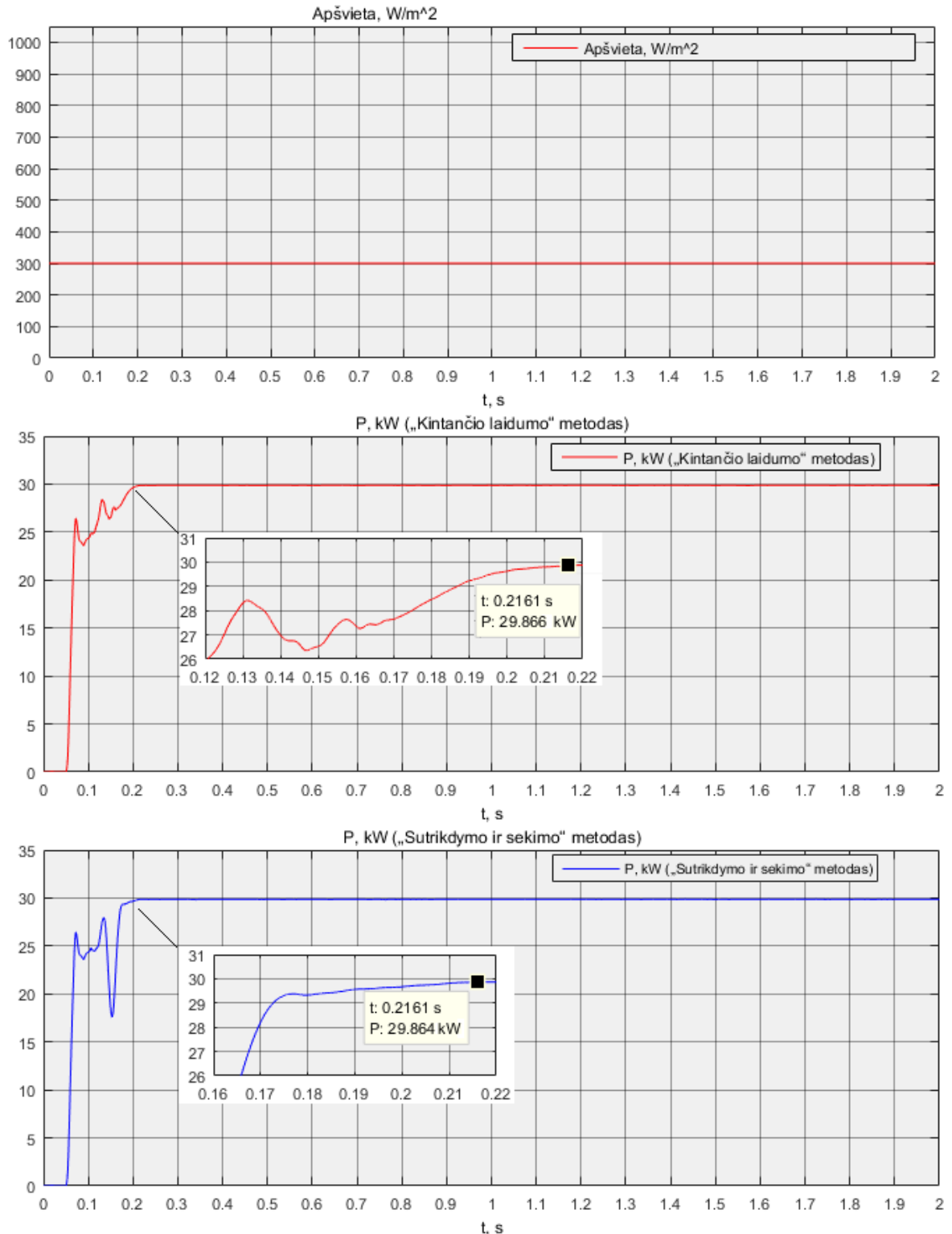
FVS saulės modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, kai apšvieta pastovi ir lygi 600 W/m^2 , o temperatūra pastovi ir lygi $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (žiemos laikotarpis) yra pateikiama 5.2 pav.



5.2 pav. FVS foto-modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, esant sąlygoms Nr. 2

Šiomis sąlygomis naudojant InC metodą saulės modulių masyvas per 19,61 ms pasiekia 60,759 kW maksimalią galią ir per visą modeliavimo laikotarpį sugeneruoja 32,48 Wh elektros energijos kiekį. O naudojant PaO metodą maksimalią 60,759 kW galią pasiekia per 20,89 ms ir per visą modeliavimo laikotarpį sugeneruoja 32,44 Wh elektros energijos kiekį.

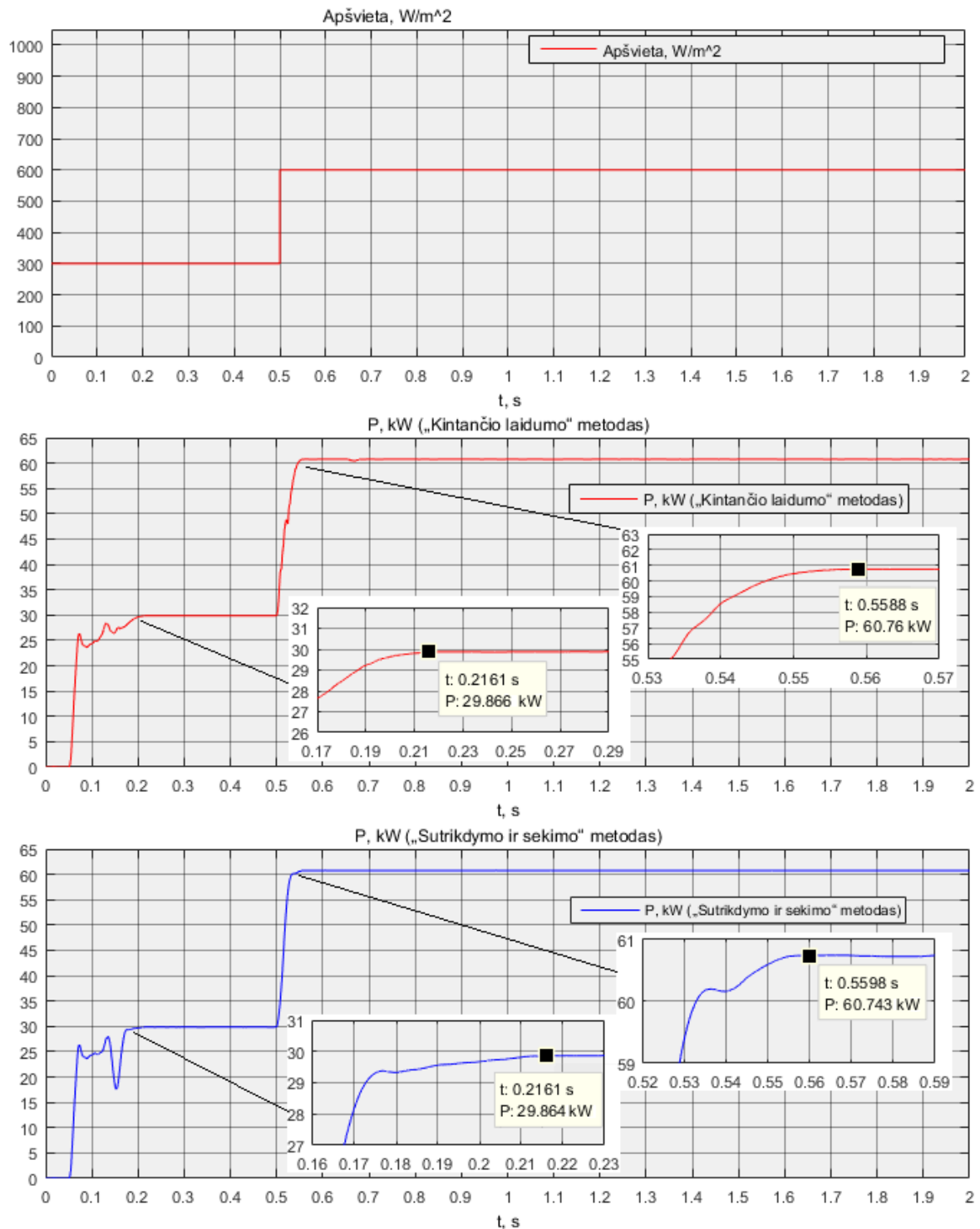
FVS saulės modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, kai apšvieta pastovi ir lygi 300 W/m^2 , o temperatūra pastovi ir lygi $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (žiemos laikotarpis) yra pateikiama 5.3 pav.



5.3 pav. FVS foto-modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, esant sąlygoms Nr. 3

Šiomis sąlygomis naudojant InC metodą saulės modulių masyvas per 21,61 ms pasiekia 29,866 kW maksimalią galią ir per visą modeliavimo laikotarpį sugeneruoja 15,96 Wh elektros energijos kiekį. O naudojant PaO metodą maksimalią 29,864 kW galią pasiekia per 21,61 ms ir per visą modeliavimo laikotarpį sugeneruoja 15,91 Wh elektros energijos kiekį.

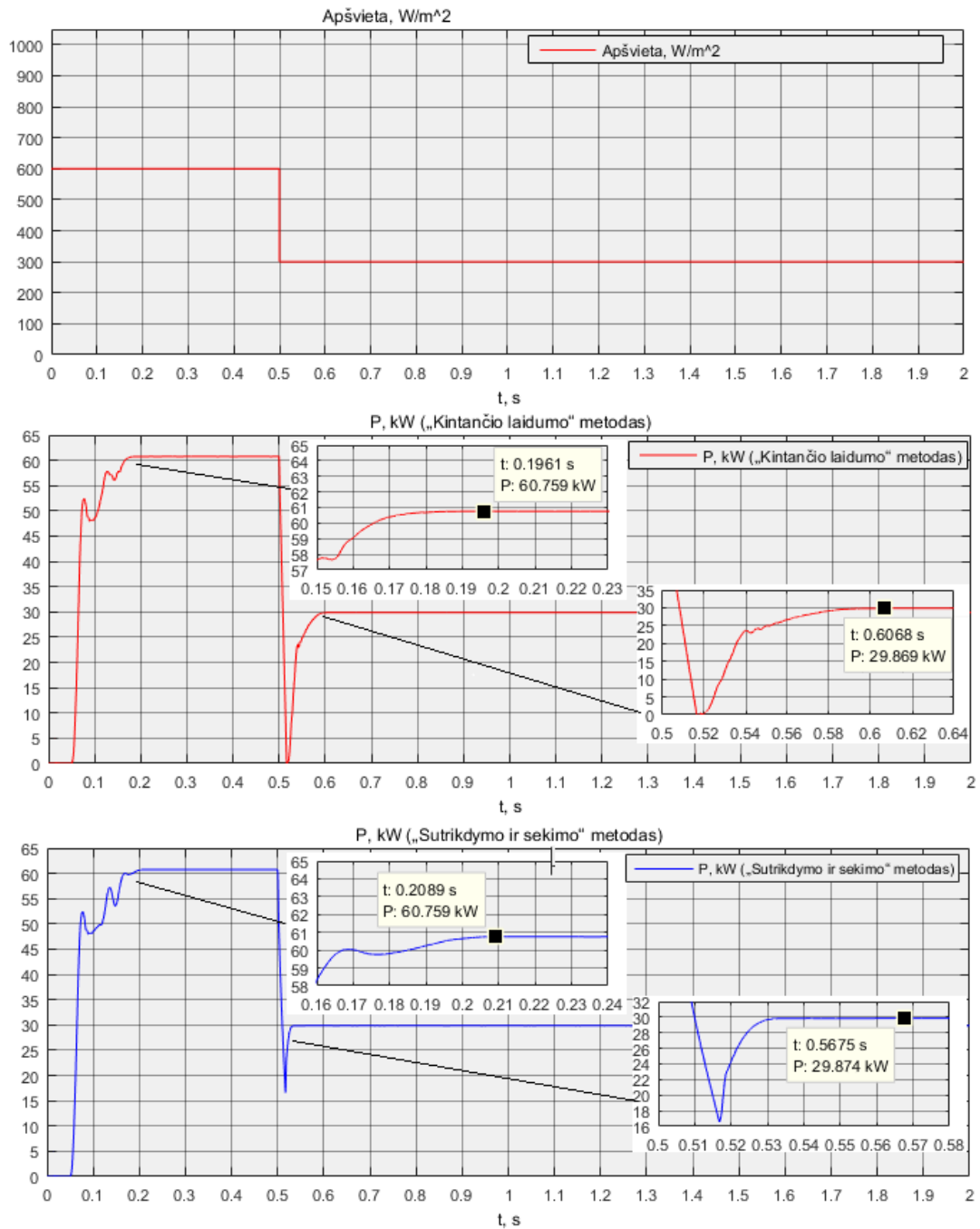
FVS saulės modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, kai apšvieta didėja laiptiškai nuo 300 iki 600 W/m², o temperatūra pastovi ir lygi 10 °C (žiemos laikotarpis) yra pateikiama 5.4 pav.



5.4 pav. FVS foto-modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, esant sąlygoms Nr. 4

Šiomis sąlygomis naudojant InC metodą saulės modulių masyvas per 55,88 ms pasiekia 60,760 kW maksimalią galią ir per visą modeliavimo laikotarpį sugeneruoja 28,66 Wh elektros energijos kiekį. O naudojant PaO metodą maksimalią 60,743 kW galią pasiekia per 55,98 ms ir per visą modeliavimo laikotarpį sugeneruoja 28,64 Wh elektros energijos kiekį.

FVS saulės modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, kai apšvieta mažėja laiptiškai nuo 600 iki 300 W/m², o temperatūra pastovi ir lygi 10 °C (žiemos laikotarpis) yra pateikiama 5.5 pav.

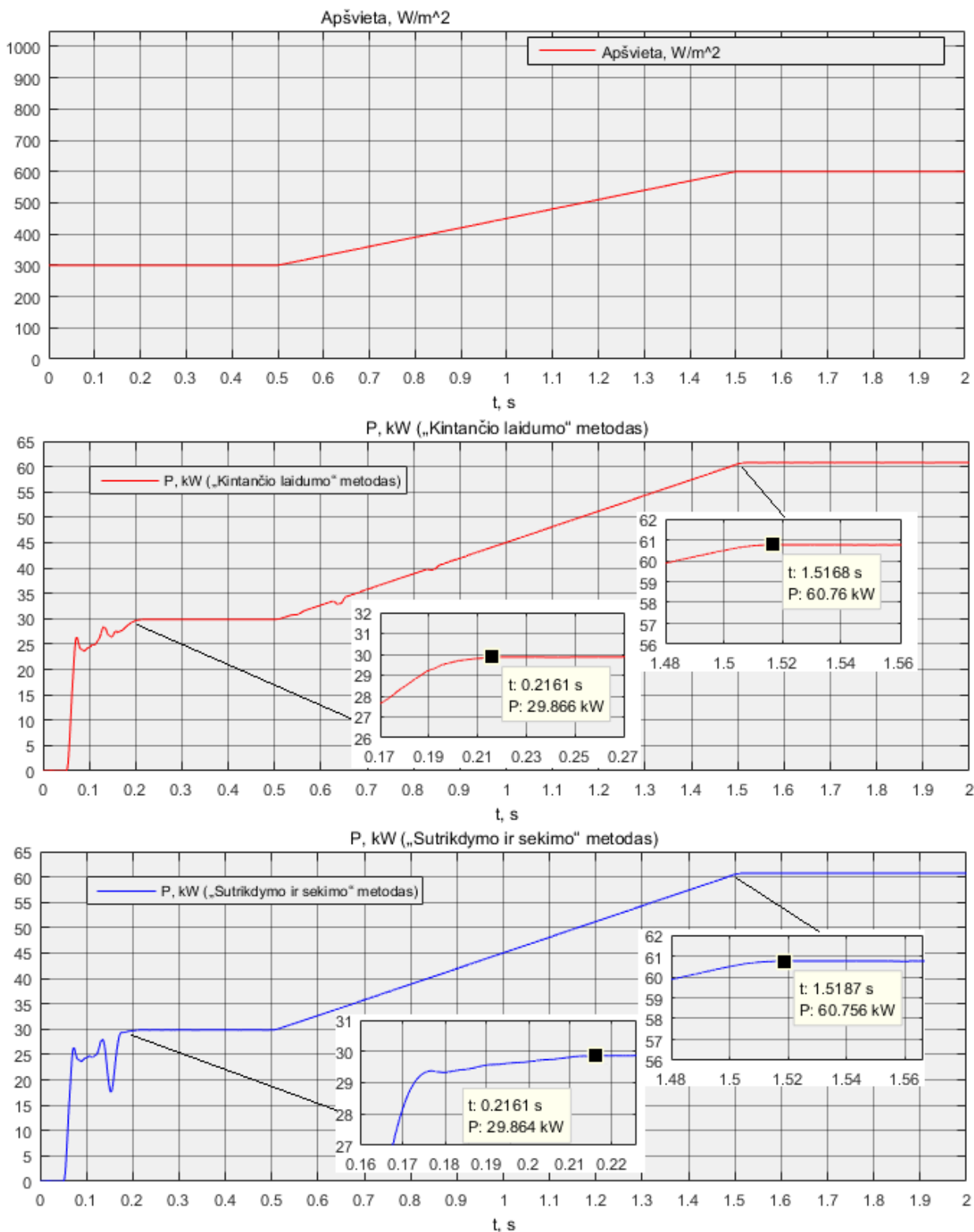


5.5 pav. FVS foto-modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, esant sąlygoms Nr. 5

Šiomis sąlygomis naudojant InC metodą saulės modulių masyvas per 60,68 ms pasiekia 29,869 kW maksimalią galią ir per visą modeliavimo laikotarpį sugeneruoja 19,45 Wh elektros energijos

kiekį. O naudojant PaO metodą maksimalią 29,874 kW galią pasiekia per 56,75 ms ir per visą modeliavimo laikotarpį sugeneruoja 19,58 Wh elektros energijos kiekį.

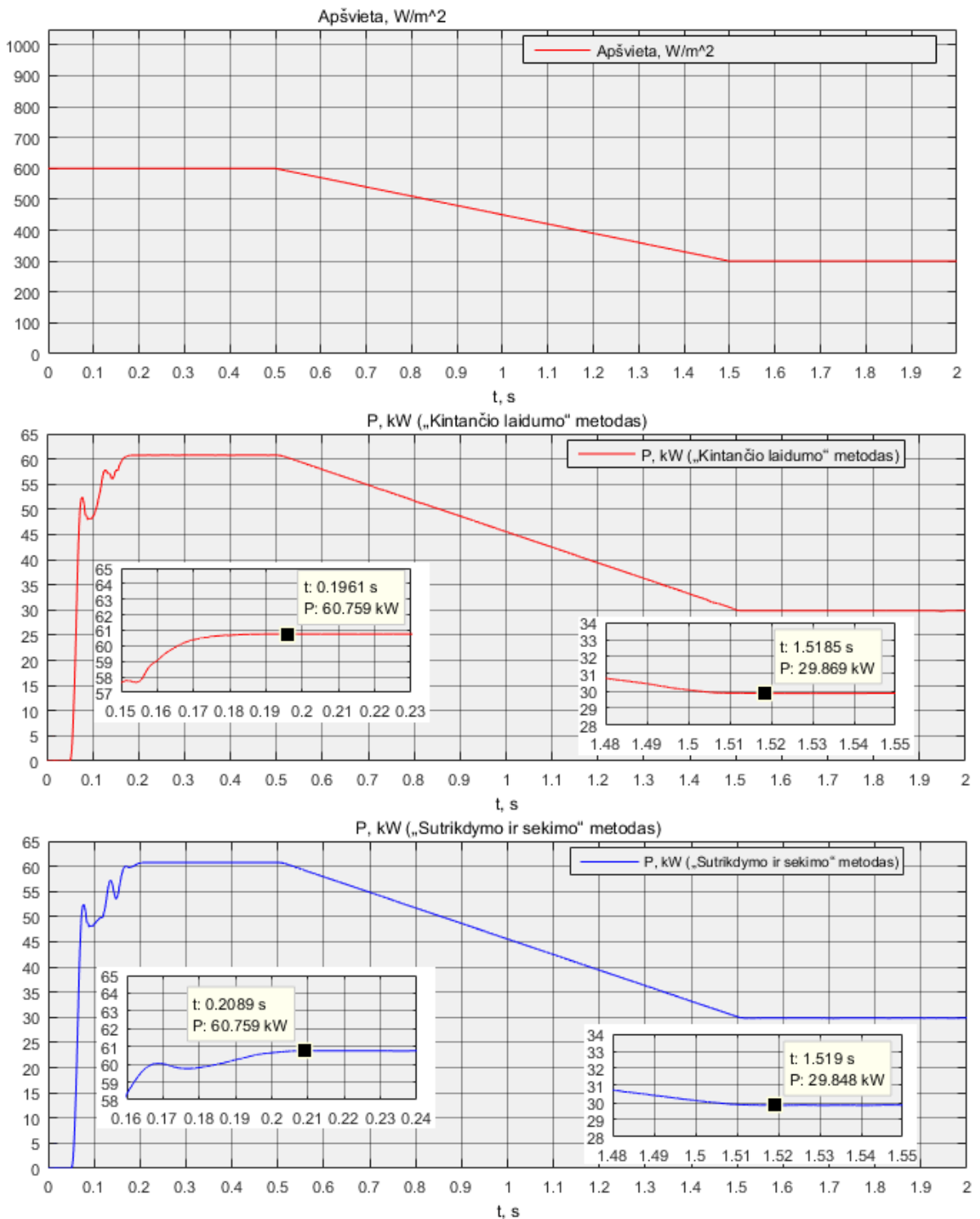
FVS saulės modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, kai apšvieta didėja tolygiai nuo 300 iki 600 W/m², o temperatūra pastovi ir lygi 10 °C (žiemos laikotarpis) yra pateikiama 5.6 pav.



5.6 pav. FVS foto-modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, esant sąlygoms Nr. 6

Šiomis sąlygomis naudojant InC metodą saulės modulių masyvas per 151,68 ms pasiekia 60,760 kW maksimalią galią ir per visą modeliavimo laikotarpį sugeneruoja 24,46 Wh elektros energijos kiekį. O naudojant PaO metodą maksimalią 60,756 kW galią pasiekia per 151,87 ms ir per visą modeliavimo laikotarpį sugeneruoja 24,42 Wh elektros energijos kiekį.

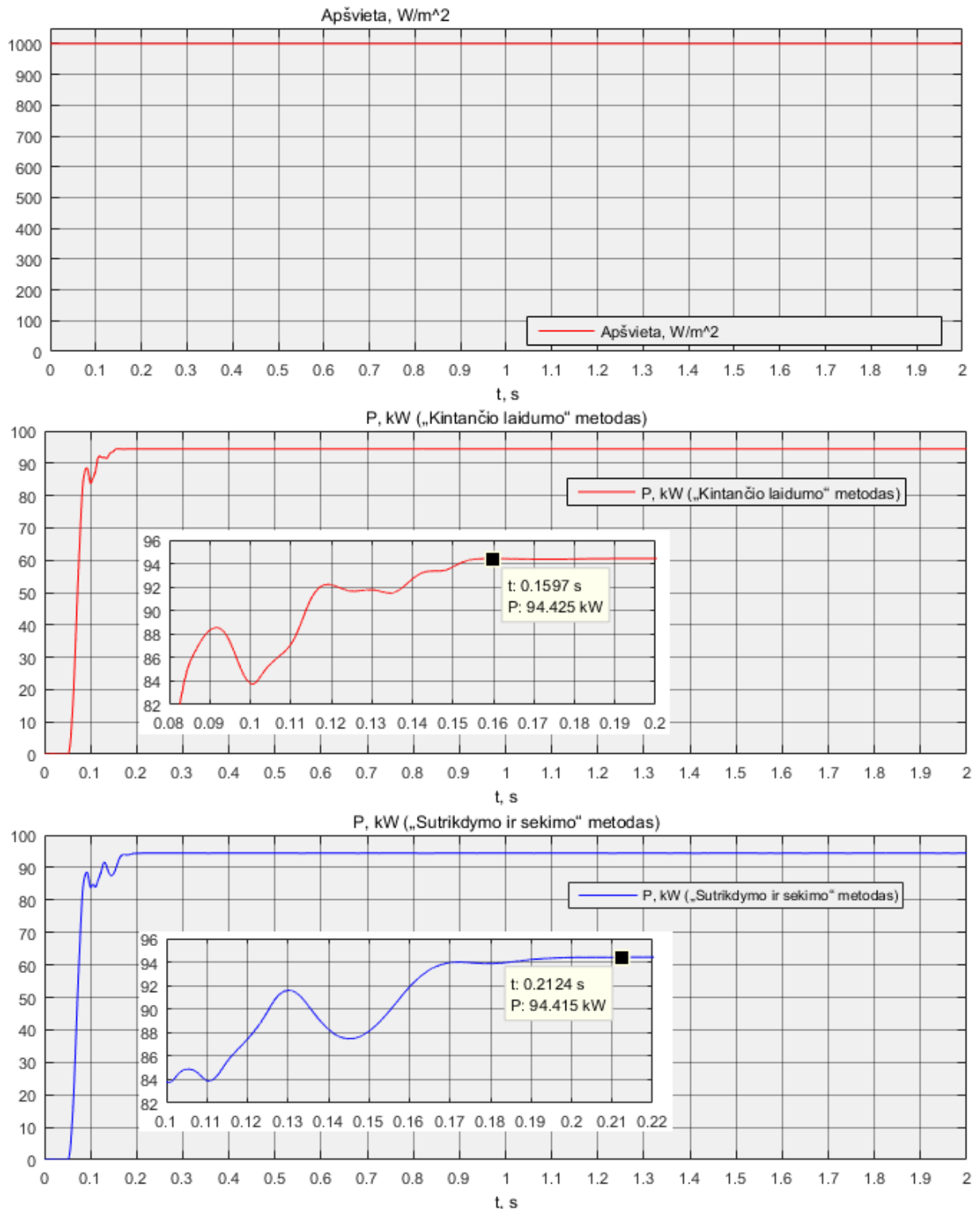
FVS saulės modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, kai apšvieta mažėja tolygiai nuo 600 iki 300 W/m², o temperatūra pastovi ir lygi 10 °C (žiemos laikotarpis) yra pateikiama 5.7 pav.



5.7 pav. FVS foto-modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, esant sąlygoms Nr. 7

Šiomis sąlygomis naudojant InC metodą saulės modulių masyvas per 151,85 ms pasiekia 29,869 kW maksimalią galią ir per visą modeliavimo laikotarpį sugeneruoja 23,97 Wh elektros energijos kiekį. O naudojant PaO metodą maksimalią 29,848 kW galią pasiekia per 151,90 ms ir per visą modeliavimo laikotarpį sugeneruoja 23,93 Wh elektros energijos kiekį.

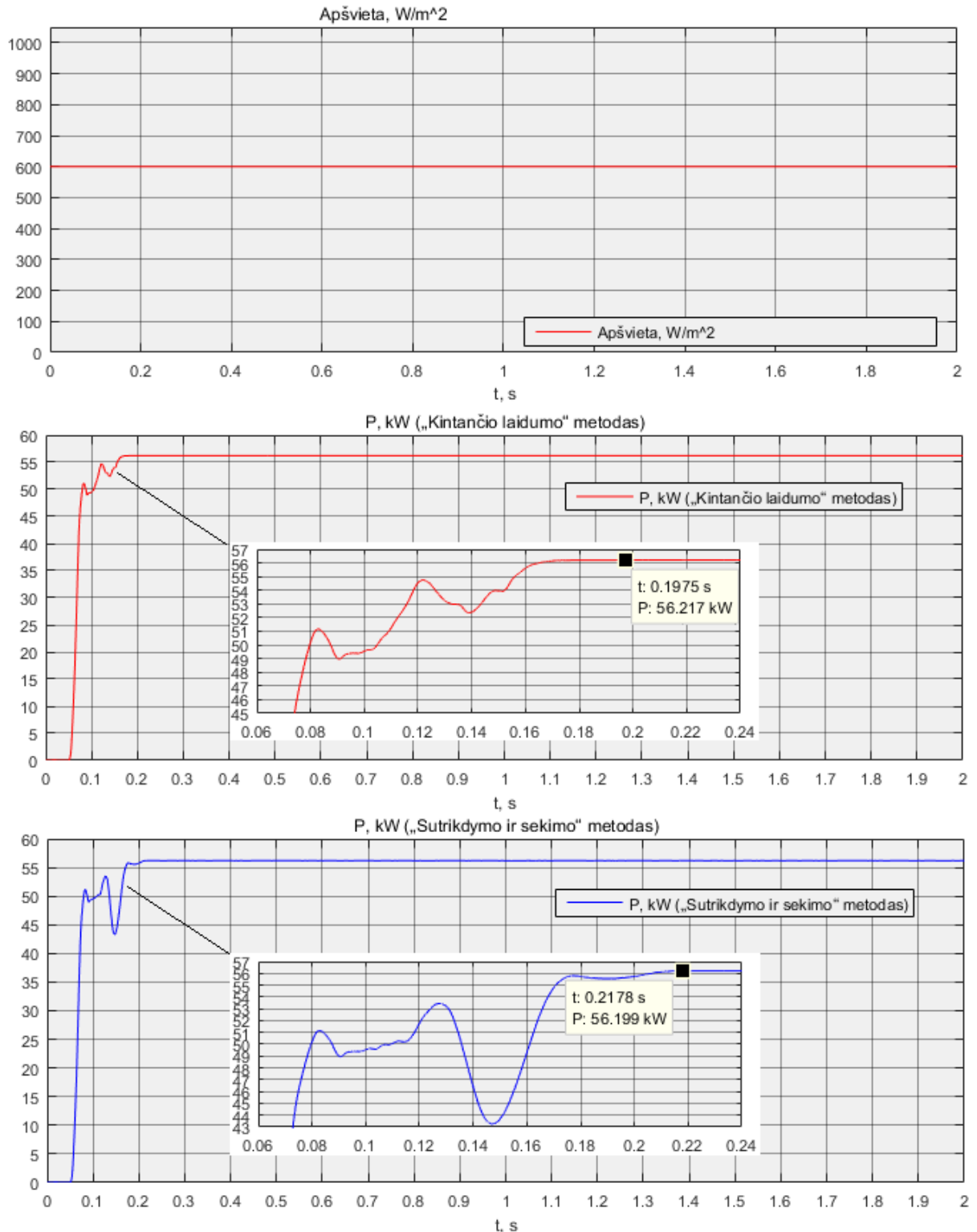
FVS saulės modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, kai apšvieta pastovi 1000 W/m², o temperatūra pastovi ir lygi 40 °C (vasaros laikotarpis) yra pateikiama 5.8 pav.



5.8 pav. FVS foto-modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, esant sąlygoms Nr. 8

Šiomis sąlygomis naudojant InC metodą saulės modulių masyvas per 15,97 ms pasiekia 94,425 kW maksimalią galią ir per visą modeliavimo laikotarpį sugeneruoja 50,51 Wh elektros energijos kiekį. O naudojant PaO metodą maksimalią 94,415 kW galią pasiekia per 21,24 ms ir per visą modeliavimo laikotarpį sugeneruoja 50,44 Wh elektros energijos kiekį.

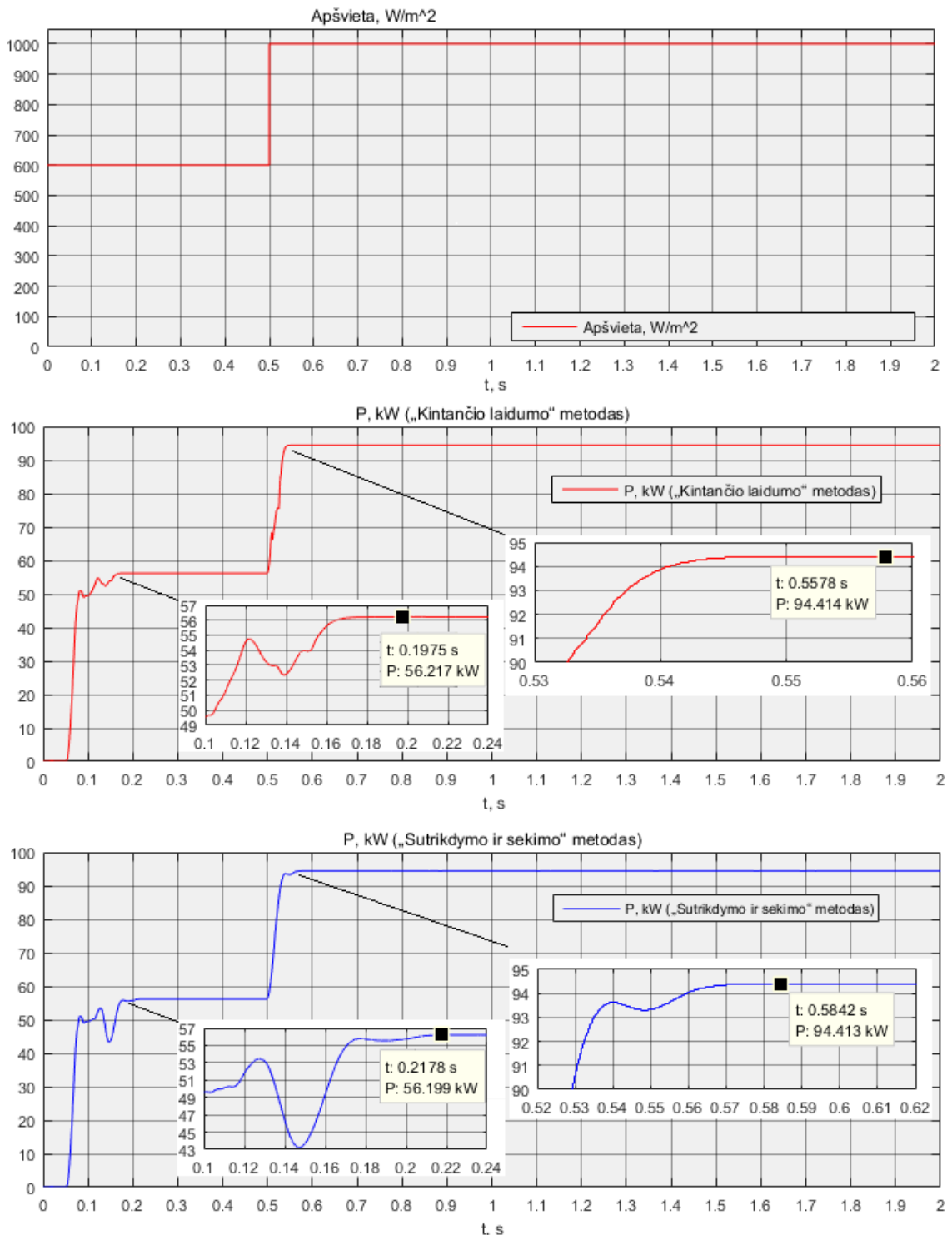
FVS saulės modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, kai apšvieta pastovi 600 W/m², o temperatūra pastovi ir lygi 40 °C (vasaros laikotarpis) yra pateikiama 5.9 pav.



5.9 pav. FVS foto-modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, esant sąlygoms Nr. 9

Šiomis sąlygomis naudojant InC metodą saulės modulių masyvas per 19,75 ms pasiekia 56,217 kW maksimalią galią ir per visą modeliavimo laikotarpį sugeneruoja 30,09 Wh elektros energijos kiekį. O naudojant PaO metodą maksimalią 56,199 kW galią pasiekia per 21,78 ms ir per visą modeliavimo laikotarpį sugeneruoja 29,99 Wh elektros energijos kiekį.

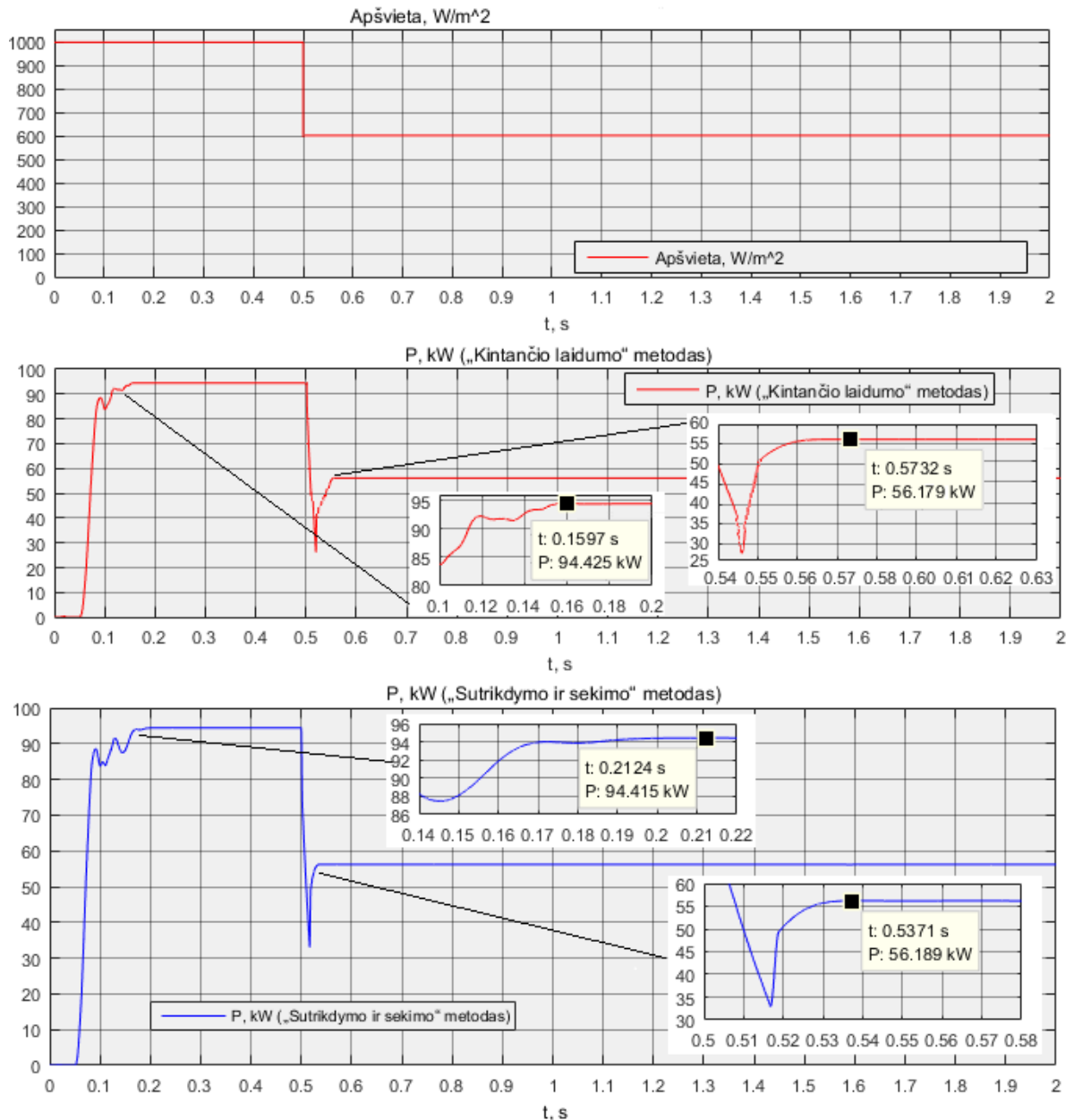
FVS saulės modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, kai apšvieta didėja laiptiškai nuo 600 iki 1000 W/m², o temperatūra pastovi ir lygi 40 °C (vasaros laikotarpis) yra pateikiama 5.10 pav.



5.10 pav. FVS foto-modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, esant sąlygoms Nr. 10

Šiomis sąlygomis naudojant InC metodą saulės modulių masyvas per 55,78 ms pasiekia 94,414 kW maksimalią galią ir per visą modeliavimo laikotarpį sugeneruoja 45,80 Wh elektros energijos kiekį. O naudojant PaO metodą maksimalią 94,413 kW galią pasiekia per 58,42 ms ir per visą modeliavimo laikotarpį sugeneruoja 45,73 Wh elektros energijos kiekį.

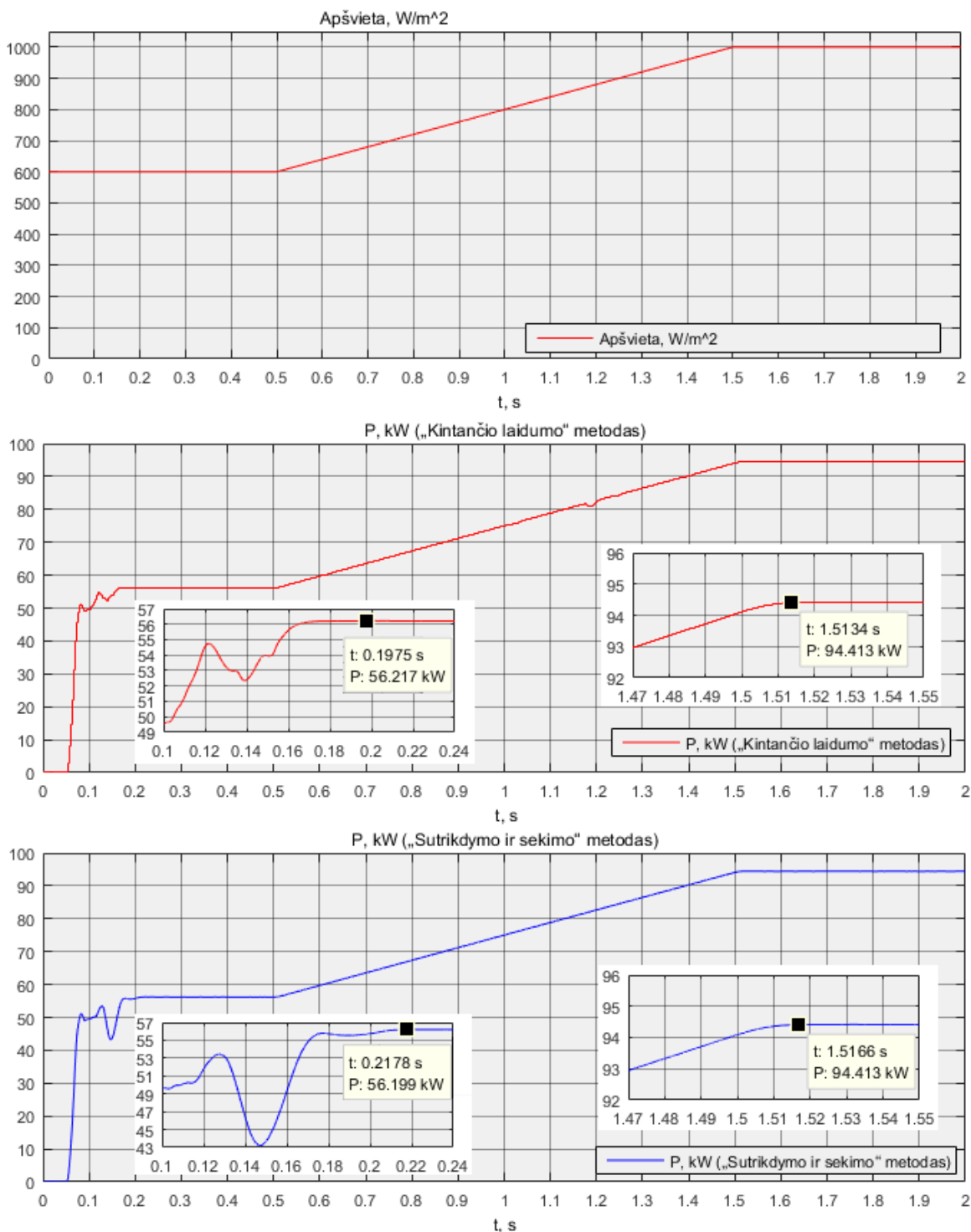
FVS saulės modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, kai apšvieta mažėja laiptiškai nuo 1000 iki 600 W/m², o temperatūra pastovi ir lygi 40 °C (vasaros laikotarpis) yra pateikiama 5.11 pav.



5.11 pav. FVS foto-modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, esant sąlygoms Nr. 11

Šiomis sąlygomis naudojant InC metodą saulės modulių masyvas per 57,32 ms pasiekia 56,179 kW maksimalią galią ir per visą modeliavimo laikotarpį sugeneruoja 34,23 Wh elektros energijos kiekį. O naudojant PaO metodą maksimalią 56,189 kW galią pasiekia per 53,71 ms ir per visą modeliavimo laikotarpį sugeneruoja 34,50 Wh energijos kiekį.

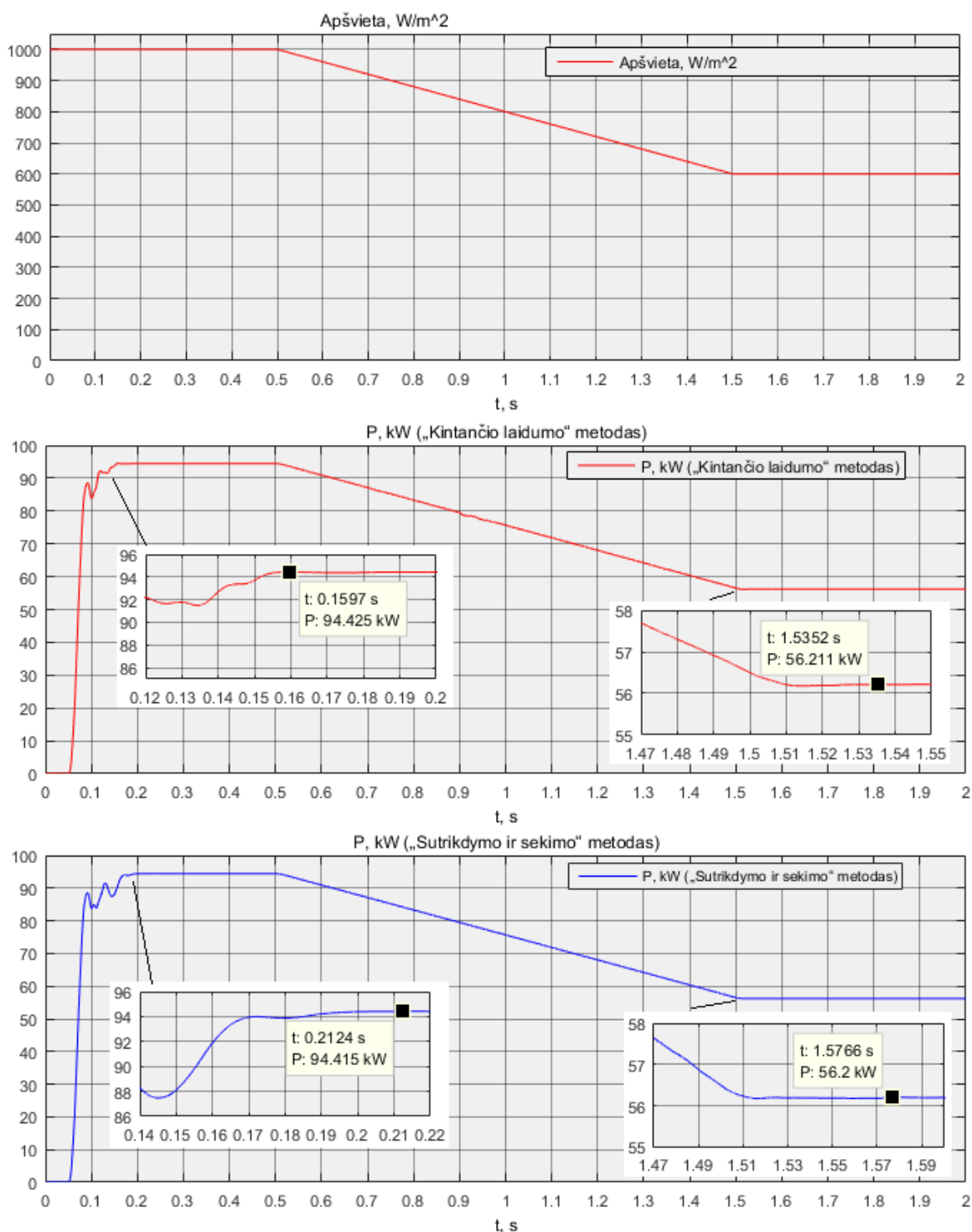
FVS saulės modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, kai apšvieta didėja tolygiai nuo 600 iki 1000 W/m², o temperatūra pastovi ir lygi 40 °C (vasaros laikotarpis) yra pateikiama 5.12 pav.



5.12 pav. FVS foto-modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, esant sąlygoms Nr. 12

Šiomis sąlygomis naudojant InC metodą saulės modulių masyvas per 151,34 ms pasiekia 94,413 kW maksimalią galią ir per visą modeliavimo laikotarpį sugeneruoja 40,61 Wh energijos kiekį. O naudojant PaO metodą maksimalią 94,413 kW galią pasiekia per 151,66 ms ir per visą modeliavimo laikotarpį sugeneruoja 40,53 Wh energijos kiekį.

FVS saulės modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, kai apšvieta mažėja tolygiai nuo 1000 iki 600 W/m², o temperatūra pastovi ir lygi 40 °C (vasaros laikotarpis) yra pateikiama 5.13 pav.



5.13 pav. FVS foto-modulių masyvo galios priklausomybė nuo laiko, esant sąlygoms Nr. 13

Šiomis sąlygomis naudojant InC metodą saulės modulių masyvas per 153,52 ms pasiekia 56,211 kW maksimalią galią ir per visą modeliavimo laikotarpį sugeneruoja 39,98 Wh energijos kiekį. O naudojant PaO metodą maksimalią 56,200 kW galią pasiekia per 157,66 ms ir per visą modeliavimo laikotarpį sugeneruoja 39,92 Wh energijos kiekį.

5.2. Maksimalios galios taško sekimo algoritmų tyrimo rezultatų palyginimas

MGTS algoritmų efektyvumo palyginimui visi tyrimo metu gauti rezultatai (žr. poskyrį 5.1) yra pateikiami 5.1 lentelėje. Žaliai pažymėti langeliai nurodo, kuris algoritmas pagal tiriamą parametą yra efektyvesnis, o mėlynai pažymėti langeliai nurodo, kad abu algoritmai pagal tiriamą parametą veikia vienodai.

5.1 lentelė. MGTS algoritmų tyrimo rezultatai ir jų palyginimas

Sąlygų Nr. (žr. 4.3 poskyrį)	Foto-modulių sugeneruojama elektros energija, Wh			Nusistovėjimo laikas, ms			Maksimali pasiekiamą foto-modulių galia, kW		
	InC	PaO	Palyginimas, %	InC	PaO	Palyginimas, ms	InC	PaO	Palyginimas, W
1	53,67	53,62	0,09	16,10	19,86	3,76	100,365	100,363	2
2	32,48	32,44	0,15	19,61	20,89	1,28	60,759	60,759	0
3	15,96	15,91	0,31	21,61	21,61	0,00	29,866	29,864	2
4	28,66	28,64	0,07	55,88	55,98	0,10	60,760	60,743	17
5	19,45	19,58	0,67	60,68	56,75	3,93	29,869	29,874	5
6	24,46	24,42	0,17	151,68	151,87	0,19	60,760	60,756	4
7	23,97	23,93	0,19	151,85	151,90	0,05	29,869	29,848	21
8	50,51	50,44	0,13	15,97	21,24	5,27	94,425	94,415	10
9	30,09	29,99	0,32	19,75	21,78	2,03	56,217	56,199	18
10	45,80	45,73	0,15	55,78	58,42	2,64	94,414	94,413	1
11	34,23	34,50	0,78	57,32	53,71	3,61	56,179	56,189	10
12	40,61	40,53	0,20	151,34	151,66	0,32	94,413	94,413	0
13	39,98	39,92	0,16	153,52	157,66	4,14	56,211	56,200	11

Kaip matoma iš 5.1 lentelėje pateiktų rezultatų, esant sąlygoms Nr. 1-4, 6-10 ir 12-13 InC algoritmas veikia efektyviau nei PaO algoritmas: foto-moduliai sugeneruoja atitinkamai 0,07-0,32 % daugiau elektros energijos, pasiekia nusistovėjusią maksimalią galią atitinkamai 0,05-5,27 ms greičiau ir suranda atitinkamai 1-21 W didesnę maksimalią galią. O esant sąlygoms Nr. 5 ir 11 efektyviau veikia PaO algoritmas: foto-moduliai sugeneruoja atitinkamai 0,67-0,78 % daugiau elektros energijos, pasiekia nusistovėjusią maksimalią galią atitinkamai 3,61-3,93 ms greičiau ir suranda atitinkamai 5-10 W didesnę maksimalią galią. Esant sąlygoms Nr. 2 ir 12 abu algoritmai pasiekia vienodą 94,413 kW maksimalią nusistovėjusią galią, o esant sąlygoms Nr. 3 algoritmai pasiekia atitinkamas maksimalias nusistovėjusias galias per vienodą laiko tarpą.

Maksimalios galios taško sekimo InC ir PaO algoritmų surastos saulės modulių maksimalios galios yra palyginamos su idealiu saulės modulių galios-įtampos charakteristikos maksimalios galios tašku (žr. 4.4 poskyrį). Gauti rezultatai pateikiami 5.2 lentelėje. Žaliai

pažymėti langeliai nurodo, kuris algoritmas pasiekia didesnę idealaus MGT galios dalį, o mėlynai, kad abu algoritmai pasiekia vienodas reikšmes.

5.2 lentelė. MGTS algoritmų tyrimo rezultatų palyginimas su idealia foto-modulių MGT galia

Sąlygų Nr. (žr. 4.3 poskyrį)	Foto-modulių idealaus MGT galia, kW (žr. Priedas Nr. 2)	MGTS InC algoritmo pasiekiamą maksimali foto-modulių galia, kW (žr. 5.1 lentelę)	MGTS PaO algoritmo pasiekiamą maksimali foto-modulių galia, kW (žr. 5.1 lentelę)	MGTS InC algoritmo pasiekiamą idealaus MGT galios dalis, %	MGTS PaO algoritmo pasiekiamą idealaus MGT galios dalis, %
1	100,386	100,365	100,363	99,979	99,977
2	62,541	60,759	60,759	97,151	97,151
3	30,799	29,866	29,864	96,971	96,964
4	62,541	60,760	60,743	97,152	97,125
5	30,799	29,869	29,874	96,980	96,997
6	62,541	60,760	60,756	97,152	97,146
7	30,799	29,869	29,848	96,980	96,912
8	95,943	94,425	94,415	98,418	98,407
9	57,148	56,217	56,199	98,371	98,339
10	95,943	94,414	94,413	98,406	98,405
11	57,148	56,179	56,189	98,304	98,322
12	95,943	94,413	94,413	98,405	98,405
13	57,148	56,211	56,200	98,360	98,341

Kaip matoma iš 5.2 lentelėje pateiktų gautų rezultatų, naudojant MGTS InC algoritmą arčiausiai idealaus MGT galios (99,979 %) surandama foto-modulių galia, esant STC (sąlygos Nr. 1), o toliausiai (96,971 %), esant žiemos laikotarpiui, kai apšvieta pastovi ir lygi 300 W/m², o temperatūra pastovi ir lygi 10 °C (sąlygos Nr. 3). Naudojant MGTS PaO algoritmą arčiausiai idealaus MGT galios (99,977 %) surandama foto-modulių galia, esant STC (sąlygos Nr. 1), o toliausiai (96,912 %), esant žiemos laikotarpiui, kai apšvieta tolygiai sumažėja nuo 600 iki 300 W/m², o temperatūra yra pastovi ir lygi 10 °C (sąlygos Nr. 7). Esant žiemos laikotarpiui, kai apšvieta pastovi ir lygi 600 W/m², o temperatūra pastovi ir lygi 10 °C bei esant vasaros laikotarpiui kai apšvieta tolygiai didėja nuo 600 iki 1000 W/m², o temperatūra pastovi ir lygi 40 °C, algoritmai pasiekia vienodą foto-modulių galią (atitinkamai 97,151 % ir 98,405 % idealaus MGT galios).

IŠVADOS

1. Išnagrinėjus maksimalios galios taško sekimo (MGTS) panaudojimo galimybes nustatyta, kad pagal meteorologines sąlygas tinkamai parinkus MGTS algoritmą, galima pasiekti iki 99,98% maksimalios saulės foto-modulio galios. Siekiant užtikrinti didžiausią visos fotovoltinės sistemos efektyvumą, MGTS algoritmas turi būti parinktas atsižvelgiant į saulės elektrinės sistemos struktūrą, montavimo ir aplinkos sąlygas.
2. Ištirti 8 pagrindiniai metodai naudojami MGT sekimui, kurių veikimo principas yra pagrįstas vieno ar kelių parametru pokyčių – įtampos, srovės, temperatūros ar apšvietos – sekimu ir įtampos arba srovės keitimu priklausomai nuo apšvietos ir foto-modulių temperatūros pokyčių. Dažniausiai yra naudojami „sutrikdymo ir sekimo“ (PaO) ir „kintančio laidumo“ (InC) metodų algoritmai, kurie pasižymi savo universalumu, jiems nėra reikalingas periodinis reguliavimas, juos naudojant yra pasiekiamas galios taškas artimas tikrajam MGT, o MGT suradimo greitis kinta priklausomai nuo meteorologinių sąlygų pokyčio ir jų kitimo pobūdžio.
3. Matlab „Simulink“ programos aplinkoje sudaryta prie tinklo prijungta fotovoltinė sistema su MGTS, kurios pagrindiniai blokai yra saulės foto-modulių masyvas, DC-DC „Boost“ konverteris, MGTS, DC-AC trifazis keitiklis ir 0,4/10 kV elektros tinklas.
4. Tyrimas atliktas vertinant foto-modulių masyvo sugeneruotos elektros energijos, pasiektos maksimalios galios ir jos nusistovėjimo laiko verčių pokytį priklausomai nuo foto-modulių temperatūros, apšvietos dydžio kitimo bei apšvietos kitimo pobūdžio. PaO ir InC algoritmų efektyvumui įvertinti yra panaudojamos sistemos modelyje naudojamo saulės foto-modulių masyvo galios-įtampos charakteristikos tyrimo metu gautos idealios maksimalios galios vertės.
5. Atlikus „kintančio laidumo“ ir „sutrikdymo ir sekimo“ algoritmų tyrimo metu gautų rezultatų analizę yra nustatyta, kad panaudojant InC algoritmą ir esant 11 iš 13 nustatytų meteorologinių sąlygų, foto-modulių masyvas sugeneruoja didesnę elektros energijos kiekį, esant 10 iš 13 nustatytų meteorologinių sąlygų, foto-modulių masyvas pasiekia nusistovėjusią maksimalią galią greičiau, o esant 9 iš 13 nustatytų meteorologinių sąlygų foto-modulių masyvas pasiekia didesnę ir taip pat artimesnę idealiam MGT maksimalios galios vertę. Įvertinus gautus tyrimo rezultatus yra daroma išvada, kad InC algoritmas yra efektyvesnis maksimalios galios taško sekimo algoritmas nei PaO algoritmas.

INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

1. PETRAUSKAS, Gytis ir Vytautas ADOMAVIČIUS. *Saulės energijos naudojimas elektrai gaminti: mokomoji knyga*. Kaunas: Technologija, 2012. ISBN 978-609-02-0752-9.
2. *Atsinaujinantys energijos ištekliai* [interaktyvus]. Lietuvos Respublikos energetikos ministerija [žiūrėta 2016 m. gruodžio 15 d.]. Prieiga per internetą: http://www.litgrid.eu/uploads/files/dir276/dir13/7_0.php.
3. *Ataskaitos apie elektros energiją, kurios gamybai naudojami atsinaujinantys energijos ištekliai* [interaktyvus]. AB „Litgrid“ [žiūrėta 2016 m. gruodžio 15 d.]. Prieiga per internetą: http://www.litgrid.eu/uploads/files/dir276/dir13/7_0.php.
4. *Saulės elemento tyrimas* [interaktyvus]. VDU [žiūrėta 2016 m. gruodžio 15 d.]. Prieiga per internetą: http://gamta.vdu.lt/bakalaurai/lab_darbai/apl_fiz/ESF%20AF%20LD%201%20Saules.pdf.
5. *Understanding Solar Cells* [interaktyvus]. Volker-quaschning [žiūrėta 2016 m. gruodžio 15 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.volker-quaschning.de/articles/pv-basics/index.php>.
6. *Saulės elemento (SE) tyrimas* [interaktyvus]. VU [žiūrėta 2016 m. gruodžio 15 d.]. Prieiga per internetą: http://www.lasercenter.vu.lt/images/KEK_ir_LTC/03_Studijos/Mokom_Lab/Fizikos_Bendr_oji_Mokomoji/lab_darbai/6.18_lt.pdf.
7. A. LYNN, Paul. *Electricity from Sunlight An: Introduction to Photovoltaics*. Chichester: John Wiley & Sons, 2011. ISBN 978-111-99-6503-9.
8. *Equivalent circuit of a solar cell* [interaktyvus]. Vikipedija laisvoji enciklopedija [žiūrėta 2016 m. gruodžio 17 d.]. Prieiga per internetą: https://en.wikipedia.org/wiki/Theory_of_solar_cells.
9. AZEVADO, G. M. S and others. Evaluation of Maximum Power Point Tracking Methods for Grid Connected Photovoltaic Systems [interaktyvus]. *Power Electronics Specialists Conference*. Rhodes, 2008 [žiūrėta 2016 m. gruodžio 27 d.]. ISSN 0275-9306. Prieiga per: IEEE Xplore.
10. *Field Applications for I-V Curve Tracers* [interaktyvus]. Paul Hernday, 2011 m. [žiūrėta 2016 m. gruodžio 27 d.]. Prieiga per internetą: <http://solarprofessional.com/articles/design-installation/field-applications-for-i-v-curve-tracers>.
11. *Solar cell efficiency* [interaktyvus]. Vikipedija laisvoji enciklopedija [žiūrėta 2016 m. gruodžio 27 d.]. Prieiga per internetą: https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell_efficiency.
12. SANZ MORALES, David. *Maximum power point tracking algorithms for photovoltaic applications: thesis submitted for examination for the degree of Master of science in technology* [interaktyvus]. Helsinki, 2010 [žiūrėta 2016 m. gruodžio 28 d.]. Prieiga per internetą: <http://lib.tkk.fi/Dipl/2010/urn100399.pdf>.

13. BRAUN, Henry and others. *Signal Processing for Solar Array Monitoring. Fault Detection, and Optimization*. Morgan & Claypool publishers, 2012. ISBN 978-160-84-5948-3.
14. DUPRE, O., R. VAILLO and M. A. GREEN. Physics of the temperature coefficients of solar cells [interaktyvus]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. Elsevier, 2015, vol. 140, 92-100 [žiūrėta 2016 m. gruodžio 28 d.]. Prieiga per: Science Direct.
15. *Air Mass* [interaktyvus]. PVEducation [žiūrėta 2017 m. sausio 4 d.]. Prieiga per internetą: <http://pveducation.org/pvcdrom/2-properties-sunlight/air-mass>.
16. SHARMA, S., A. SHARMA, K. KUMAR JAIN. Solar Cells: In Research and Applications – A review [interaktyvus]. *Materials Sciences and Applications*. SCIRP, 2015, vol. 6, 1145-1155 [žiūrėta 2017 m. sausio 4 d.]. Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.4236/msa.2015.612113>.
17. *Module specifications* [interaktyvus]. MG AB „Precizika“ [žiūrėta 2017 m. sausio 4 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.solet.lt/precizika/en/modules-specifications>.
18. *ViaSolis stiklas/stiklas modulių privalumai* [interaktyvus]. VIASOLIS [žiūrėta 2017 m. sausio 4 d.]. Prieiga per internetą: http://www.viasolis.eu/data/editable/downloads/LT_moduliu_privalumai_001.pdf.
19. *Customization glass solar panels* [interaktyvus]. Kameleon Solar [žiūrėta 2017 m. sausio 4 d.]. Prieiga per internetą: <https://kameleonsolar.com/customization-glass-solar-panels/>.
20. *Photovoltaic Systems* [interaktyvus]. Volker-quaschnig [žiūrėta 2017 m. sausio 4 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.volker-quaschnig.de/articles/fundamentals3/index.php>.
21. FARANDA, Roberto, Sonia LEVA. Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems [interaktyvus]. *TRANSACTIONS on POWER SYSTEMS*. WSEAS, 2008, 6(3), 446-455 [žiūrėta 2017 m. vasario 12 d.]. ISSN 1790-5060. Prieiga per internetą: <http://wseas.us/e-library/transactions/power/2008/27-545.pdf>.
22. CHOUDHARY, Dhananjay, A. R. SAXENA. DC-DC Buck-Converter for MPPT of PV System [interaktyvus]. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. IJETAE, 2014, vol. 4, issue 7, 813-821 [žiūrėta 2017 m. vasario 12 d.]. ISSN-2250-2459. Prieiga per internetą: http://www.ijetae.com/files/Volume4Issue7/IJETAE_0714_128.pdf.
23. SHOLAPUR, Shridhar, K. R. MOHAN, T. R. NARSIMHEDGOWDA. Boost Converter Topology for PV System with Perturb and Observe MPPT Algorithm [interaktyvus]. *Journal of Electrical and Electronics Engineering*. IOSR-JEE, 2014, vol. 9, issue 4, 50-56 [žiūrėta 2017 m. vasario 28 d.]. ISSN 2278-1676. Prieiga per: Research Gate.
24. KOLSI, S., H. SAMET, M. B. AMAR. Design Analysis of DC-DC Converters Connected to a Photovoltaic Generator and Controlled by MPPT for Optimal Energy Transfer throughout a Clear Day [interaktyvus]. *Journal of Power and Energy Engineering*. SCIRP, 2014, vol. , 27-34 [žiūrėta 2017 m. kovo 19 d.]. Prieiga per internetą: http://file.scirp.org/pdf/JPEE_2014012009534851.pdf.

25. ESRAM, Trishan, P. L. CHAMPAN. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques [interaktyvus]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. IEEE, 2007, vol. 22, issue 2 [žiūrėta 2017 m. kovo 22 d.]. Prieiga per: IEEE Xplore.
26. FREEMAN, Dave. *Introduction to photovoltaic systems maximum power point tracking: application report* [interaktyvus]. Texas, 2010 [žiūrėta 2017 m. balandžio 2 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.ti.com.cn/cn/lit/an/slva446/slva446.pdf>.
27. KALASHANI, M. B., Murtaza FARSADI. New Structure for Photovoltaic System Applications with Maximum Power Point Tracking Ability [interaktyvus]. *International Journal of Power Electronic and Drive System*. IJ PEDS, 2014, vol. 4, issue 4, 489-498 [žiūrėta 2017 m. balandžio 2 d.]. ISSN 2088-8694. Prieiga per: Research Gate.
28. BERIBER, Dalila, Abdelaziz TALHA. *MPPT Techniques for PV System* [interaktyvus]. Algeria, 2015 [žiūrėta 2017 m. balandžio 7 d.]. Prieiga per: Research Gate.
29. REZA REISI, Ali, Mohammad HASSAN MORADI, Shahriar JAMAS. Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system: A review [interaktyvus]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier, 2013, vol. 19, 433-443 [žiūrėta 2017 m. balandžio 8 d.]. Prieiga per: Science Direct.
30. LIU, C., B. WU, R. CHEUNG. Advanced algorithm for MPPT control of photovoltaic systems [interaktyvus]. *Canadian Solar Buildings Conference*. Montreal, 2004 [žiūrėta 2017 m. balandžio 21 d.]. Prieiga per: Research Gate.
31. *Average Model of a 100-kW Grid-Connected PV Array with Perturb and Observe MPPT* [interaktyvus]. MathWorks [žiūrėta 2017 m. balandžio 22 d.]. Prieiga per internetą: <https://se.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/average-model-of-a-100-kw-grid-connected-pv-array.html>.
32. *Detailed Model of a 100-kW Grid-Connected PV Array with Incremental Conductance MPPT* [interaktyvus]. MathWorks [žiūrėta 2017 m. balandžio 22 d.]. Prieiga per internetą: <https://se.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/detailed-model-of-a-100-kw-grid-connected-pv-array.html>.
33. „SunPower“ gamintojo SPR-305E-WHT-U saulės modulio techninė specifikacija [interaktyvus]. Posharp [žiūrėta 2017 m. balandžio 22 d.]. Prieiga per internetą: http://www.posharp.com/spr-305e-wht-d-solar-panel-from-sunpower_p1621616600d.aspx.
34. *Nominal operating cell temperature* [interaktyvus]. PVEducation [žiūrėta 2017 m. balandžio 23 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.pveducation.org/pvcdrom/modules/nominal-operating-cell-temperature>.

PRIEDAI

1. 30 kW saulės elektrinės, esančios Daubiškių k., Akmenės r. sav. 2016 m. liepos ir gruodžio 15-tos dienos elektrinių ir meteorologinių parametrų registravimo žurnalo duomenys.
2. Matlab „Simulink“ programos aplinkoje sudarytos prie elektros tinklo prijungtos fotovoltinės sistemos modelyje naudojamo saulės modulių masyvo iširtos galios-įtampos charakteristikos, esant 4.4 poskyryje nustatytoms ribinėms meteorologinėms sąlygoms.

Priedas Nr. 1 30 kW saulės elektrinės, esančios Daubiškių k., Akmenės r. sav. elektrinių ir meteorologinių parametrų registravimo žurnalo duomenys

Date	P_AC [kW]	I_DC [A]	U_DC [V]	Temp. [°C]	Irrad. [W/m ²]	P_Min [kW]	P_Max [kW]
15.07.2016 05:00	0,03	0,39	464,8	11,57	25,88	0	0,347
15.07.2016 05:05	0,08	0,29	477,8	11,08	25,88	0,048	0,107
15.07.2016 05:10	0,11	0,21	477,8	11,08	25,88	0,069	0,203
15.07.2016 05:15	0,17	0,08	477,8	11,08	25,88	0	0,221
15.07.2016 05:20	0,27	0,12	477,8	11,08	25,88	0,191	0,333
15.07.2016 05:25	0,35	0,31	477,8	11,08	25,88	0,271	0,401
15.07.2016 05:30	0,35	0,39	477,8	11,51	25,88	0,331	0,369
15.07.2016 05:35	0,39	0,5	477,8	12,38	25,88	0,361	0,433
15.07.2016 05:40	0,45	0,64	485,5	12,38	25,88	0,422	0,49
15.07.2016 05:45	0,53	0,73	512,5	12,38	25,88	0,472	0,561
15.07.2016 05:50	0,56	0,75	529,6	12,38	25,88	0,529	0,605
15.07.2016 05:55	0,76	1,13	544	12,38	30,53	0,571	0,967
15.07.2016 06:00	1	1,55	560,9	13,24	38,82	0,945	1,042
15.07.2016 06:05	1,04	1,63	558	13,67	38,82	0,985	1,067
15.07.2016 06:10	1,07	1,66	559,7	13,67	38,82	0,991	1,152
15.07.2016 06:15	1,15	1,81	564,7	13,67	38,82	1,032	1,206
15.07.2016 06:20	0,88	1,32	559,6	14,69	36,4	0,814	1,052
15.07.2016 06:25	0,89	1,33	558,3	14,56	38,82	0,831	0,937
15.07.2016 06:30	0,95	1,46	555,9	13,67	38,82	0,906	1,002
15.07.2016 06:35	0,95	1,47	554,6	13,67	38,82	0,897	1,009
15.07.2016 06:40	1,1	1,71	560,4	13,67	41,85	0,939	1,491
15.07.2016 06:45	1,81	2,7	569,7	13,67	60,83	1,472	2,179
15.07.2016 06:50	2,52	3,88	582,6	14,52	84,47	2,171	2,855
15.07.2016 06:55	2,95	4,54	590,6	15,49	96,14	2,758	3,057
15.07.2016 07:00	2,47	3,79	582,5	16,26	81,2	2,3	2,783
15.07.2016 07:05	2,38	3,67	579,2	17,52	77,65	2,22	2,529
15.07.2016 07:10	2,4	3,69	580,6	17,55	77,65	2,353	2,469
15.07.2016 07:15	2,33	3,58	578,7	17,22	77,65	2,262	2,399
15.07.2016 07:20	2,1	3,2	577,1	16,26	70,1	1,995	2,273
15.07.2016 07:25	2,21	3,38	577,5	16,26	73,47	2,018	2,425
15.07.2016 07:30	2,92	4,54	586,9	16,26	98,97	2,408	4,043
15.07.2016 07:35	3,98	6,37	588,5	16,57	133,01	3,076	6,098
15.07.2016 07:40	5,99	9,55	604,7	18,71	201,17	4,504	7,544
15.07.2016 07:45	7,4	12,05	600	21,41	250,78	4,911	7,719
15.07.2016 07:50	3,98	6,3	593	22,33	133,58	2,98	5,333
15.07.2016 07:55	2,58	4,05	575,6	20,58	86,34	2,33	2,965
15.07.2016 08:00	2,2	3,4	573,7	19,53	75,8	2,059	2,342
15.07.2016 08:05	2,07	3,2	568,8	18,85	69,18	2,022	2,113
15.07.2016 08:10	2,09	3,23	570,4	18,13	71,18	2,018	2,132
15.07.2016 08:15	2,01	3,08	569,7	17,55	64,71	1,928	2,104
15.07.2016 08:20	2,18	3,36	573,7	17,55	72,54	2,004	2,451
15.07.2016 08:25	2,87	4,55	575,9	17,82	95,87	2,449	3,316
15.07.2016 08:30	3,71	5,92	586,9	18,85	123,54	3,309	4,043
15.07.2016 08:35	4,72	7,61	591,1	19,03	154,82	4,046	8,921
15.07.2016 08:40	8,98	14,78	598,5	20,95	299,33	5,034	11,72
15.07.2016 08:45	6,39	10,42	594,7	22,73	212,35	5,932	9,24
15.07.2016 08:50	6,38	10,49	590,5	22,73	213,16	6,06	6,814

Date	P_AC [kW]	I_DC [A]	U_DC [V]	Temp. [°C]	Irrad. [W/m ²]	P_Min [kW]	P_Max [kW]
15.07.2016 08:55	6,06	9,96	589,7	22,73	202,71	5,676	6,624
15.07.2016 09:00	5,63	9,25	587,2	22,73	188,9	5,311	5,877
15.07.2016 09:05	6,06	9,97	588,4	22,73	201,21	5,39	6,458
15.07.2016 09:10	6,73	11,1	590,8	22,73	224,61	6,055	8,1
15.07.2016 09:15	8,2	13,5	596	23,91	273,93	7,193	10,797
15.07.2016 09:20	9,64	16,2	587,6	25,32	322,79	8,86	11,434
15.07.2016 09:25	13,99	23,52	593,7	27,06	480,42	9,945	19,977
15.07.2016 09:30	17,97	30,85	585,4	31,4	636,07	11,851	19,678
15.07.2016 09:35	7,98	13,74	571,5	31,25	280,89	6,976	12,038
15.07.2016 09:40	11,08	19,34	570,8	29,2	391,02	6,819	17,57
15.07.2016 09:45	14,87	26,14	569,7	31,36	530,91	6,652	17,607
15.07.2016 09:50	15,93	27,83	573,8	34,47	575,05	10,682	17,363
15.07.2016 09:55	17,37	30,68	569,3	36,51	639,29	16,839	17,53
15.07.2016 10:00	15,89	28,26	564,2	37,75	593,86	7,601	17,711
15.07.2016 10:05	17,26	30,69	565,4	37,45	655,18	16,923	17,598
15.07.2016 10:10	17,75	31,75	562,3	38,97	682,92	17,487	17,892
15.07.2016 10:15	18,07	32,43	560,9	38,64	712,8	17,704	18,273
15.07.2016 10:20	18,4	33,18	558,4	39,36	736,4	18,163	18,675
15.07.2016 10:25	18,85	34,16	556,2	40,22	748,55	18,626	19,015
15.07.2016 10:30	19,2	34,88	555,3	42,14	740,32	18,963	19,461
15.07.2016 10:35	19,61	35,67	554,8	41,75	752,37	19,385	19,772
15.07.2016 10:40	19,9	36,24	554,3	41,42	763,2	19,583	20,082
15.07.2016 10:45	19,83	36,16	553,9	39,98	757,55	19,066	20,252
15.07.2016 10:50	20,31	37,18	552	41,42	779,53	19,052	20,763
15.07.2016 10:55	20,87	38,27	551,5	42,14	803,22	20,669	21,017
15.07.2016 11:00	21,06	38,69	550,4	41,8	804,15	20,813	21,366
15.07.2016 11:05	20,84	38,37	549,2	41,97	804,28	20,281	21,394
15.07.2016 11:10	21,54	39,93	545,9	42,79	842,97	21,362	21,683
15.07.2016 11:15	21,47	40,13	541,2	45,18	839,14	21,267	21,715
15.07.2016 11:20	21,54	40,29	541	44,97	839	21,019	21,819
15.07.2016 11:25	22	41,09	542	43,19	850,53	21,624	22,19
15.07.2016 11:30	22,4	42,05	540,1	43,73	872,5	22,113	22,609
15.07.2016 11:35	22,61	42,6	538,3	43,21	881,75	22,485	22,715
15.07.2016 11:40	22,66	42,96	534,9	46,75	893,02	22,569	22,756
15.07.2016 11:45	22,65	43,04	533,7	46,73	893,9	22,241	23,01
15.07.2016 11:50	23,1	43,75	535,6	44,81	908,41	22,941	23,191
15.07.2016 11:55	23,09	44,12	531,1	47,37	923,21	22,919	23,178
15.07.2016 12:00	23,17	44,45	529,1	49,26	933,6	22,845	23,364
15.07.2016 12:05	23,42	44,67	532,1	45,56	941,48	23,249	23,566
15.07.2016 12:10	23,46	44,92	530,1	46,43	941,58	23,261	23,563
15.07.2016 12:15	23,48	45,19	527,9	47,43	948,22	22,581	23,657
15.07.2016 12:20	23,55	45,46	526,4	48,23	957,64	23,439	23,658
15.07.2016 12:25	23,81	45,93	526,7	48,01	962,9	23,565	23,948
15.07.2016 12:30	23,9	46,03	528	47,48	967,93	23,624	24,103
15.07.2016 12:35	24,05	46,13	529,8	45,5	966,97	22,622	24,235
15.07.2016 12:40	24,09	46,48	526,8	46,57	972,34	23,989	24,164
15.07.2016 12:45	24,48	47,14	527,8	47,32	988,83	24,011	24,927
15.07.2016 12:50	22,88	43,9	529,4	47,79	935,06	6,554	24,928
15.07.2016 12:55	24,34	46,91	527,6	48,61	983,57	24,22	24,491
15.07.2016 13:00	24,31	47,17	524	48,61	989,33	24,138	24,424
15.07.2016 13:05	24,08	46,96	521,5	50,61	988,74	23,85	24,278

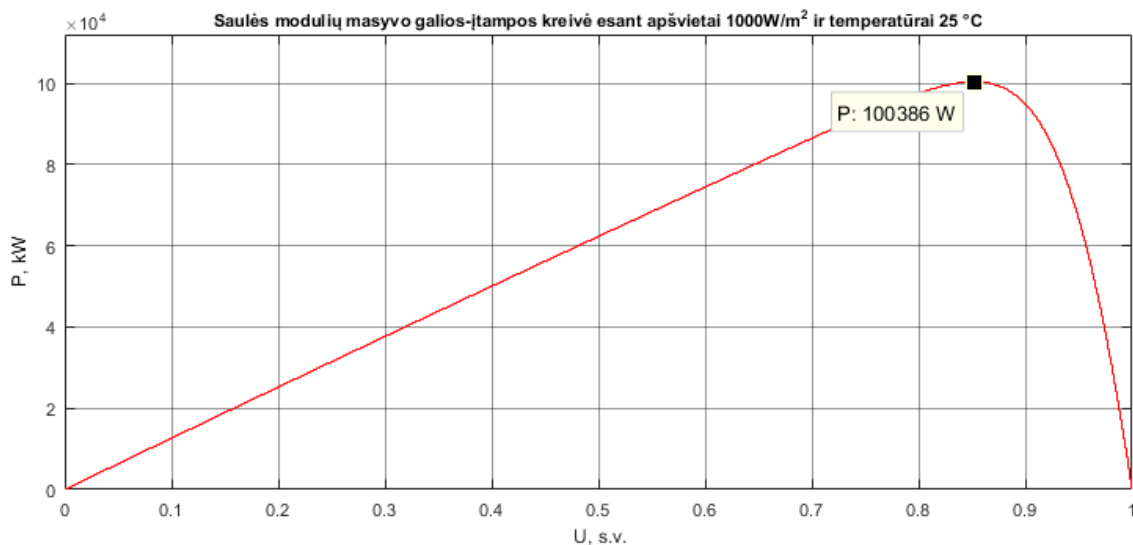
Date	P_AC [kW]	I_DC [A]	U_DC [V]	Temp. [°C]	Irrad. [W/m ²]	P_Min [kW]	P_Max [kW]
15.07.2016 13:10	24,3	47,35	522,1	50,49	1010,15	24,135	24,442
15.07.2016 13:15	24,47	47,47	524,2	47,73	997,04	24,265	24,586
15.07.2016 13:20	24,29	47,24	523,1	46,88	984,84	23,653	24,504
15.07.2016 13:25	24,49	47,39	525,6	46,02	988,06	24,277	24,603
15.07.2016 13:30	24,63	47,63	526,1	46,42	988,14	24,212	24,888
15.07.2016 13:35	24,5	47,09	529,3	44,89	972,82	23,919	24,93
15.07.2016 13:40	24,59	47,5	526,6	45,76	985,5	24,211	24,986
15.07.2016 13:45	24,62	47,68	525,4	46,34	992,92	24,384	24,81
15.07.2016 13:50	24,51	47,73	522,4	47,85	993,25	24,368	24,675
15.07.2016 13:55	24,73	48,13	523,1	47,99	1002,71	24,502	25,115
15.07.2016 14:00	24,62	47,85	524,2	48,07	998,4	21,202	25,378
15.07.2016 14:05	15,07	28,81	590,4	47,32	985,63	0	24,561
15.07.2016 14:10	24,57	47,63	525,4	46,14	986,35	24,351	24,856
15.07.2016 14:15	24,84	48,15	525,6	46,54	997,87	24,712	24,957
15.07.2016 14:20	24,84	48,15	525,3	47,04	995,8	24,593	25,064
15.07.2016 14:25	24,12	46,59	526,7	45,26	956,98	23,136	24,781
15.07.2016 14:30	24,27	46,6	529,9	44,76	960,98	24,053	24,539
15.07.2016 14:35	24,76	47,88	526,4	46,5	982,73	24,436	25,075
15.07.2016 14:40	24,57	47,42	527,1	46,29	972,6	24,342	24,902
15.07.2016 14:45	20,76	40,03	525,8	45,41	815,41	5,15	25,902
15.07.2016 14:50	22,02	41,85	533,9	44,11	862,11	5,906	25,757
15.07.2016 14:55	18,59	34,95	537,4	41,63	721,34	5,273	26,798
15.07.2016 15:00	18,09	34,3	533,1	42,16	699,07	5,18	26,187
15.07.2016 15:05	24,95	46,88	541,1	41,59	953,86	20,435	25,532
15.07.2016 15:10	21,18	39,6	542,4	42,57	814,57	5,112	24,941
15.07.2016 15:15	19,47	36,58	539,3	42,82	744,89	6,075	25,164
15.07.2016 15:20	23,85	44,97	539,1	42,42	906,84	23,568	24,179
15.07.2016 15:25	23,17	44,02	534,8	43,91	881	12,894	23,885
15.07.2016 15:30	16,1	30,4	533,5	41,32	612,7	5,518	24,532
15.07.2016 15:35	21,12	39,58	541,2	41,35	796,04	6,342	24,158
15.07.2016 15:40	22,33	41,96	540	42,62	847,81	6,627	24,19
15.07.2016 15:45	22,43	42,53	535,5	44,73	859,32	21,506	22,783
15.07.2016 15:50	17,84	33,64	536,5	43,37	683,88	4,514	22,68
15.07.2016 15:55	21,49	40,22	541,7	41,31	809,2	5,233	22,763
15.07.2016 16:00	17,25	32,43	537,8	42,82	646,24	5,984	22,599
15.07.2016 16:05	5,29	9,57	542,6	35,09	190,18	4,654	5,967
15.07.2016 16:10	8,73	15,73	553,4	31,27	307,43	4,682	22,913
15.07.2016 16:15	18,76	34,35	552,1	34,47	667,29	6,43	22,749
15.07.2016 16:20	11,69	21,31	548,7	38,12	425,19	5,036	22,706
15.07.2016 16:25	14,29	25,84	557,3	37,5	520,53	6,466	22,455
15.07.2016 16:30	12,2	21,94	557,1	34,69	432,93	6,11	21,152
15.07.2016 16:35	17,69	32,06	556,9	38,22	642,06	6,104	21,122
15.07.2016 16:40	18,45	33,76	551,9	39,96	679,98	18,087	19,07
15.07.2016 16:45	17,97	32,77	553,6	39,39	655,89	17,546	18,268
15.07.2016 16:50	9,55	17,24	551,3	36,45	347,13	3,058	17,914
15.07.2016 16:55	17,9	32,4	558	34,65	640,96	17,068	18,345
15.07.2016 17:00	13,86	24,76	561,5	34,96	497,75	3,049	17,5
15.07.2016 17:05	16,35	29,24	563,5	36,17	583,08	6,715	17,267
15.07.2016 17:10	15,9	28,66	558,8	36,97	574,11	6,038	16,698
15.07.2016 17:15	16,16	29,1	559,3	37,84	583,03	15,769	16,558
15.07.2016 17:20	16,01	28,91	557,8	38,58	580,74	15,717	16,211

Date	P_AC [kW]	I_DC [A]	U_DC [V]	Temp. [°C]	Irrad. [W/m ²]	P_Min [kW]	P_Max [kW]
15.07.2016 17:25	15,29	27,54	558,6	38,26	550,55	14,852	15,829
15.07.2016 17:30	14,51	26,02	560,8	37,06	518,63	14,239	14,874
15.07.2016 17:35	12,03	21,4	563	35,89	437,07	3,899	14,336
15.07.2016 17:40	8,21	14,59	557,8	33,51	284,98	3,024	13,568
15.07.2016 17:45	13,4	23,6	569,6	35,27	468,36	13	13,6
15.07.2016 17:50	12,63	22,4	564,9	36,88	443,14	12,231	13,033
15.07.2016 17:55	12,03	21,34	564,4	35,67	423,51	11,767	12,259
15.07.2016 18:00	11,48	20,27	566,3	35,35	403,46	11,322	11,786
15.07.2016 18:05	11,27	19,89	566,3	35,31	396,13	10,976	11,395
15.07.2016 18:10	10,55	18,66	564,2	35,87	369,23	10,23	10,98
15.07.2016 18:15	9,85	17,38	564,7	36,97	343,66	9,496	10,247
15.07.2016 18:20	9,33	16,42	565,2	36,62	325,96	9,047	9,573
15.07.2016 18:25	8,88	15,5	568,8	34,48	307,78	8,662	9,074
15.07.2016 18:30	8,47	14,75	569,6	33,08	294,28	8,201	8,663
15.07.2016 18:35	7,92	13,78	568,8	33,7	276,27	7,72	8,211
15.07.2016 18:40	7,47	12,95	570	33,6	256,16	7,183	7,737
15.07.2016 18:45	6,89	11,91	570,3	32,55	237,13	6,593	7,2
15.07.2016 18:50	6,37	10,94	571,8	31,79	216,85	6,143	6,609
15.07.2016 18:55	5,9	10,14	570,2	31,79	202,07	5,632	6,131
15.07.2016 19:00	5,34	9,14	570	31,79	185,95	5,074	5,641
15.07.2016 19:05	4,9	8,36	570,1	31,42	170,62	4,687	5,09
15.07.2016 19:10	4,48	7,6	570,4	30,49	158,07	4,267	4,708
15.07.2016 19:15	4,15	6,99	572,2	30,49	144,38	4,038	4,269
15.07.2016 19:20	3,95	6,61	573,8	29,51	139,89	3,771	4,055
15.07.2016 19:25	3,66	6,1	573,6	29,2	128,49	3,478	3,827
15.07.2016 19:30	3,17	5,28	570,4	29,2	111,63	2,772	3,481
15.07.2016 19:35	2,24	3,67	563,9	28,19	80,11	1,748	2,822
15.07.2016 19:40	1,73	2,81	549,3	27,38	60,85	1,615	2,162
15.07.2016 19:45	1,85	3,01	553,3	26,5	59,34	1,597	2,071
15.07.2016 19:50	1,9	3,05	561,2	25,32	64,66	1,808	2,01
15.07.2016 19:55	1,74	2,82	552,8	26,49	51,9	1,694	1,817
15.07.2016 20:00	1,71	2,78	550,5	26,61	51,77	1,633	1,739
15.07.2016 20:05	1,73	2,81	549,2	26,61	59,14	1,665	1,834
15.07.2016 20:10	1,87	3,04	555,9	26,61	64,71	1,815	1,913
15.07.2016 20:15	1,88	3,06	555,2	26,61	64,71	1,833	1,925
15.07.2016 20:20	1,88	3,06	553,3	26,61	64,71	1,764	1,933
15.07.2016 20:25	1,66	2,67	549,3	26,61	55,36	1,541	1,775
15.07.2016 20:30	1,5	2,41	546	26,56	51,77	1,446	1,559
15.07.2016 20:35	1,43	2,26	550,3	25,32	51,77	1,334	1,485
15.07.2016 20:40	1,29	2,06	536,3	24,81	44,83	1,202	1,381
15.07.2016 20:45	1,14	1,78	537,9	24,02	38,82	1,044	1,223
15.07.2016 20:50	1,05	1,61	536,4	24,02	38,82	0,992	1,081
15.07.2016 20:55	1	1,51	535,9	23,45	38,82	0,939	1,05
15.07.2016 21:00	0,87	1,29	528,1	22,73	28,51	0,793	0,953
15.07.2016 21:05	0,74	1,07	520,8	22,73	25,88	0,566	0,832
15.07.2016 21:10	0,54	0,89	510,8	22,28	25,88	0,504	0,578
15.07.2016 21:15	0,44	0,66	512	21,44	25,88	0,355	0,52
15.07.2016 21:20	0,33	0,44	489,7	21,39	25,88	0,294	0,371
15.07.2016 21:25	0,28	0,28	490	20,14	25,88	0,226	0,342
15.07.2016 21:30	0,23	0,17	490	20,14	25,88	0,163	0,29
15.07.2016 21:35	0,2	0,09	490	20,14	25,88	0,147	0,288

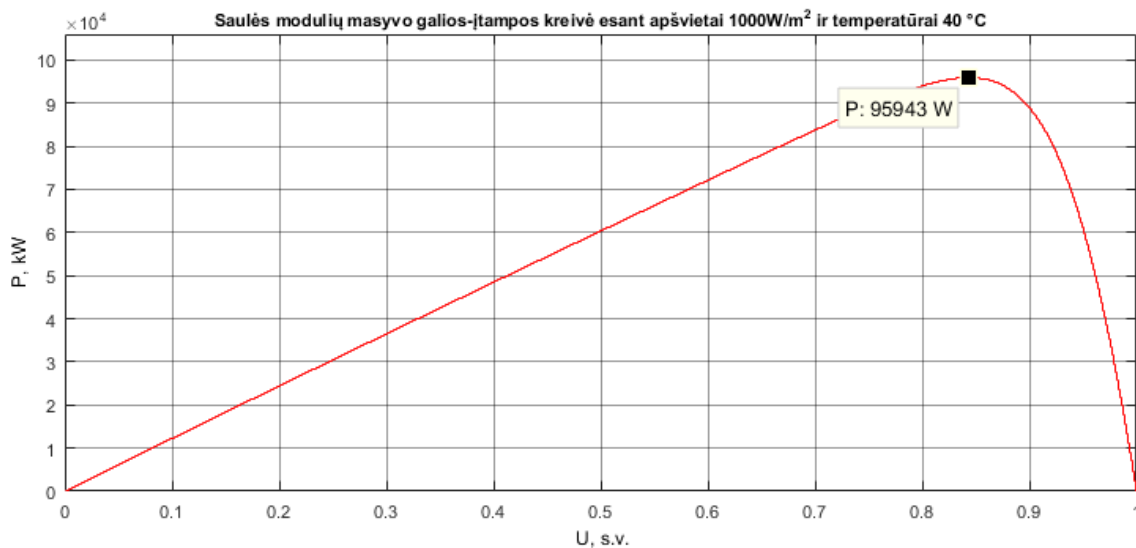
Date	P_AC [kW]	I_DC [A]	U_DC [V]	Temp. [°C]	Irrad. [W/m ²]	P_Min [kW]	P_Max [kW]
15.07.2016 21:40	0,16	0,03	490	18,93	25,88	0,083	0,204
15.07.2016 21:45	0,11	0,1	490	18,85	25,88	0,041	0,145
15.07.2016 21:50	0,07	0,19	490	18,45	25,88	0,029	0,113
15.07.2016 21:55	0,03	0,27	490	17,55	25,88	0	0,07
15.07.2016 22:00	0,01	0,33	490	17,51	25,88	0	0,035
15.07.2016 22:05	0	0,39	490	16,26	25,88	0	0,039
15.07.2016 22:10	0	0,44	490	16,26	25,88	0	0
15.07.2016 22:15	0	0,47	490	16,26	25,88	0	0
15.12.2016 09:55	0,01	0,58	511,6	0,73	25,88	0	0,304
15.12.2016 10:00	0,03	0,56	541,6	0,73	25,88	0,005	0,06
15.12.2016 10:05	0,04	0,54	541,6	0,73	25,88	0	0,067
15.12.2016 10:10	0,05	0,51	541,6	0,73	33,6	0,016	0,082
15.12.2016 10:15	0,05	0,5	541,6	0,73	38,82	0,021	0,076
15.12.2016 10:20	0,06	0,48	541,6	0,73	38,82	0,025	0,078
15.12.2016 10:25	0,06	0,47	541,6	0,73	38,82	0,016	0,095
15.12.2016 10:30	0,07	0,44	541,6	0,73	38,82	0,023	0,13
15.12.2016 10:35	0,07	0,43	541,6	0,73	43,27	0	0,146
15.12.2016 10:40	0,09	0,41	541,6	0,73	51,77	0,047	0,181
15.12.2016 10:45	0,1	0,39	541,6	0,73	51,77	0,044	0,158
15.12.2016 10:50	0,11	0,36	541,6	0,73	51,77	0,052	0,18
15.12.2016 10:55	0,12	0,35	541,6	1,09	54,79	0	0,177
15.12.2016 11:00	0,13	0,34	541,6	2,02	64,71	0,076	0,189
15.12.2016 11:05	0,14	0,32	541,6	2,18	64,71	0,087	0,185
15.12.2016 11:10	0,15	0,3	541,6	3,32	65,54	0,095	0,198
15.12.2016 11:15	0,17	0,28	541,6	4,15	75,37	0,09	0,211
15.12.2016 11:20	0,16	0,29	541,6	5,26	64,71	0,106	0,209
15.12.2016 11:25	0,15	0,29	541,6	5,91	72,87	0,092	0,2
15.12.2016 11:30	0,14	0,27	541,6	6,54	77,65	0,093	0,189
15.12.2016 11:35	0,17	0,24	541,6	7,87	77,65	0,117	0,286
15.12.2016 11:40	0,18	0,23	541,6	8,47	77,65	0,103	0,318
15.12.2016 11:45	0,17	0,23	541,6	8,49	77,65	0,054	0,348
15.12.2016 11:50	0,18	0,23	541,6	8,49	81,89	0,056	0,274
15.12.2016 11:55	0,23	0,13	541,6	8,88	100,2	0,157	0,302
15.12.2016 12:00	0,27	0,08	541,6	9,79	107,74	0,189	0,335
15.12.2016 12:05	0,35	0,2	541,4	9,79	144,86	0,183	0,742
15.12.2016 12:10	0,93	1,29	549,9	9,79	397,82	0,75	1,1
15.12.2016 12:15	1,29	1,69	583	11,05	542,23	0,977	1,517
15.12.2016 12:20	1,55	1,79	639,9	11,08	584,92	1,465	1,596
15.12.2016 12:25	1,52	1,65	661,7	11,08	564,96	1,363	1,621
15.12.2016 12:30	1,63	1,77	678,6	11,08	602,31	1,573	1,653
15.12.2016 12:35	1,63	1,81	667,5	11,08	604,1	1,567	1,665
15.12.2016 12:40	1,61	1,79	668,1	11,08	595,31	1,562	1,644
15.12.2016 12:45	1,62	1,76	677	11,08	595,31	1,529	1,657
15.12.2016 12:50	1,61	1,77	669,3	11,08	595,31	1,566	1,633
15.12.2016 12:55	1,61	1,76	675,4	11,08	595,31	1,588	1,645
15.12.2016 13:00	1,6	1,77	668,2	11,08	593,51	1,533	1,634
15.12.2016 13:05	1,58	1,76	663,1	11,28	582,99	1,517	1,618
15.12.2016 13:10	1,57	1,73	667,8	12,38	581,01	1,532	1,592
15.12.2016 13:15	1,55	1,68	676,5	12,38	570,31	1,487	1,587
15.12.2016 13:20	1,53	1,68	667,3	12,18	568,99	1,463	1,574
15.12.2016 13:25	1,51	1,66	660,8	11,96	559,39	1,451	1,539

Date	P_AC [kW]	I_DC [A]	U_DC [V]	Temp. [°C]	Irrad. [W/m ²]	P_Min [kW]	P_Max [kW]
15.12.2016 13:30	1,49	1,63	661,6	11,08	556,4	1,43	1,525
15.12.2016 13:35	1,46	1,63	651,2	11,08	546,43	1,389	1,497
15.12.2016 13:40	1,45	1,61	653,2	11,08	543,55	1,367	1,483
15.12.2016 13:45	1,43	1,58	652,5	11,08	539,38	1,398	1,452
15.12.2016 13:50	1,42	1,5	669,7	11	530,61	1,376	1,449
15.12.2016 13:55	1,39	1,45	671,3	11,08	519,67	1,299	1,418
15.12.2016 14:00	1,34	1,44	649,6	10,93	508,98	1,267	1,392
15.12.2016 14:05	1,3	1,42	638,4	9,79	496,92	1,27	1,337
15.12.2016 14:10	1,27	1,36	638,8	10,15	486,78	1,218	1,318
15.12.2016 14:15	1,24	1,3	644,7	11,08	475,78	1,153	1,269
15.12.2016 14:20	1,2	1,24	641,4	11,08	462,43	1,159	1,242
15.12.2016 14:25	1,16	1,2	639,1	11,08	452,43	1,103	1,196
15.12.2016 14:30	1,13	1,14	639,4	11,08	440,02	1,084	1,163
15.12.2016 14:35	1,09	1,08	638,3	11,08	428,04	1,021	1,121
15.12.2016 14:40	1,04	1,01	637,8	11,08	413,48	0,989	1,082
15.12.2016 14:45	1	0,94	636,4	11,08	394,87	0,933	1,049
15.12.2016 14:50	0,94	0,88	621,3	10,7	378,92	0,899	0,979
15.12.2016 14:55	0,9	0,8	629,4	10,27	361,45	0,848	0,937
15.12.2016 15:00	0,85	0,72	628,3	9,79	344,89	0,793	0,886
15.12.2016 15:05	0,8	0,65	621,7	9,79	329,99	0,717	0,84
15.12.2016 15:10	0,76	0,58	627,9	9,79	314,64	0,685	0,794
15.12.2016 15:15	0,64	0,51	609,5	9,5	294,11	0,54	0,747
15.12.2016 15:20	0,54	0,45	590,8	8,49	277,28	0,508	0,581
15.12.2016 15:25	0,5	0,36	596,5	8,49	254,71	0,466	0,524
15.12.2016 15:30	0,45	0,26	596,5	8,49	236,69	0,416	0,482
15.12.2016 15:35	0,4	0,17	596,5	7,54	214,39	0,372	0,437
15.12.2016 15:40	0,36	0,07	596,5	7,2	192,9	0,328	0,391
15.12.2016 15:45	0,32	0,03	596,5	5,95	172,54	0,287	0,344
15.12.2016 15:50	0,27	0,09	596,5	5,89	150,17	0,206	0,331
15.12.2016 15:55	0,22	0,19	596,5	4,61	129,55	0,177	0,256
15.12.2016 16:00	0,18	0,27	596,5	4,61	108,91	0,099	0,23
15.12.2016 16:05	0,11	0,37	596,5	3,66	85,5	0,06	0,167
15.12.2016 16:10	0,06	0,47	596,5	3,32	63,48	0,025	0,125
15.12.2016 16:15	0,02	0,54	596,5	2,62	44,08	0	0,078
15.12.2016 16:20	0	0,61	596,5	2,02	27,2	0	0,018
15.12.2016 16:25	0	0,68	594,5	1,35	25,88	0	0,019

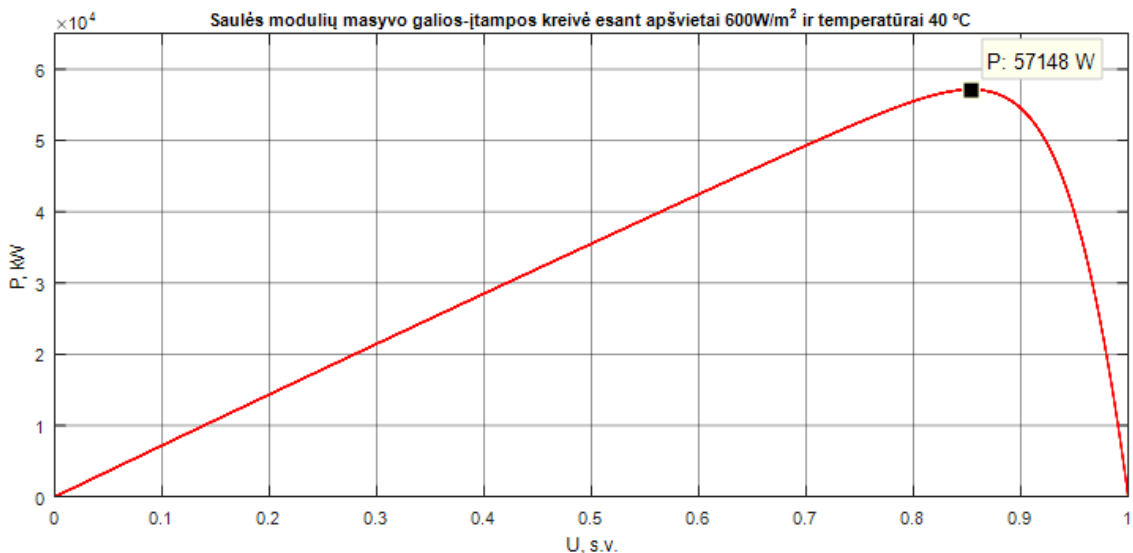
Priedas Nr. 2 Fotovoltinės sistemos modelyje naudojamo foto-modulių masyvo iširtos galios-įtampos charakteristikos



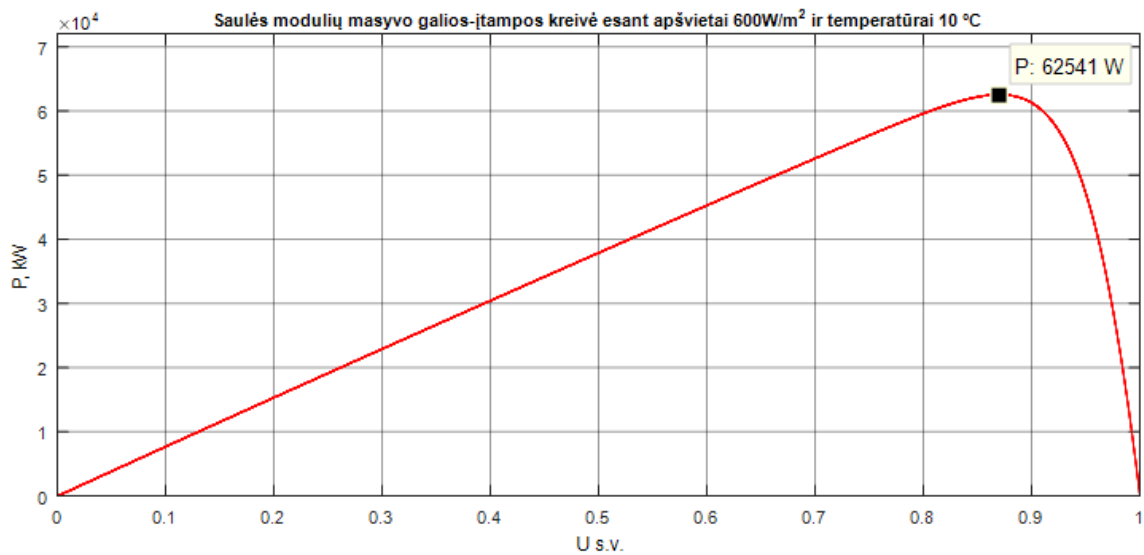
a) Saulės modulių masyvo galios-įtampos kreivė esant apšvietai 1000 W/m² ir temperatūrai 25 °C



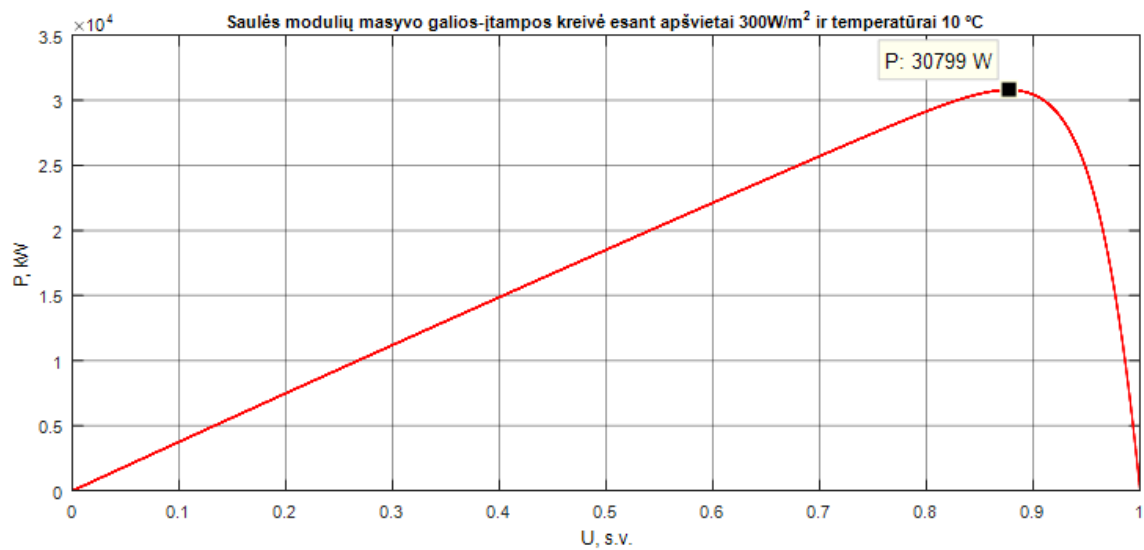
b) Saulės modulių masyvo galios-įtampos kreivė esant apšvietai 1000 W/m² ir temperatūrai 40 °C



c) Saulės modulių masyvo galios-įtampos kreivė esant apšvietai 600 W/m² ir temperatūrai 40 °C



d) Saulės modulių masyvo galios-įtampos kreivė esant apšvietai 600 W/m^2 ir temperatūrai 10°C



e) Saulės modulių masyvo galios-įtampos kreivė esant apšvietai 300 W/m^2 ir temperatūrai 10°C