

Vilniaus universitetas

Fizikos fakultetas

Cheminės fizikos institutas

Julius Jakas

Mažos galios MPPT valdiklis

Bakalauro studijų mokslo tiriamosios praktikos darbas

Telekomunikacijų fizikos ir elektronikos

studijų programa

Studentas

Darbo vadovas

Instituto direktorius

Julius Jakas

doc. Mindaugas Viliūnas

prof. Valdas Šablinskas

Vilnius

2019

TURINYS

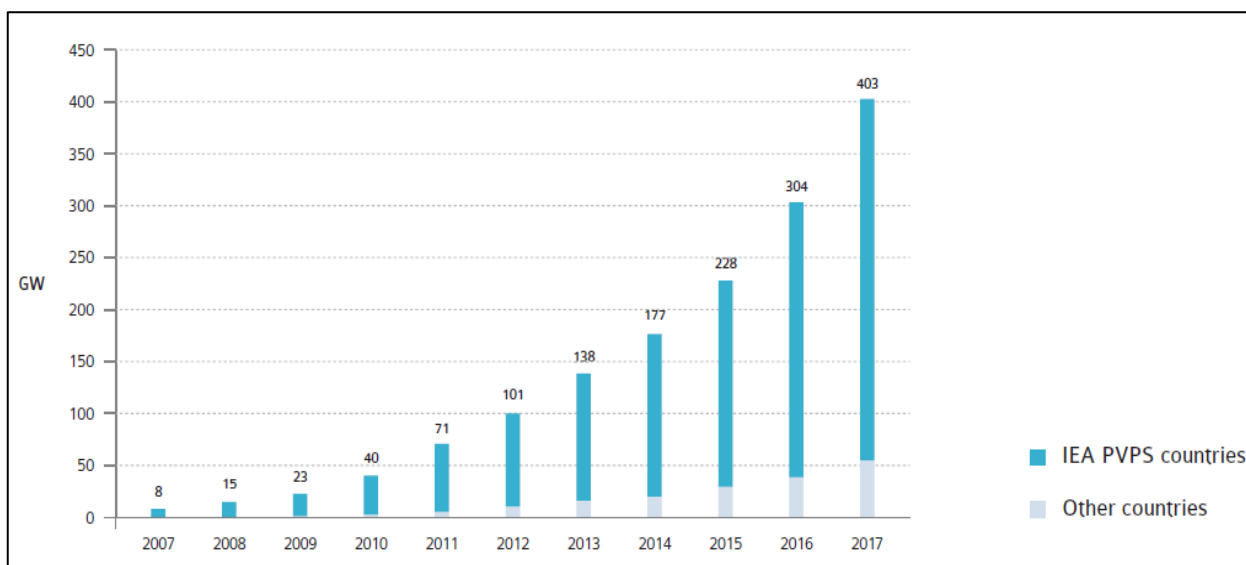
PAVEIKSLŲ IR LENTELIŲ SĄRAŠAS.....	3
1. ĮVADAS	4
2. TEORIJA	6
2.1. Saulės elementai	6
2.1.1. Struktūra	6
2.1.2. Veikimo principas	7
2.1.3. Atviros grandinės įtampa, užtrumpintos grandinės srovė ir didžiausias galios taškas	9
2.1.4. Užpildos faktorius saulės elementui	10
2.1.5. Temperatūros ir apšvietos efektai	11
2.2. Tiesinio šaltinio maksimalios galios taškas	14
2.3. Didžiausios galios taško sekimas (MPPT)	15
2.3.1. Pertraukimo ir stebėjimo metodas	16
2.3.2. Papildomo laidumo metodas.....	16
2.3.3. Atviros grandinės įtampos(open voltage) metodas	18
2.3.4. Temperatūrinis metodas	19
2.4. Aukštinantysis (Boost) keitiklis	19
3. MAŽOS GALIOS MPPT VALDIKLIAI.....	23
3.1. SPV1050	23
3.2. CY39C831	25
3.3. ADP5092.....	26
3.4. BQ25505	28
3.5. LTC3105	30
3.6. Mažos galios MPPT valdiklių apibendrinimas.....	31
4. MATAVIMŲ METODIKA IR REZULTATAI.....	33
4.1. Saulės baterijos tyrimas.....	33
4.2. MPPT tyrimas	35
4.3. SPV1050 matavimai.....	36
4.4. CY39C831 matavimai.....	41
4.5. LTC3105 matavimai	46
5. IŠVADOS	48
LITERATŪRA	49
6. SUMMARY	51

PAVEIKSLŲ IR LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 pav. PV modulių įdiegimas pasaulinėje rinkoje.....	4
2 pav. p-n jungtis terminėje pusiausvyroje. (a) erdvinio krūvio pasiskirstymas. (b) potencialo pasiskirstymas.[11].....	7
3 pav. Regimosios šviesos silpimo koeficiento ir vidutinio įsiskverbimo gylio priklausomybė nuo bangos ilgio siliciui ir galio arsenidui[7]	8
4 pav. Ekvivalentinė saulės elemento elektros grandinė.[1]	8
5 pav. Saulės elemento srovės, galios nuo įtampos kreivės, su ypatingais taškais. [1]	9
6 pav. V-I ir V-P kreivės esant pastoviai temperatūrai(25°C) su trimis skirtingais apšvietos lygmenimis.[1]	11
7 pav. Saulės elemento I-V charakteristika prie skirtingos temperatūros[11].....	12
8 pav. V-I ir V-P kreivės esant pastoviai apšvietai (1 kW/m ²) su trimis skirtingomis temperatūromis.[1]	14
9 pav. „Pertraukimo ir stebėjimo“ galios sekimo schema.[3]	16
10 pav. „Papildomo laidumo“ galios sekimo schema.[3]	18
11 pav. Aukštinaščiojo dc-dc keitiklio schema	20
12 pav. dc-dc keitiklio įjungto raktų veikimo režimu.	20
13 pav. dc-dc keitiklis išjungto raktų veikimo režimu	21
14 pav. dc-dc keitiklio darbinis režimas, kai raktas įjungtas.....	21
15 pav. Maketo su SPV1050 principinė elektrinė schema.[2]	24
16 pav. Gamintojo pateikta SPV1050 efektyvumo priklausomybė nuo įėjimo srovės esant 1V įėjimo įtampai. [2]	24
17 pav. Teorinė CY39C831 efektyvumo priklausomybė nuo įėjimo srovės esant 2.8V ir 0.6V įėjimo įtampai.[13]	25
18 pav. Blokinė CY39C831 diagrama su išoriniais grandinės elementais. [13]	26
19 pav. Detali ADP5091/ADP5092 blokinė diagrama[14].....	27
20 pav. Teorinė ADP5092 efektyvumo priklausomybė nuo įėjimo srovės esant 1V įėjimo įtampai[14]	28
21 pav. Blokinė BQ25505 diagrama su išoriniais grandinės elementais.[15].....	29
22 pav. Teorinė BQ25505 efektyvumo priklausomybė nuo įėjimo srovės esant 1V įėjimo įtampai[15].....	29
23 pav. Blokinė LTC3105 diagrama su išoriniais grandinės elementais.[18]	30
24 pav. Teorinė LTC3105 efektyvumo ir nuostolių priklausomybė nuo išėjimo srovės esant 3.3V išėjimo įtampai.[18]	31
25 pav. Saulės elemento srovės nuo įtampos priklausomybė esant skirtingiems šviesos intensyvumams.....	33
26 pav. Saulės elemento galios priklausomybė nuo įtampos esant skirtingiems apšvietos intensyvumams.	34
27 pav. Matavimams naudojama principinė schema	35
28 pav. SPV1050 naudingumo koeficiento priklausomybė nuo įėjimo srovės prie 3V įtampos išėjime ir skirtingų šaltinio EVJ (Kiekvienai EVJ keičiama šaltinio vidaus varža Rs). Tiesinis šaltinis.	36
29 pav. SPV1050 naudingumo koeficiento priklausomybė nuo įėjimo srovės prie 4V įtampos išėjime ir skirtingų šaltinio EVJ (Kiekvienai EVJ keičiama šaltinio vidaus varža Rs). Tiesinis šaltinis.	36
31 pav. SPV1050 K_{mppt} priklausomybė nuo įėjimo srovės prie 4V įtampos išėjime ir skirtingų šaltinio EVJ (Kiekvienai EVJ keičiama šaltinio vidaus varža Rs). Tiesinis šaltinis.	37
30 pav. SPV1050 K_{mppt} priklausomybė nuo įėjimo srovės prie 3V įtampos išėjime ir skirtingų šaltinio EVJ (Kiekvienai EVJ keičiama šaltinio vidaus varža Rs). Tiesinis šaltinis.....	37
33 pav. SPV1050 $K_{mppt} \cdot \eta$ priklausomybė nuo įėjimo srovės prie 4V įtampos. Tiesinis šaltinis.	38
32 pav. SPV1050 $K_{mppt} \cdot \eta$ priklausomybė nuo įėjimo srovės prie 3V įtampos išėjime. Tiesinis šaltinis.	38
34 pav. Įėjimo srovės priklausomybė nuo šaltinio įtampos esant 3V apkrovai. Tiesinis šaltinis.	39
35 pav. MPPT naudingumo koeficiento priklausomybė nuo įėjimo srovės. PV šaltinis.....	39
36 pav. Naudingumo koeficiento priklausomybė nuo įėjimo srovės PV šaltinis.	40
37 pav. CY39C831 įtampos pulsacijos be papildomo kondensatoriaus įėjime ir įtampa su papildomu kondensatoriumi esant 2.5V EVJ ir 4V išėjime.	41
38 pav. CY39C831 naudingumo koeficiento priklausomybė nuo įėjimo srovės su 3V įtampa išėjime. Tiesinis šaltinis.	41
39 pav. CY39C831 naudingumo koeficiento priklausomybė nuo įėjimo srovės su 3.7V įtampa išėjime. Tiesinis šaltinis.	42
40 pav. CY39C831 MPPT koeficiento priklausomybė nuo įėjimo srovės esant 3V išėjimo įtampai. PV šaltinis.	43
41 pav. CY39C831 MPPT koeficiento priklausomybė nuo įėjimo srovės esant 3.7V išėjimo įtampai. Tiesinis šaltinis.	43
42 pav. CY39C831 įėjimo įtampos priklausomybė nuo šaltinio elektrovaros esant 3V išėjime prie skirtingų šaltinio varžų R. Tiesinis šaltinis.....	44
43 pav. CY39C831 naudingumo koeficiento priklausomybė nuo įėjimo srovės prie 3V išėjimo įtampos. PV šaltinis.	44
44 pav. CY39C831 MPPT koeficiento priklausomybė nuo įėjimo srovės esant 3V išėjime. PV šaltinis.	45
46 pav. LTC3105 įėjimo srovės priklausomybė nuo įėjimo įtampos esant skirtingoms MPPC varžoms ir 4.2V išėjimo įtampai. Tiesinis šaltinis.....	46
45 pav. LTC3105 su išorinių komponentų vertėmis principinė schema	46
47 pav. LTC3105 naudingumo koeficiento priklausomybė nuo įėjimo įtampos esant skirtingoms MPPC varžoms ir 4.2V išėjimo įtampai. Tiesinis šaltinis.....	47
1 lentelė. Mažos galios MPPT valdiklių informacinė lentelė	32

1. ĮVADAS

Pastaraisiais metais visuotinis atšilimas ir energetikos politika tampa vis svarbesniais klausimais. Išsivysčiusios valstybės stengiasi mažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų išskyrimą. Pavyzdžiui Europos sąjunga yra nusprendusi sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisiją bent 20% ir pagaminti ne mažiau nei 20% energijos iš atsinaujinančių energijos šaltinių iki 2020 metų. Fotelektros (PV_(photovoltaic)) energijos gaminimas atlieka svarbią rolę, kaip „žaliosios energijos“ šaltinis. Vienintelė tarša, kuriama fotelektros energijos elementų yra tik jų komponentų gaminimas. Po PV įdiegimo jo gaminama elektra iš saulės spinduliavimo ar panašių šviesos šaltinių foto elementas nekuria jokių šiltnamio efektą sukeliančių dujų. Per visą gyvavimo trukmę, kuri yra apie 25 metus, PV moduliai sukuria daugiau energijos nei reikalauja jų pagaminimas. Taip pat PV moduliai yra labai patogi alternatyva vietose, kuriose nėra elektros tinklų: toli nuo miestų, dykynėse, dykumoje. Vis dėl to daugiausiai galios gaunama iš PV modulių, kurie yra integruoti su pagrindiniu elektros tinklu. Atsirandant naujoms technologijoms, siekiant efektyviau gaminti PV modulius, bei keliant jų efektyvumą, atsinaujinančių energijos šaltinių prietaisų paklausa vis didėja. (1pav.)



1 pav. PV modulių įdiegimas pasaulinėje rinkoje.

Atsiradus itin-mažos-galios (ultra-low-power) technologijoms atsivėrė durys prietaisams, kurie gali išgauti energiją mažais kiekiais, kuriems beveik nereikia arba išvis nereikia priežiūros ir kurie, galime sakyti, yra nesidėvintys. Šios naujos technologijos, kurios atsiranda rinkoje ir tampa prieinamos daugeliui vartotojų, pranašauja geras naujienas ir autonominiams jutikliams su

duomenų kaupimu ar/ir belaidžiu daiktų internetu, kas ypač aktualu medicinos ir aplinkosaugos sritims. Dar neseniai idėja, kaip išgauti ir surinkti energiją mikro srityje buvo tik mokslo laboratorijų eksperimentiniuose darbuose, o pastaruoju metu atsiranda vis daugiau sistemų, kurios išnaudoja šviesos, vibracijų, šilumos energijas ir teršiantys aplinką energijos šaltiniai tampa nepatogūs. Šiame pramoniniame pasaulyje, kur sensoriais renkama informacija iš sveikatai žalingų vietų, plataus vartojimo elektronikoje kur svarbus greitis, medicinos sistemos, protezavime ir neinvaziniuose stebėjimo įrenginiuose, energijos rinkimo prietaisai tampa vis aktualesni.[5]

MPPT (maximum power point tracking) arba didžiausios galios taško sekimas yra naudojamas valdikliuose norint išgauti didžiausią galią iš PV modulių, kadangi MPP (maximum power point) arba didžiausios galios taškas PV moduluose kinta nuo šviesos intensyvumo, PV elemento temperatūros.

Bakalaurinio darbo tikslas: apžvelgti rinkoje esančius mažos galios energijos išgavėjus su didžiausio galios taško sekimo technologija, skirtus dirbti su saulės baterijom, ir, atrinkus perspektyviausius, praktiškai ištirti jų veikimą bei išmatuoti pagrindines charakteristikas.

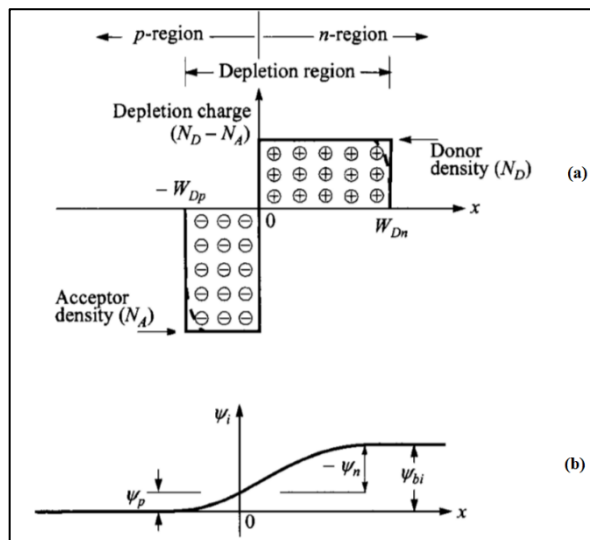
2. TEORIJA

2.1. Saulės elementai

2.1.1. Struktūra

Saulės elementas yra mažiausia sudedamoji fotovoltinių modulių dalis. Daugelis šių elementų yra gaminami iš silicio. Saulės elementai paremti fotoelektriniu efektu: tai yra savybė kai kurių puslaidininkių struktūrų, kurios gali elektromagnetinę spinduliuotę paversti elektros srove.

Saulės elementas yra p-n junginys(diodas), kuris gaminamas iš dviejų skirtingų sluoksnių silicio su priemaišomis. n-srityje dėl priemaišų yra atomų su vienu daugiau valentiniu elektronu, kuris vadinasi donoru, o p-srityje dėl priemaišų yra atomų su vienu mažiau valentiniu elektronu, kurie vadinasi akceptoriais. Sujungus p ir n sritis, sujungimo vietoje laisvieji elektronai iš n srities difunduoja į p sritį, palikdami po savęs teigiamai įkrautą dėl donorų sritį, o skylės iš p srities difunduoja į n sritį po savęs palikdami neigiamai įkrautą sritį dėl akceptorių. Susidaręs elektrinis laukas tarp šių dviejų pusių sukuria potencinį barjerą(nuskurdinta sritis). Pasiekus pusiausvyrą, per sąsają tiek elektronai tiek skylės nebejudą, nes jiems neužtenka energijos perlipti barjerą. Apšvietus PV elementą erdvinio krūvio srityje esantis laukas atskiria fotono generuotą elektrono skylės porą taip sukurama srovė(jei grandinė sujungta) ir potencialų skirtumą(jei grandinė neužtrumpinta)[11].



2 pav. p-n jungtis terminėje pusiausvyroje. (a) erdvinio krūvio pasiskirstymas. (b) potencialo pasiskirstymas.[11]

2.1.2. Veikimo principas

Krintantis šviesos pluoštas ant puslaidininkio gali būti sugertas atsiradus elektronų-skylių poroms, įvyksta-fotogeneracija. Jeigu pavyksta atskirti šias poras puslaidininkyje generuojama fotosrovė. P-n sandūra pasižymi nuskurdinta sritimi su dideliu vidaus elektriniu lauku, kurio padedamos elektronų bei skylių poros yra atskiriamos. Šiuo veikimo principu veikia dauguma fotodetektorių bei saulės elementų.

Fotogeneracijos sparta nėra vienoda visame diodo tūryje, nes praėjusios šviesos intensyvumas mažėja, pagal eksponentinį dėsnį:

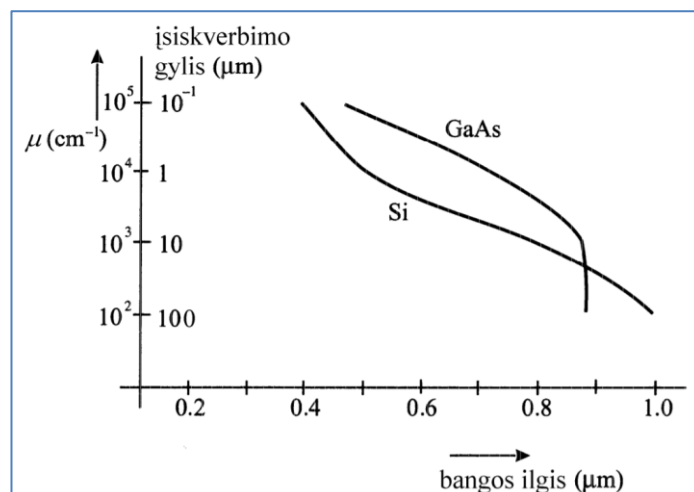
$$f(y) = f_0 e^{-\mu y} (1)$$

f - spinduliuotės intensyvumas

μ -sugerties koeficientas

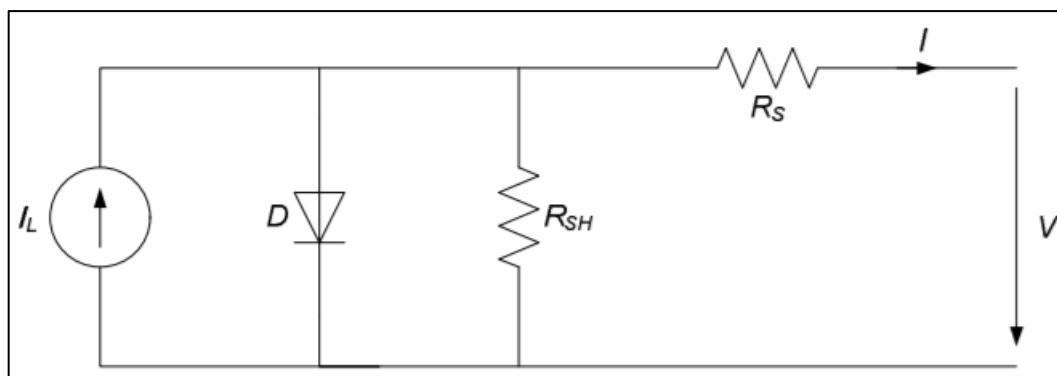
f_0 - pradinis intensyvumas

$1/\mu$ vaizduoja vidutinį sugerties gylį, kai sugerties koeficientas sumažės e kartų. Pagrindiniai parametrai nuo, kurių priklauso silpninimo koeficientas yra puslaidininkio medžiaga ir bangos ilgis. 3 pav. pavaizduota įsiskverbimo priklausomybė su skirtingomis medžiagomis nuo krintančios spinduliuotės bangos ilgio.[7]



3 pav. Regimosios šviesos silpimo koeficiento ir vidutinio įsiskverbimo gylio priklausomybė nuo bangos ilgio siliciui ir galio arsenidui[7]

Saulės elemento ekvivalentinė schema pavaizduota 4 paveikslėlyje. O jo srovės ir įtamos charakteristika aprašoma lygtimi žemiau:



4pav. Ekvivalentinė saulės elemento elektros grandinė.[1]

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{q(V - IR_S)}{AkT}} - 1 \right) - \frac{V - IR_S}{R_{SH}} \quad (2)$$

Šioje formulėje I ir V yra saulės elemento išėjimo srovė ir įtampa, I_0 tamsinė soties srovė, I_L šviesos generuojamas srovės dydis, q elektrono krūvis, A diodo kokybės faktorius, k Boltzmano konstanta, T absoliutinė temperatūra, R_S saulės elemento šunto varža ir R_{SH} nuotėkio varža. R_{SH} atsiranda dėl neidealios p-n jungties, dėl nešvarumų(priemaišų) arti elemento kraštų, kurie trumpina grandinę aplink sandūrą. Idealiu atveju R_S artėtų į nulį o R_{SH} į begalybę, todėl saulės elementų gamintojai stengiasi sumažinti abiejų varžų įtaką norėdami padidinti jų efektyvumą.

PV moduliai yra sudaryti iš daug saulės elementų, kurie yra sujungti nuosekliai ar lygiagrečiai, kad srovė bei įtampa būtų užtektinai didelės ir atitiktų elektros tinklų ar įrangos

reikalavimus. Kartais saulės elementų lygtis yra supaprastinama ir neatsižvelgiama į šunto varžą R_{SH} , kuri būna priskiriama begalybei. Atlikus šiuos supaprastinimus išėjimo srovės ir įtampos PV modulyje aprašomos lygtimi, kur n_p ir n_s yra saulės elementų skaičius, kurie sujungti atitinkamai lygiagrečiai ir nuosekliai:

$$I \approx n_p I_L - n_p I_0 \left(e^{\frac{q(V-IR_s)}{AkTn_s}} - 1 \right) \quad (3)$$

2.1.3. Atviros grandinės įtampa, užtrumpintos grandinės srovė ir didžiausias galios taškas

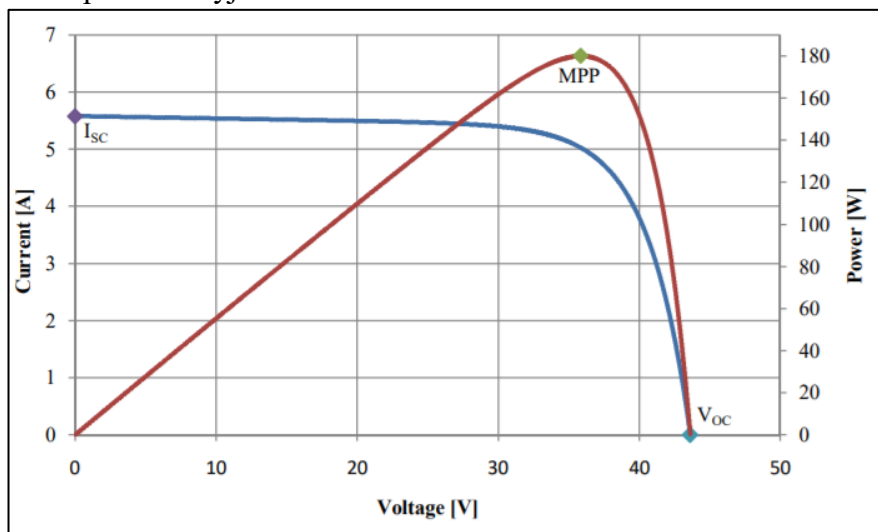
Du svarbūs taškai srovės-įtampos charakteristikoje yra atviros grandinės įtampa V_{oc} ir užtrumpinto grandinės srovė I_{sc} . Abiejuose taškuose generuojamos galios dydis yra lygus nuliui. V_{oc} randama, kai išėjimo srovė elemente yra lygi $I=0$, o šunto varžos nepaisoma ir apibrėžiama (4) lygtimi:

$$V_{oc} \approx \frac{AkT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (4)$$

Užtrumpintos grandinės atveju srovė I_{sc} yra apytikriai lygi šviesos generuojamos srovės dydžiui I_L (5) lygtis:

$$I_{sc} \approx I_L \quad (5)$$

Saulės elemento maksimali galia yra generuojama taške, kur srovės-įtampos charakteristikoje VI sandauga yra didžiausia. Šis taškas (MPP), bei prieš tai paminėti taškai pavaizduoti 5 paveikslėlyje.



5 pav. Saulės elemento srovės, galios nuo įtampos kreivės, su ypatingais taškais. [1]

2.1.4. Užpildos faktorius saulės elementui

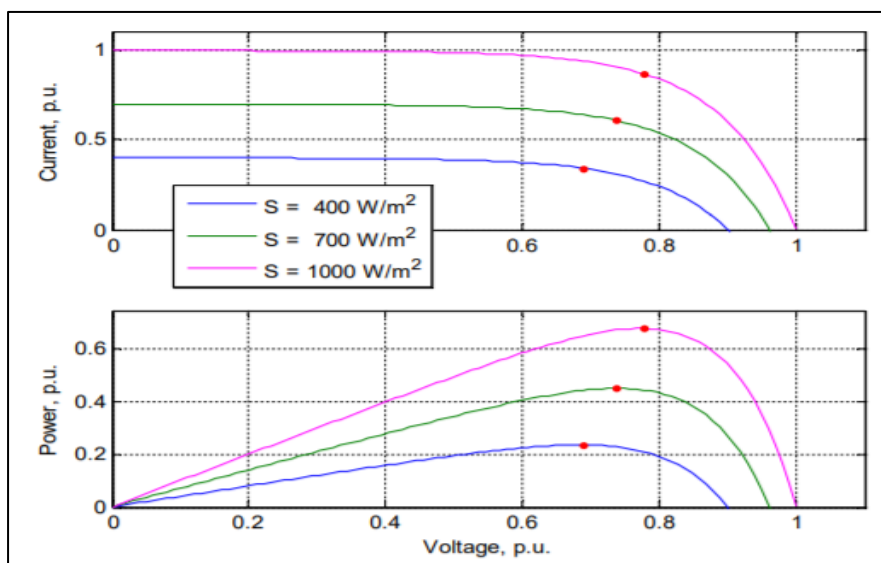
Turint atviros grandinės įtampą (V_{oc}) bei užtrumpintos grandinės srovę (I_{sc}), bei MPP įtampą V_{mpp} ir srovę I_{mpp} galime apibrėžti saulės elemento užpildos faktorių FF :

$$FF = \frac{I_{MPP} V_{MPP}}{I_{SC} V_{OC}} \quad (6)$$

Užpildos faktorius yra naudojamas pamatuoti saulės elemento kokybę. Tai yra santykis realios didžiausios galios ($I_{mpp} V_{mpp}$) su teorine ($I_{sc} V_{oc}$). Priežastis kodėl MPP įtampa bei srovė yra visad mažesnės už atviros grandinės įtampos ir užtrumpintos grandinės srovės yra dėl medžiagos, apšviestumo, temperatūros bei nuotėkio ir šunto varžų (3 pav.). Tipinis užpildos faktorius silicio saulės elementui varijuoja nuo 0.70 iki 0.80 esant 1.5AM(oro masės koeficientas), 1000W/m² apšvietai, 25°C temperatūrai. [8].

2.1.5. Temperatūros ir apšvietos efektai

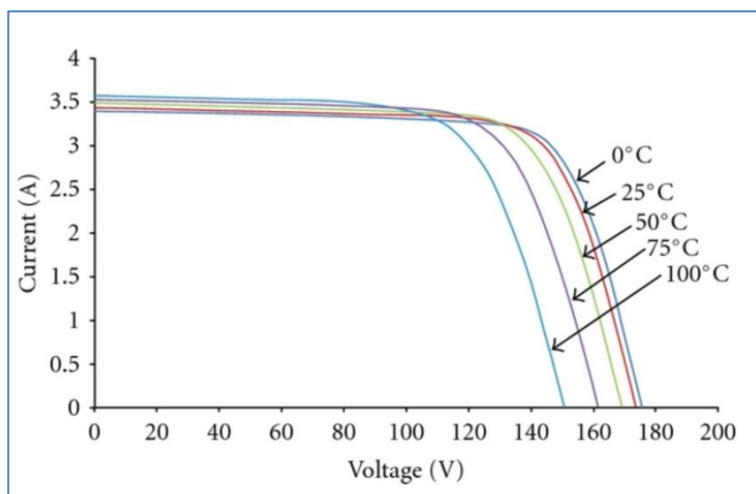
Du svarbūs faktoriai darantys įtaką saulės elementų charakteristikoms yra temperatūra ir šviesos intensyvumas. Jų rezultatas- per dieną kintantis MPP, kas ir yra viena iš svarbiausių priežasčių kodėl MPP turi būti nuolatos sekamas, kad užtikrinti išgaunama maksimalią galią iš saulės elementų. V-I bei V-P charakteristika nuo šviesos intensyvumo pavaizduota 6 paveikslėlyje, įtampa bei srovė yra normalizuotos pagal V_{oc} ir I_{sc} [1]. Kaip buvo aptarta anksčiau, fotogeneruojama srovė yra tiesiogiai proporcinga nuo apšvietos lygio, taigi padidėjęs apšviestumas lemia didesnę foto-generuojama srovę.



6 pav. V-I ir V-P kreivės esant pastoviai temperatūrai(25°C) su trimis skirtingais apšvietos lygmenimis.[1]

Iš 6 paveikslėlio matome, kad srovės pokytis yra didesnis nei įtampos. Praktikoje, įtampos priklausomybė nuo apšvietos dažniausiai neįskaitoma. Kadangi šviesos intensyvumas tiek srovę tiek įtampą veikia pozityviai tai yra jie didėja didėjant apšvietai, tai įtaka galiai taip pat pozityviau apšvietos, daugiau generuojama galios.

Iš kitos pusės temperatūra daro įtaka daugiausiai įtampai. Temperatūros įtaka saulės elemento V-I charakteristikai pavaizduota žemiau:



7 pav. Saulės elemento I-V charakteristika prie skirtingos temperatūros[10]

Atviros grandinės įtampa krentanti didėjant temperatūrai yra dėl I_0 priklausomybės nuo temperatūros. I_0 lygtis vienai p-n pusei yra :

$$I_0 = qA \frac{Dn_i^2}{LN_D} \quad (7)$$

Kur:

1. q elektrinis krūvis;
2. A elemento plotas;
3. D šilutinių krūvininkų difuzijos koeficientas;
4. L šilutinių krūvininkų difuzinis atstumas;
5. N_D donorinių priemaišų koncentracija;
6. n_i grynojo puslaidininkio elektronų koncentracija(nešlių);

Daugelis (7) lygties komponentų turi temperatūrinę priklausomybę, tačiau didžiausias poveikis yra dėl koncentracijos n_i . Kadangi draustinis(nuskurdintos) srities juostos plotis mažėja didėjant temperatūrai, bei didėjant nešlių energijai didėja elektronų koncentracija. Puslaidininkio elektronų koncentracija aprašanti lygtis yra:

$$n_i^2 = 4 \left(\frac{2\pi kT}{h^2} \right)^3 (m_e^* m_h^*)^{3/2} \exp \left(-\frac{E_{G0}}{kT} \right) = BT^3 \exp \left(-\frac{E_{G0}}{kT} \right) \quad (8)$$

Kur:

1. T temperatūra;
2. h , k planko ir boltcmano konstantos;
3. m_e ir m_h elektrono ir skylės efektinės masės;
4. E_{G0} elektrinis laukas nuskurdintoje srityje; 0
5. B konstanta nepriklausanti nuo temperatūros.

Įkėlus n_i lygtį į I_0 išraišką ir nekreipiant dėmesio jog likusieji parametrai irgi priklauso nuo temperatūros gauname:

$$I_0 = qA \frac{D}{LN_D} BT^3 \exp\left(-\frac{E_{G0}}{kT}\right) \approx B'T^\gamma \exp\left(-\frac{E_{G0}}{kT}\right) \quad (9)$$

Koeficientas T^γ naudojamas vietoj T^3 , atsižvelgiant kad laipsnis gali kilti dėl kitų medžiagos parametrų.

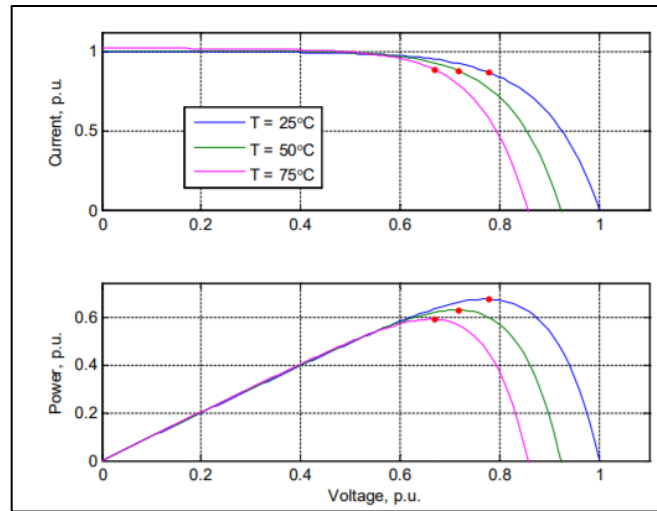
Įtaka I_0 atviros grandinės įtampai galime suskaičiuoti I_0 (9) įkeldami į V_{oc} lygtį:

$$\begin{aligned} V_{oc} &= \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0}\right) = \frac{kT}{q} [\ln I_{sc} - \ln I_0] = \frac{kT}{q} \ln I_{sc} - \frac{kT}{q} \ln \left[B'T^\gamma \exp\left(-\frac{qV_{G0}}{kT}\right) \right] \\ &= \frac{kT}{q} \left(\ln I_{sc} - \ln B' - \gamma \ln T + \frac{qV_{G0}}{kT} \right) \quad (10) \end{aligned}$$

Kur $E_{G0} = qV_{G0}$. Darant prielaidą, kad dV_{oc}/dT nepriklauso nuo dI_{sc}/dT , dV_{oc}/dT galime aprašyti taip:

$$\frac{dV_{oc}}{dT} = \frac{V_{oc} - V_{G0}}{T} - \gamma \frac{k}{q} \quad (11)$$

Priklausomybės nuo temperatūros V-I ir V-P charakteristikose parodytos žemiau, bei normalizuotos pagal V_{ov} ir I_{sc} (8 pav.).



8 pav. V-I ir V-P kreivės esant pastoviai apšvietai (1 kW/m²) su trimis skirtingomis temperatūromis

2.2. Tiesinio šaltinio maksimalios galios taškas

Dažniausiai mes norime perduoti kiek galima didesnę galią iš šaltinio į apkrovą. Kaip reikėtų nustatyti optimalią varžą apkrovos išgaunant didžiausią galią? Išnagrinėsime paprasčiausią schemą su šaltiniu, kurio įtampą yra V_S jo vidaus varža R_S , o apkrovos varža R_L .

Pagal Omo dėsnį grandinėje tekanti srovė bus:

$$I = \frac{V_S}{R_S + R_L} \quad (12)$$

Įtampa tenkanti apkrovos rezistoriui R_L :

$$V_L = V_S \frac{R_L}{R_S + R_L} \quad (13)$$

Tuomet galime rasti galią P_L tenkančią apkrovai:

$$P_L = IV_L = \frac{R_L V_S^2}{(R_S + R_L)^2} \quad (14)$$

Perrašome (14) lygtį atsikratant R_L skaitiklyje:

$$P_L = \frac{V_S^2}{\left(\frac{R_S}{\sqrt{R_L}} + \sqrt{R_L}\right)^2} = \frac{V_S^2}{R_S \left(\frac{\sqrt{R_S}}{\sqrt{R_L}} + \frac{\sqrt{R_L}}{\sqrt{R_S}}\right)^2} \quad (15)$$

Darydami prielaidą, kad varža nekinta, maksimalią galią gausime mažindami vardiklyje esančią sumą. Galime pastebėti, kad vardiklis atitinka matematinę išraišką $x + x^{-1}$, kur pastaroji pasiekia savo minimumą, kai $x=1$. Taigi mažiausia sumą vardiklyje užtikrina sąlyga:

$$\frac{\sqrt{R_S}}{\sqrt{R_L}} = 1 \quad (16)$$

Ir perrašius pastarąją lygtį gauname :

$$R_L = R_S \quad (17)$$

Maksimalią galią iš šaltinio gausime tada, kai apkrovos varža bus identiška vidinei šaltinio varžai. Tai yra maksimalios galios perdavimo teorema.

2.3. Didžiausios galios taško sekimas (MPPT)

Kaip žinoma saulės elemento išėjimo galios priklausomybė nuo šviesos intensyvumo bei temperatūros yra ne tiesinės funkcijos, bei kintančios nuo saulės spinduliavimo ir temperatūros. Be to, saulės spinduliavimo intensyvumas kinta dienos eigoje. Saulės elemento didžiausios galios taškas tokiomis sąlygomis nuolatos keičiasi ir išgauti didžiausią efektyvumą iš saulės elemento tenka ieškoti alternatyvų.

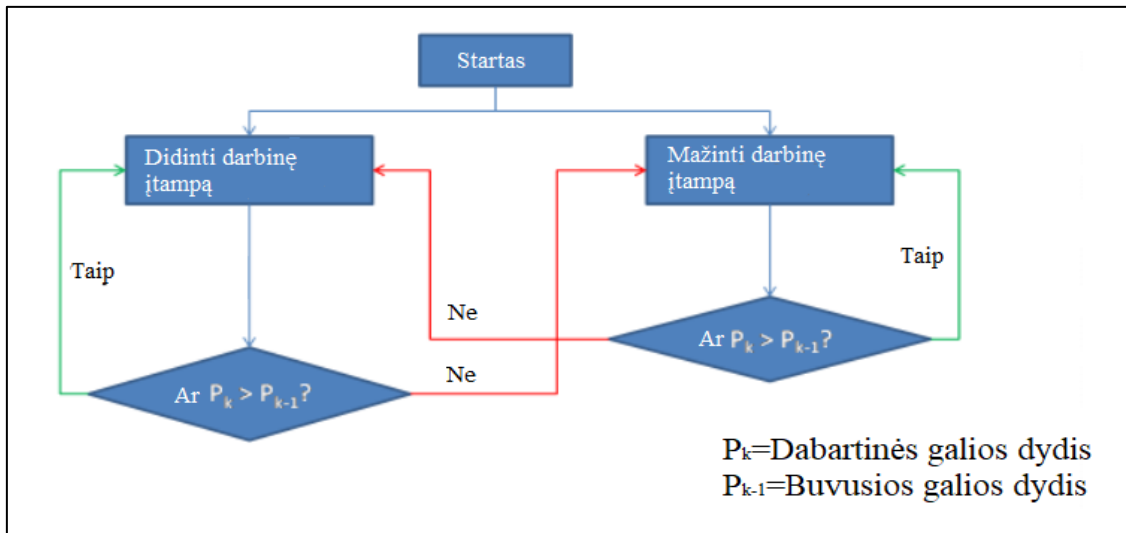
Didžiausios galios taško sekimas (DGTS) arba MPPT(maximum power point tracking) yra būdas, kuris dažnai naudojamas vėjo turbinose arba fotovoltinėse (PV) saulės sistemose išgauti didžiausią galią esant skirtingoms sąlygoms. Nors MPPT daugiausiai naudojamas saulės elementų galios sekimui, šis metodas taikytinas visiems šaltiniams su kintančia galia, pavyzdžiui optinėms galios perdavimo linijoms arba termovoltinėse sistemose.

PV saulės elementai naudojami daugybėje sistemų. Neatsižvelgiant į tai, kur jie naudojami, pagrindinė problema, kurią sprendžia MPPT tai kaip efektyviai priimti galią iš saulės elemento, kadangi ji priklauso tiek nuo šviesos šaltinio intensyvumo ir temperatūros, tiek nuo apkrovos elektrinių charakteristikų. Kuomet šviesos intensyvumas varijuoja, apkrova, kuria būtų pasiektas didžiausias galios perdavimo efektyvumas, keičiasi. PV elemento voltamperinės charakteristikos taškas, kuriame yra didžiausia galia vadinamas „didžiausios galios tašku“ (MPP), o MPPT yra procesas, kurio metu ieškomas didžiausios galios taškas.

Parinkti optimalią apkrovą išgaunant didžiausią galią naudojami įvairūs metodai(algoritmai). Šiems algoritmams naudojami mikrovaldikliai.

2.3.1. Pertraukimo ir stebėjimo metodas

Pagrindas „pertraukimo ir stebėjimo“ metodo yra keisti PV plokštelės išėjimo įtampą arba srovę tol kol bus iš jos išgaunama didžiausia galia. Pavyzdžiui, jei padidėjusi įtampa elemente lemia didesnę galią elemento išėjime, sistemos algoritmas didins išėjimo įtampą tol kol galia išėjime pradės mažėti. Tik galiai pradėjus kristi, įtampa mažinama į didesnės galios sritį. Šis procesas kartojamas, kol pasiekiamas didžiausios galios taškas.[4]



9 pav. „Pertraukimo ir stebėjimo“ galios sekimo schema.[3]

Privalumai:

- ♦ Pigūs pagaminti
- ♦ Lengvas įdiegimas

Trūkumai:

- ♦ Galios svyravimai aplink didžiausią galios tašką net ir stabiliam darbo režimui mažina energijos perdavimo naudingumą
- ♦ Algoritmo galios sekimas gali sutrikti prie varijuojančios šviesos intensyvumo

2.3.2. Papildomo laidumo metodas

Papildomo laidumo metodas pagrįstas faktu jog saulės elemento polinkio kampas galios-įtampos kreivėje yra lygus nuliui didžiausios galios taške. Šis polinkio kampas yra teigiamas Kairėje pusėje nuo MPP ir neigiamas dešinėje pusėje nuo MPP.

Galios išraiška:

$$P = IV \quad (18)$$

Taikoma grandinės taisyklė išvestinei:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} \quad (19)$$

Didžiausias galios taškas:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (20)$$

(14) lygtį galime pertvarkyti per srovės ir įtampos pokytį

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (21)$$

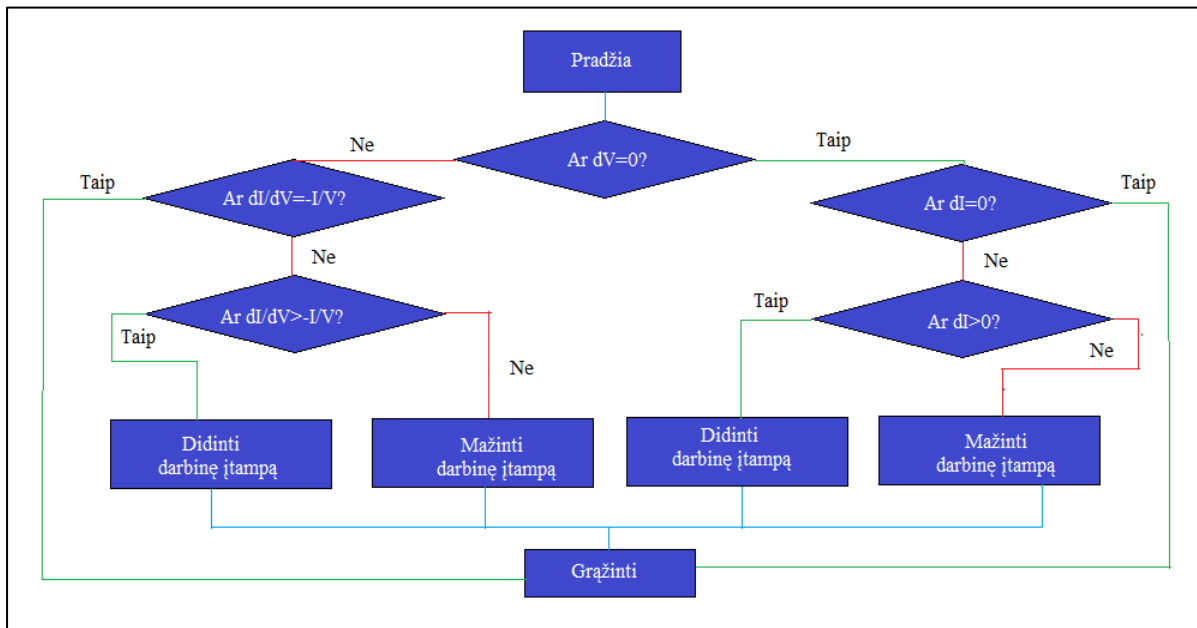
Surasti didžiausia galios tašką galima lyginant momentinį laidumą (I/V) su laidumo pokyčiu (dI/dV). Kai surandamas MPP, saulės elementas išlaiko šį tašką, nebent įvyksta pokytis srovėje (dI) tuomet „laidumo pokyčio“ algoritmas keičia darbo įtampą tol kol pasiekiamas naujas MPP. [4]

Privalumai:

- MPP pastovus stabiliu darbo režimu.
- Algoritmas veikia prie staigiai kintančios šviesos intensyvumų

Trūkumai:

- MPP skaičiavimai užtrunka ilgiau nei pertraukimo ir stebėjimo metodu



10 pav. „Paprastodo laidumo“ galios sekimo schema.[3]

2.3.3. Atviros grandinės įtampos(open voltage) metodas

Atviros grandinės įtampos (OV) metodas veikimo principas paremtas pastebėjimu jog įtampa didžiausiame galios taške yra tam tikra, beveik nekintanti, atviros grandinės įtampos dalis. Temperatūros bei šviesos intensyvumo kitimas įtakoja didžiausio galios taško kitimą 2% riboje.[4]

Srovė tekanti PV elemento išėjime nutraukiama(PV elementas atjungiamas nuo apkrovos), tada atviros grandinės įtampa, kai srovė yra lygi nuliui, nuskaitoma. Mikrovaldiklis vėl pradeda veikti darbo režimu su fiksuotu įtampos koeficientu, kurio vertė dažniausiai yra apie 76% atviros grandinės įtampos $V_{ref}=kV_{oc}$. Šis koeficiento dydis nustatomas pagal didžiausia galios tašką empiriškai arba modeliuojant pagal numatytas prietaiso eksploatavimo sąlygas. [4]

Privalumai:

- ◆ Šis metodas naudingas kalibruojant valdiklį
- ◆ Naudingas optimizuojant su kitais MPPT algoritmais

Trūkumai:

- ◆ Tikslī MPP vertė nerandama.

2.3.4. Temperatūrinis metodas

Šiuo didžiausios galios taško ieškojimo metodu MPP įtampa (V_{mpp}), nustatoma pagal saulės elemento temperatūrą, kuri yra lyginama su šablonine (parengta) įtampų verte. Kadangi apšvietos lygio kitimas didžiausios galios įtampą keičia nežymiai, šviesos intensyvumo galime nepaisyti ir teigti jog įtampa kinta tiesiškai nuo temperatūros.[4]

Algoritmo pagrindą aprašo ši lygtis:

$$V_{mpp}(T) = V_{mpp}(T_{ref}) + u_{V_{mpp}}(T - T_{ref}) \quad (22)$$

1. V_{mpp} įtampa didžiausiame galios taške duotai temperatūrai;
2. T_{ref} etaloninė temperatūra;
3. T pamatuota temperatūra;
4. $u_{V_{mpp}}$ temperatūros koeficientas V_{mpp} (randamas iš saulės elemento parametrų lentelės).

Privalumai:

- ♦ Paprastumas: algoritmas sprendžia vieną tiesinę lygtį. Todėl naudoja mažai skaičiavimo galios.
- ♦ Gali būti įdiegtas tiek į analogines tiek į skaitmenines grandines.
- ♦ Kadangi temperatūra kinta lėtai laike, nėra svyravimų aplink MPP
- ♦ Maža kaina: maža temperatūros jutiklių kaina.

Trūkumai:

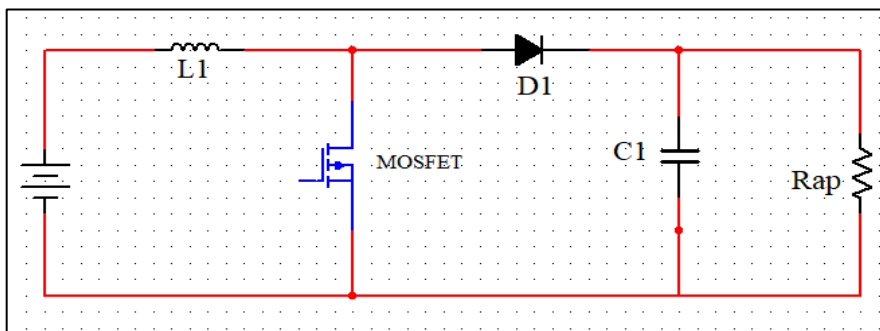
- ♦ Mažas šviesos intensyvumas tampa reikšmingu numatant MPP įtampą

2.4. Aukštinantysis (Boost) keitiklis

Norint maitinti prietaisus iš energijos šaltinių, kurių įtampa yra žemesnė nei norimo maitinti įrenginio įtampa naudojamas keitiklis, kuris didina įėjimo įtampą, šis keitiklis vadinamas aukštinančiuoju (boost) keitikliu. Samprotaujant, kad keitiklis nedidina galios ir ji išlieka pastovi $P=VI$, norint padidinti įtampą keitiklio išėjime srovė mažės. Nuolatinę srovę įėjime galime gauti iš daug šaltinių, kaip baterijos, saulės elementai, išlyginta srovė tiesiai iš tinklo ar nuolatinės srovės generatoriai, kurie gali būti jungiami prie įtampą aukštinančio keitiklio.

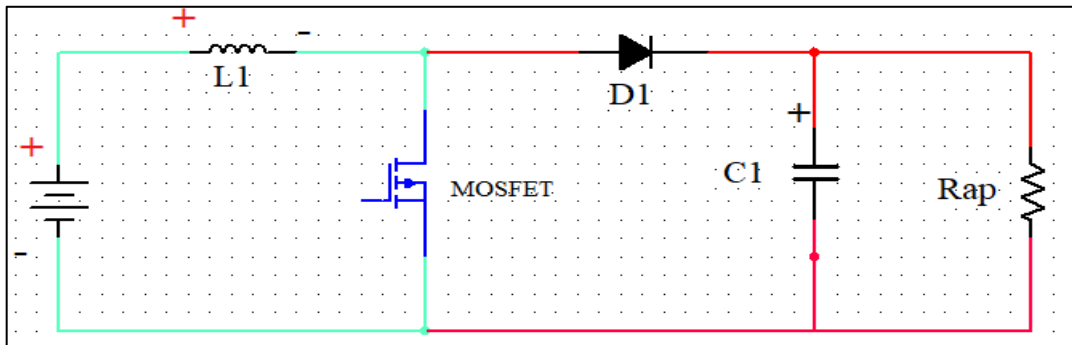
Keitiklio darbą galima aprašyti dvejais žingsniais, kurie susideda iš energijos kaupimo ir energijos atidavimo į grandinės išėjimą. Paprasčiausias aukštinantysis įtampos dc-dc keitiklis

susideda iš ritelės, lauko tranzistoriaus, kuris atlieka rakto(jungiklio) funkciją, diodo bei kondensatoriaus (11pav.).



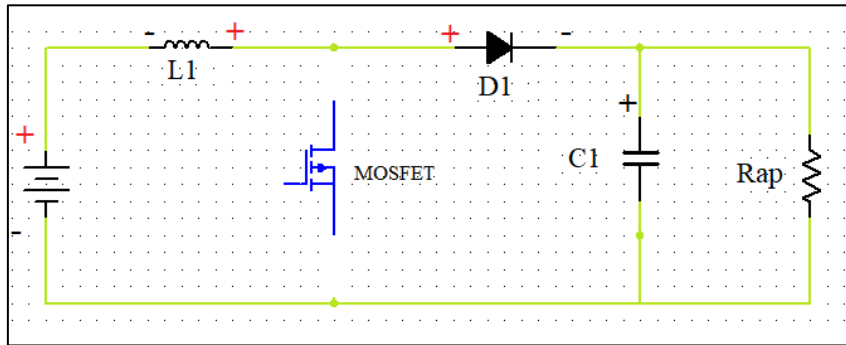
11 pav. Aukštinančiojo dc-dc keitiklio schema

Laiko momentu, kai į lauko tranzistoriaus (MOSFET) užtūra paduodamas aukšto lygio signalas tranzistorius atsidaro ir tampa laidus įėjimo srovei bei uždaro srovės tėkmę per diodą D1. Taigi srovė teka tarp teigiamos ir neigiamos šaltinio jungčių per ritelę L1, kuri kaupia energiją magnetinio lauko pavidalu. Srovė neteka likusia grandinės dalimi, nes D1, C1 ir apkrovos impedansas daug didesnis nei per stipriai laidžią MOSFET sritį (12pav. žalia spalva pavaizduota sritis, kurioje srovė teka).



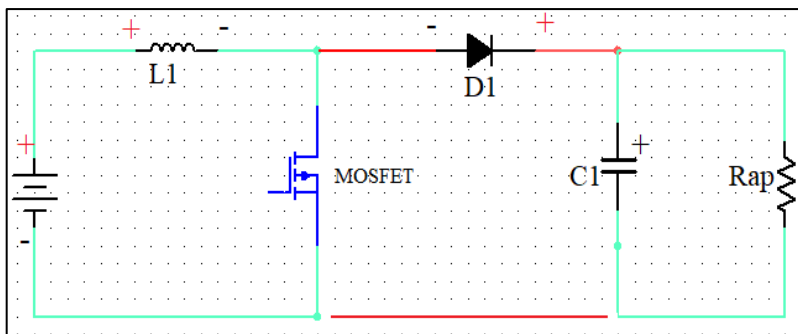
12 pav. dc-dc keitiklio įjungto rakto veikimo režimu.

Po laiko dalies, kai aukštos įtampos impulsas pakeičiamas žemos įtampos impulsu MOSFET užtūros įėjime lauko tranzistorius užsidaro. Šio užsidarymo metu drastiškas srovės kritimas sukuria atgalinę elektrovarą, priešingo poliarumo nei įtampa, esanti įjungto lauko tranzistoriaus metu, krintanti ant L1. Šio persijungimo pasekmė yra jog turime dvi įtampas – šaltinio V_s ir atgalinės elektrovaros V_L nuoseklias viena kitai. Taigi turime aukštesnę nei šaltinio įtampą ($V_s + V_L$). Išjungus lauko tranzistorių srovė teka pro diodą D1 įkraudama kondensatorių C1 iki $V_s + V_L$ įtampos (neįskaitant nuostolių dėl įtampos kritimo atsirandančių dėl diodo) bei maitina apkrovą (13pav. žalia spalva nurodo srovės tekėjimą).



13 pav. dc-dc keitiklis išjungto rakto veikimo režimu

Po pirmojo įsijungimo ciklo galime stebėti (4pav. žalia spalva nurodo, kur teka srovė), kaip šis aukštinantysis dc-dc keitiklis išlaiko aukštą įtampą apkrovoje. Kiekvieną kartą, kai srovė teka pro lauko tranzistorių, diodo D1 teigiama įtampa esanti katodo pusėje yra didesnė nei esanti anodo pusėje dėl kondensatoriaus C1, todėl diodas izoliuoja grandinės išėjimą nuo įėjimo, o tuo metu aukštą įtampą palaiko išsikraunantis kondensatorius C1 per apkrovą, o išsijungus lauko tranzistoriui kondensatorius pakraunamas ir taip išlaikoma pastovi įtampa tenkanti apkrovai.



14 pav. dc-dc keitiklio darbinis režimas, kai raktas įjungtas.

Teoriškai DC išėjimo įtampą apsprendžia įėjimo įtampa dalinta iš viso persijungimo ciklo, kuris pagal proporcijas atitinka 1 atimta iš lauko tranzistoriaus įsijungimo užpildos ($D = \frac{V_{iš} - V_{in}}{V_{iš}}$), kuri varijuoja proporcingai nuo 0 iki 1:

$$V_{iš} = \frac{V_{in}}{(1-D)} \quad (23)$$

Iš lygties matome, kad teoriškai įtampą galime kelti iki begalybės ir už tai atsakingas lauko tranzistoriaus rakto įsijungimo-išsijungimo trukmės. Tad labai svarbu užtikrinti tikslią ir saugią rakto ciklo trukmę, kitaip, ypač jeigu įėjimo įtampa varijuoja, galima pakenkti visai grandinei drastiškai pakėlus išėjimo įtampą. Apsisaugant nuo per didelės įtampos, dažniausiai yra ribojama

D ir išėjimo įtampa, o kartais dc-dc aukštinantys įtampos keitikliai būna integruoti į mikrovaldiklius, kurie atsakingi už stabilios ir fiksuotos įtampos gavimą išėjime.[12]

3. MAŽOS GALIOS MPPT VALDIKLIAI

Šioje rinkoje esančių mažos galios MPPT valdiklių apžvalgoje nurodomas MPPT valdiklio gamintojas, kokiems energijos šaltiniams keitiklis tinka, išvardinti elektriniai parametrai, pagrindinės valdiklio savybės, blokinė schema, aptariami kiekvieno valdiklio privalumai bei trūkumai.

Kriterijai pagal, kurios renkami valdikliai:

- Kuo mažesnė įsijungimo įtampa iki 0.7V
- Didžiausia darbo įtampa ~5V
- Didžiausia išėjimo įtampa ~5.5V
- Didžiausia įėjimo srovė ~0.3A

3.1. SPV1050

STMicroelectronics valdiklis SPV1050[2] su MPPT funkcija yra universalus. Turi plačią įėjimo įtampų sritį, kurią sąlygoja integruotas boost bei buck-boost keitikliai.

Tinkantys energijos šaltiniai:

- Fotovoltiniai elementai
- Nuosekliai sujungti termoelektriniai generatoriai

Elektriniai parametrai:

- 5uA(boost režimu),30uA(buck-boost režimu) starto režimo srovės
- 0.55V-2.6 starto įtampa
- 200mA didžiausia išėjimo srovė
- 2.2V-5.3V išėjimo įtampų diapazonas
- 0.15V-18V įėjimo darbo įtampa
- 2.6μA naudojama srovė

Valdiklio savybės:

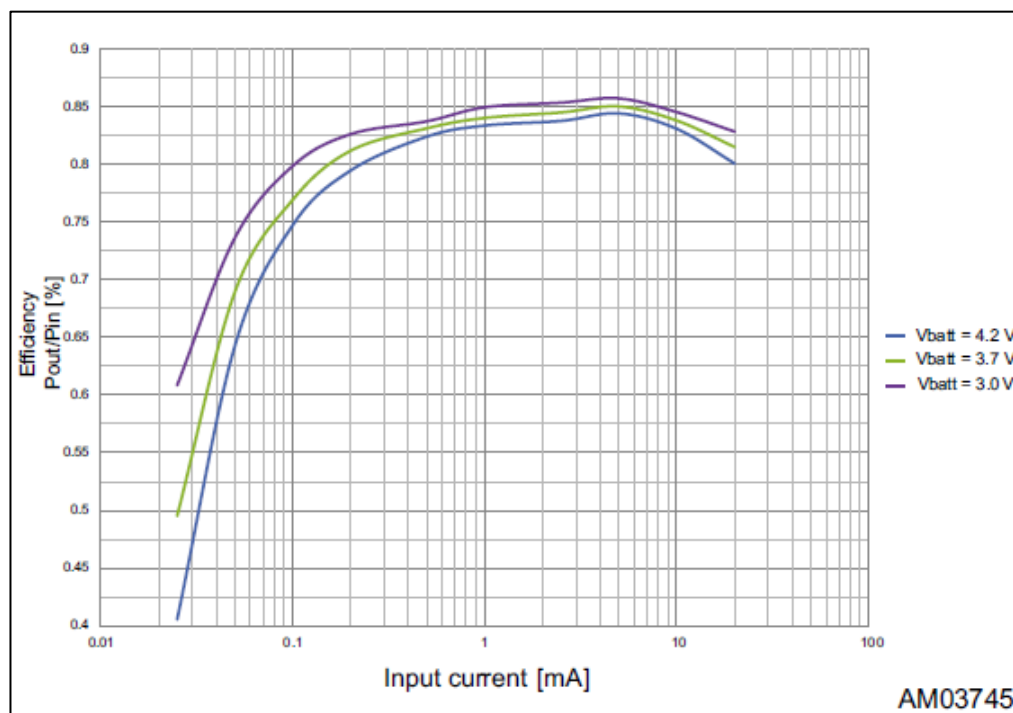
- Dc-Dc boost ir buck-boost keitiklis
- Atviros grandinės MPPT algoritmas su 0.3s-0.5s atviros įtampos nuskaitymo periodu, bei 12s-20s darbo režimu.
- Kraunamos baterijos apsauga
- Du atskiri išėjimai su 1.8V ir 3.3V įtampomis

MPP Ratio
 $MPP_RATIO = R_d / (R_b + R_c + R_d) = 75.2\%$

Over-discharge Protection Threshold
 $V_{UVP} = V_{BG}(R_e + R_f + R_g) / (R_f + R_g) = 3.14V$

Over-charge Protection threshold
 $V_{EOC} = V_{BG}(R_e + R_f + R_g) / R_g = 4.182V$
 which $V_{BG} = 1.23V$

15 pav. Maketo su SPV1050 principinė elektrinė schema.[2]



16 pav. Gamintojo pateikta SPV1050 efektyvumo priklausomybė nuo įėjimo srovės esant 1 V įėjimo įtampai. [2]

3.2. CY39C831

Cypress gamintojas yra sukūręs CY39C831 mažos galios valdiklį[13], kuriame įdiegta MPPT funkcija. Valdiklis turi du veikimo režimus, vienas iš jų yra baterijos krovimo režimas, kur didžiausios galios taško funkcija yra įjungta ir antras- pastovios įtampos režimas. Šie režimai parenkami S0, S1, S2 trumpikliais.

Tinkantys energijos šaltiniai:

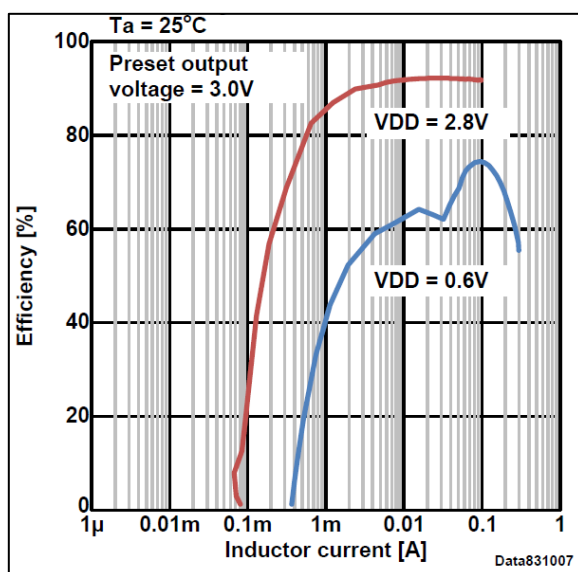
- Fotovoltiniai elementai
- Nuosekliai sujungti termoelektriniai generatoriai

Elektriniai parametrai:

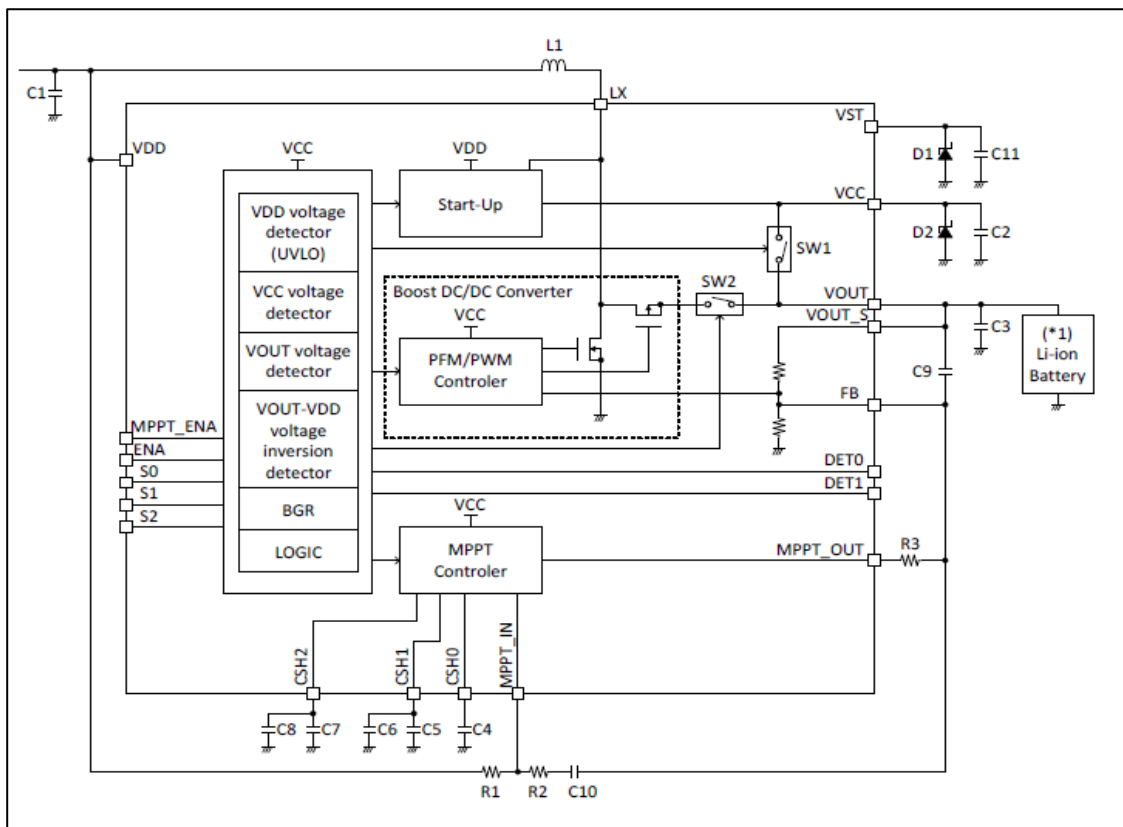
- 0.35 starto įtampa
- 240mA didžiausia išėjimo srovė prie 3.3V išėjimo įtampos
- 0.3V-4.75V įėjimo darbo įtampa
- 3V-5V išėjimo įtampų diapazonas
- 41μA naudojama srovė

Valdiklio savybės:

- Dc-Dc boost keitiklis
- Atviros grandinės MPPT algoritmas su 0.3s-0.5s atviros grandinės įtampos nuskaitymo periodu, bei 3s darbo režimu.
- Kraunamos baterijos apsauga
- MPPT krovimo bei pastovios įtampos režimai



17 pav. Teorinė CY39C831 efektyvumo priklausomybė nuo įėjimo srovės esant 2.8V ir 0.6V įėjimo įtampai.[13]



3.3. ADP5092

Analog Devices sukurtas ADP5092 (ADP5090, ADP5091 skiriasi tik kai kuriomis papildomomis funkcijomis) [14] valdiklis yra mažos galios energijos rinkėjas su fazės matavimo bei MPPT sistema, priimančias radijo dažnio signalą bei turintis pastovios įtampos išėigą, pagrindinės bei daugkartinės baterijos jungtis.

Tinkantys energijos šaltiniai:

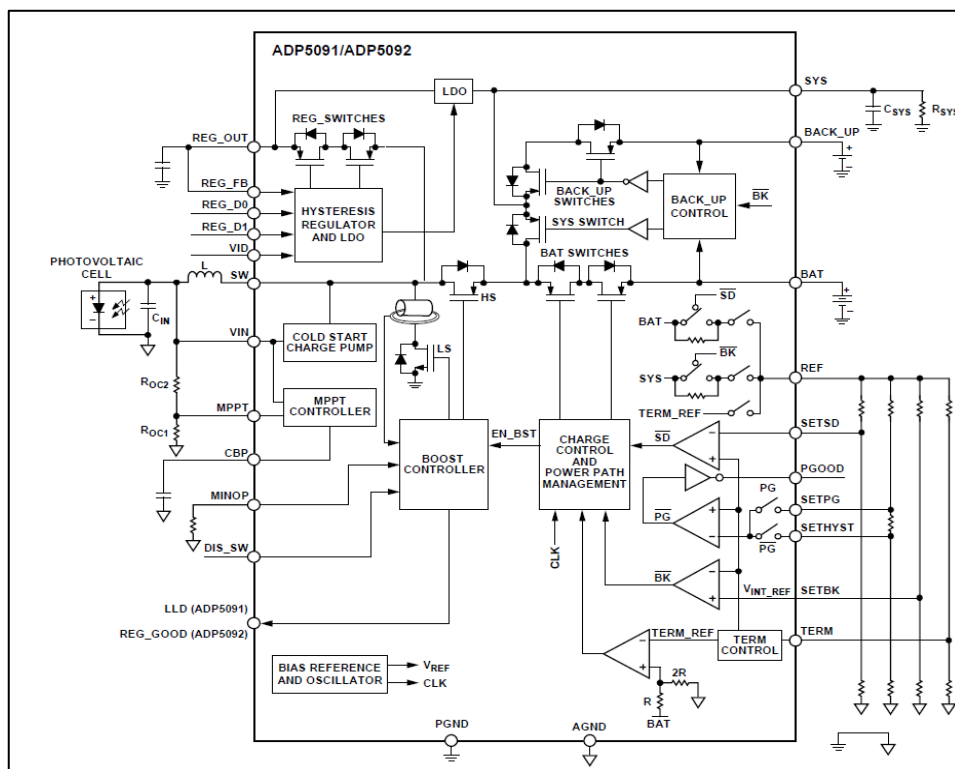
- Fotovoltiniai elementai
- Nuosekliai sujungti termoelektriniai generatoriai

Elektriniai parametrai:

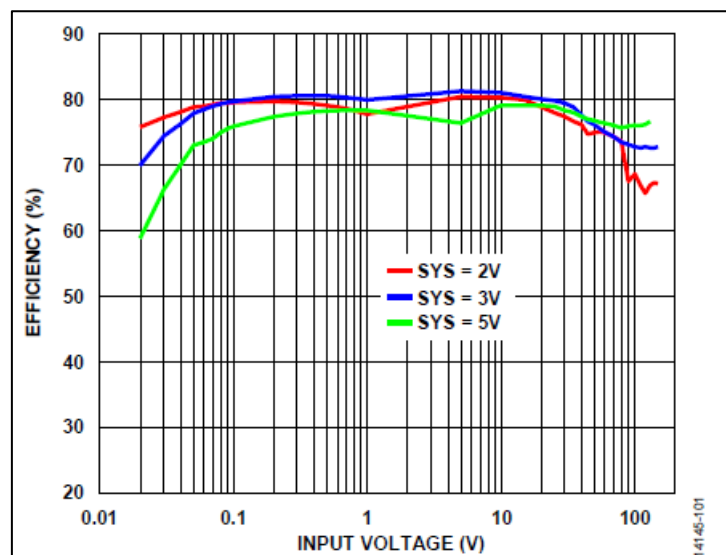
- 0.38V starto įtamos
- 300mA didžiausia išėjimo srovė
- 0.08V-3.3V įėjimo darbo įtampa
- 2.2V-5.2V išėjimo įtampų diapazonas
- ~3μA naudojama srovė

Valdiklio savybės:

- Dc-Dc boost keitiklis
- Atviros grandinės 4s-32s periodu veikiantis MPPT algoritmas su 0.256s atviros grandinės įtampos nuskaitymo trukme.
- Kraunamos Baterijos apsauga
- 1.5V-3.6 pastovios įtampos išėjimas su 150mA išėjimo srove
- Tiesinis įtampos reguliatorius, kuris reguliuoja išėjimo įtampą, kai ji yra artima šaltinio įtampai



19 pav. Detali ADP5091/ADP5092 blokinė diagrama[14]



20 pav. Teorinė ADP5092 efektyvumo priklausomybė nuo įėjimo srovės esant 1V įėjimo įtampai[14]

3.4. BQ25505

BQ25505[15] yra Texas instruments sukurtas mažos galios energijos rinkėjas su įdiegta MPPT funkcija bei automatiniu galios perjungikliu.

Tinkantys energijos šaltiniai:

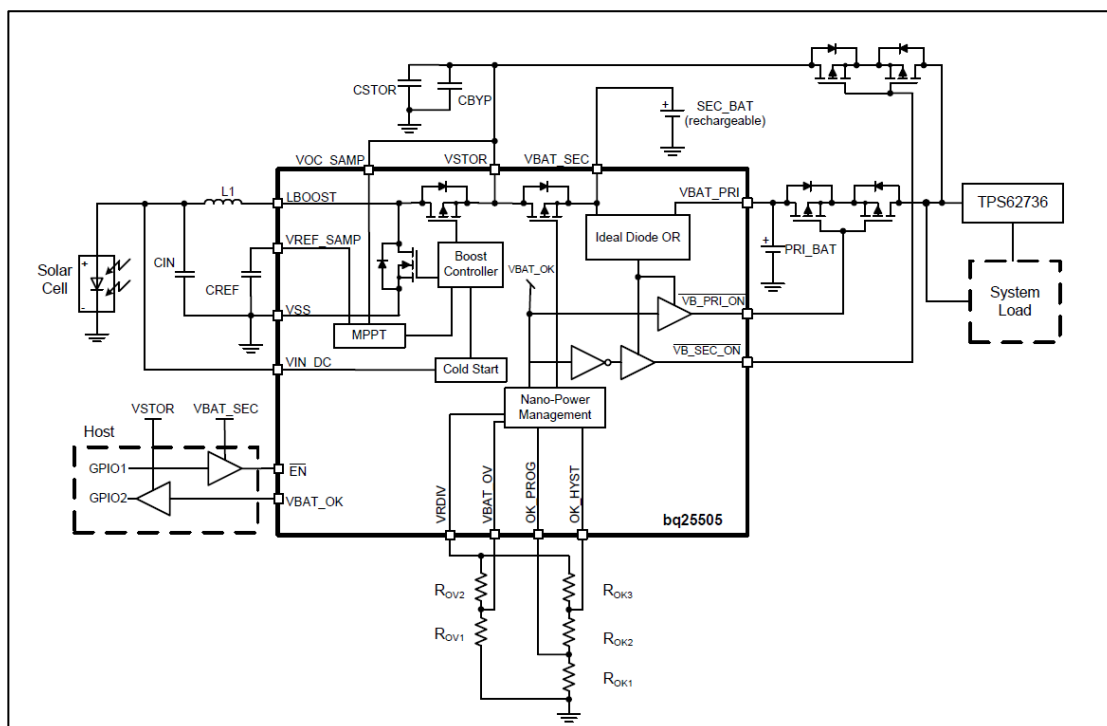
- Fotovoltiniai elementai
- Termoelektriniai generatoriai

Elektriniai parametrai:

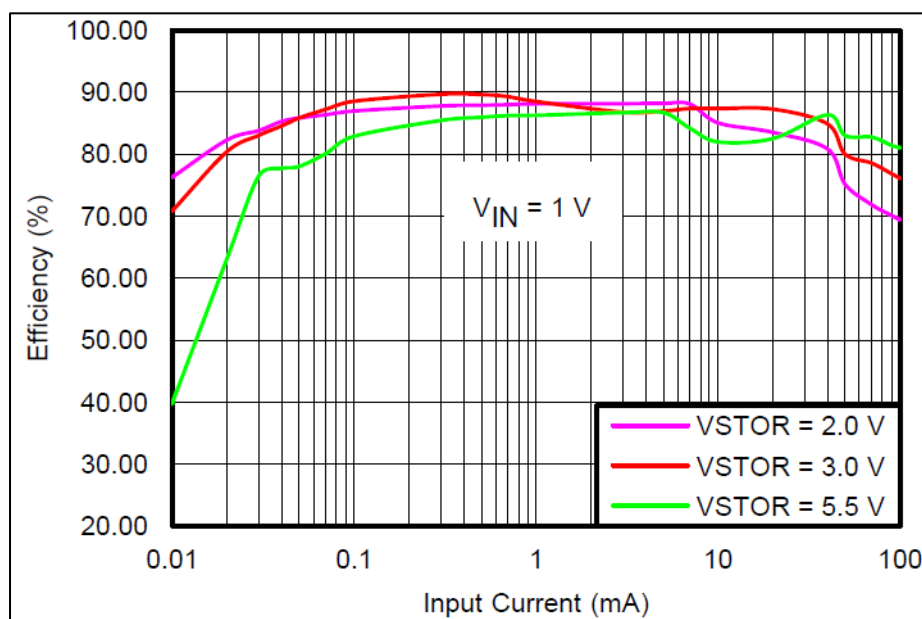
- 0.6V starto įtampa
- 285mA didžiausia išėjimo srovė
- 0.1V-5.1V įėjimo darbo įtampa
- 2V-5.5V išėjimo įtampų diapazonas
- 325nA naudojama srovė

Valdiklio savybės:

- Dc-Dc boost keitiklis
- Atviros grandinės MPPT algoritmas su atviros įtampos nuskaitymo periodu 0.256s, bei 16s darbo režimu.
- Baterijos apsauga



21 pav. Blokinė BQ25505 diagrama su išoriniais grandinės elementais.[15]



22 pav. Teorinė BQ25505 efektyvumo priklausomybė nuo įėjimo srovės esant 1V įėjimo įtampai[15]

3.5. LTC3105

Linear technology yra sukūrę LTC3105[18], mažos galios didelio efektyvumo boost keitiklį su didžiausios galios taško kontrole(MPPC). Didžiausios galios taško kontrolė neleidžia įėjimo galios šaltinių įtampai nukristi žemiau nei nustatytas MPPC slenkstis, kuris nustatomas prijungus atitinkamo dydžio varžą MPPC jungtyje, todėl galimas tiesioginis jungimas prie didelio impedanso šaltinių, tokių kaip PV moduliai ar termoelektriniai generatoriai (jų impedansas mažas). Didžiausios galios taško kontrolė leidžia ir temperatūrinę didžiausios galios korekcija lygiagrečiai prie MPPC išorinės varžos prijungus diodą su žinoma temperatūrine priklausomybe.

Tinkantys energijos šaltiniai:

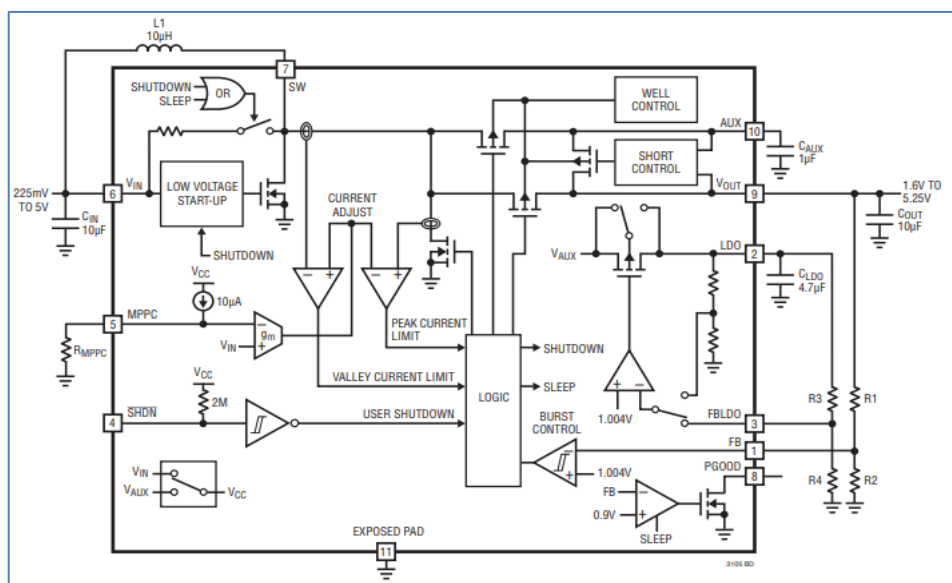
- Fotovoltiniai elementai
- Termoelektriniai generatoriai
- Pastovios vidaus varžos

Elektriniai parametrai:

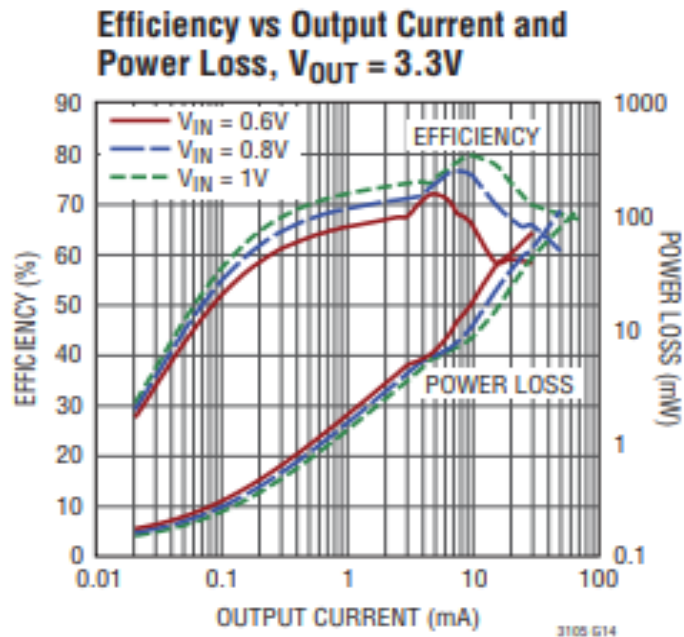
- 0.25V starto įtampa
- 0.25V-5V įėjimo darbo įtampa
- 1.6V-5.25V išėjimo įtampų diapazonas
- 24μA naudojama srovė

Valdiklio savybės:

- Dc-Dc boost keitiklis
- Didžiausios galios taško kontrolė MPPC.
- Baterijos apsauga



23 pav. Blokinė LTC3105 diagrama su išoriniais grandinės elementais.[18]



24 pav. Teorinė LTC3105 efektyvumo ir nuostolių priklausomybė nuo išėjimo srovės esant 3.3V išėjimo įtampai.[18]

3.6. Mažos galios MPPT valdiklių apibendrinimas

SPV1050 turi didelę įėjimo įtampų sritį, lankstų darbo režimo periodą. Pagrindinis jo trūkumas yra didelė įsijungimo įtampa 0.55V.

CY39C8 pagrindinis pliusas yra maža valdiklio įsijungimo įtampa 0.35V. Pagrindiniai minusai yra lyginant su kitais valdikliais didelė naudojama srovė 41μA, MPPT ir pastovios įtampos režimai nesuderinami kartu, bei darbo režimo periodas 2.7s, kuris nors dažnai kintamo intensyvumo apšvietoje būtų naudingas, bet realybėje tai sąlygoja apie 5% energijos nuostolius sistemoje.

ADP5092 turi didžiausią išėjimo srovę 300mA, starto įtampa nėra didelė 0.38V, bei įsijungusio valdiklio įėjimo įtampa gali nukristi iki labai mažos įtampos 0.08V. Valdiklio naudojama srovė nėra didelė 3μA ir lanksčiausias darbo režimas lyginant su kitais valdikliais MPPT pasikoregavimo periodas yra 4s-32s. Pagrindiniai šio energijos rinkėjo trūkumai yra nedidelė įėjimo įtampų sritis iki 3.3V.

BQ2550 turi didelę išėjimo srovę 285mA bei mažą naudojamą srovę, valdiklio darbo režimo periodas nevaldomas ir trunka 16s. Darbo režimo metu įėjimo įtampa gali nukristi iki 0.1V. Lyginant šio valdiklio efektyvų perdavimą esant 1V įėjimo įtampai galime matyti jog jis išlaiko

efektyvumą geriausiai net prie itin mažų srovių. Šio valdiklio pagrindiniai trūkumai yra didelė įsijungimo įtampa 0.6V, darbo režimas nėra koreguojamas, bei jis yra brangiausias.

LTC3105 vienintelis iš aptartų valdiklių neturi atviros grandinės MPPT algoritmo, bet yra geras tuo, nes turi mažiausią starto įtampą bei temperatūrinę didžiausios galios taško korekciją, kadangi nėra tikrinimo režimo ir nuostolių dėl esančio tikrinimo periodo. Pagrindiniai trūkumai yra gana aukšta naudojama srovė lyginant su kitais valdikliais 24μA, bei esant mažesniai šaltinio įtampai, nei MPPC kontrolės nustatyta, naudingumas krenta.

1 lentelė. Mažos galios MPPT valdiklių informacinė lentelė

<i>Valdiklis</i>	<i>Firma</i>	<i>Didžiausia išėjimo srovė</i>	<i>Minimali įsijungimo įtampa</i>	<i>U_{in}</i>	<i>U_{out}</i>	<i>Dc-dc keitiklis</i>	<i>Baterijos apsauga</i>	<i>Naudojama srovė</i>	<i>Tikrinimo Periodas</i>	<i>Tikrinimo režimo periodas</i>	<i>Vieneto kaina (1000vnt partijai, 2019 pavasaris)</i>
SPV1050	STMicroelectronics	200mA	0.55V Boost režimas; 2.6V Buck-Boost režimas	0.15V -18V	2.2V - 5.3V	Buck-Boost; Boost	Yra	2.6μA	12s-20s	0.3s-0.5s	2.66Eu
CY39C831	Cypress	240mA	0.35V	0.3V-4.75V	3V-5V	Boost	Yra	41μA	2.7s	0.1s	2.01Eu
ADP5092	Analog Devices	300mA	0.38V	0.08V -3.3V	2.2V - 5.2V	Boost	Yra	3μA	4s-32s	0.256s	2.82Eu
BQ25505	Texas instruments	285mA	0.6V	0.1V-5.1V	2V-5.5V	Boost	Yra	325nA	16s	0.32s	3.87Eu
LTC3105	Linear-Technology		0.25V	0.25V -5V	1.6V - 5.25V	Boost	Yra	24μA			3Eu

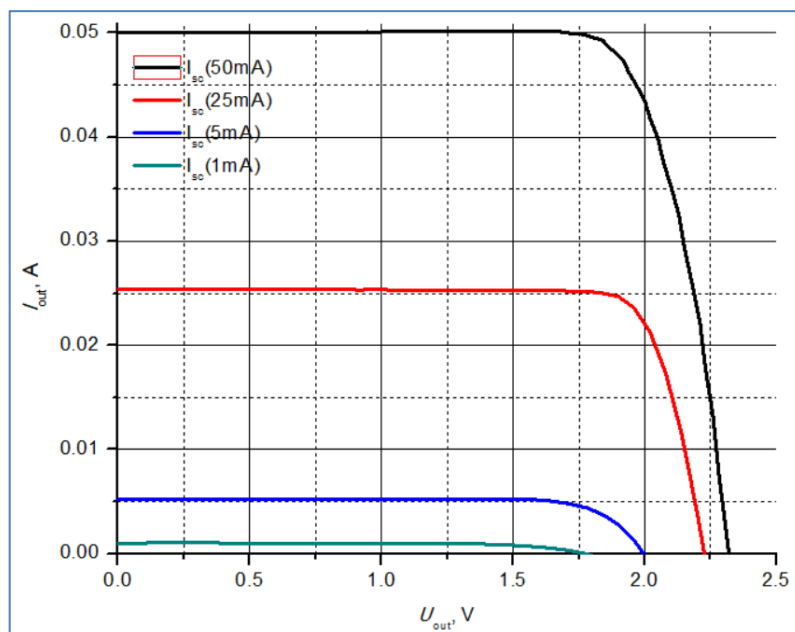
4. MATAVIMŲ METODIKA IR REZULTATAI

4.1. Saulės baterijos tyrimas

Šio tyrimo tikslas – ištirti saulės baterijos charakteristikas ir taip pasiruošti MPPT keitiklių tyrimams.

Matavimai buvo atlikti saulės bateriją apšvietus šviesos šaltiniu, turinčiu spektrą, artimą saulės. PV elementas –monokristalinis silicio saulės elementas, kurio matmenys- 50mm x 50mm.

Norint išmatuoti PV modulio voltamperinę charakteristiką bei galios priklausomybę nuo įtampos, reikia prie saulės elemento prijungti apkrovos varžą. Taip pat jungiamas voltmetras (lygiagrečiai) ir ampermetras (nuosekliai). Keisdami apkrovos varžą, stebime srovės stiprio kitimą nuo įtampos. Šiuos matavimus atlikau su keithley 2602A šaltinio matuokliu[9], Saulės baterijos voltamperinė charakteristika pavaizduota paveikslėlyje žemiau



25 pav. Saulės elemento srovės nuo įtampos priklausomybė esant skirtingiems šviesos intensyvumams

Maksimali galia randama iš formulės $P=UI$, kur prie skirtingų intensyvumų gauname:

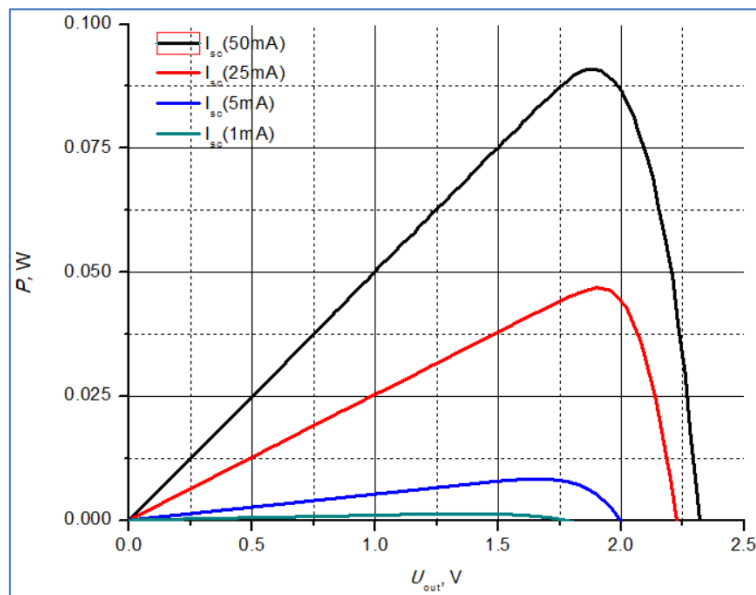
I_{sc} esant 50mA $P_1=90\text{mW}$;

I_{sc} esant 25mA $P_2=46\text{mW}$;

I_{sc} esant 5mA $P_3=8\text{mW}$;

I_{sc} esant 1mA $P_4=1.26\text{mW}$.

Norint įvertinti PV modulio efektyvumą, reikia žinoti užpildos faktorių. Užpildos faktorius dažniausiai būna nuo 0,7 iki 0,8. Apskaičiuojant užpildos faktorių, reikia žinoti užtrumpinto saulės elemento srovę I_{sc} bei atviros grandinės įtampą V_{oc} , bei didžiausios galios tašką, tada pagal lygtį (6) galime apskaičiuoti FF , kuris tiriamo saulės elemento yra esant I_{sc} 50mA, 25mA, 5mA, 1mA atitinkamai FF 0.78, 0.74, 0.72, 0.64 .



26 pav. Saulės elemento galios priklausomybė nuo įtampos esant skirtingiems apšvietos intensyvumams.

4.2. MPPT tyrimas

Perspektyviausi atrinkti valdikliai yra ADP5092 ir SPV1050, dėl savo struktūros bei elektrinių parametrų ir LTC3105 dėl skirtingo MPPT veikimo tipo(1 lentelė), BQ25505 buvo ištirtas [19] darbe ir atmestas dėl per didelės efektyvaus darbo įtampos. Ištirti ADP5092 nepavyko, kadangi iš oficialaus distributoriaus Mouser Electronics, Inc pirktas egzempliorius buvo akivaizdžiai nefunkcionalus (panašu, kad srovės apsauga suveikdavo ne prie deklaruojamų 0,2-0,3A, o prie <1mA. Todėl papildomai buvo ištirtas CY39C831 valdiklis.

Šio tyrimo tikslas, ištirti SPV1050, CY39C831 ir LTC3105 MPPT veikimą. Šiam tikslui buvo naudojama:

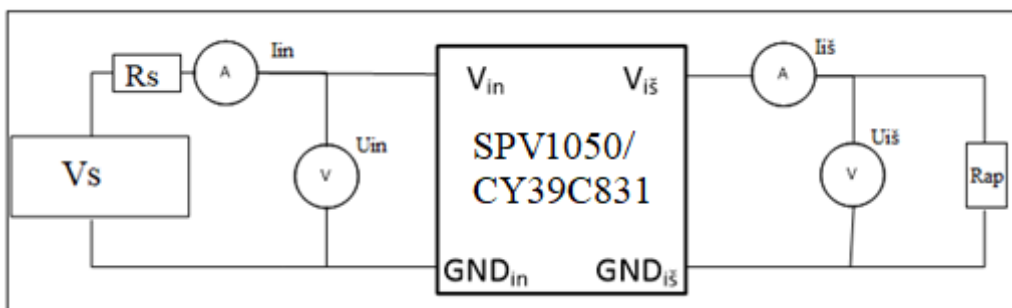
- DFR0579 bandomoji grandinė [16], kurioje yra naudojama SPV1050
- MB39C831-EVB-03 bandomoji grandinė [17], kurioje integruotas CY39C831.

Ekvivalentinė matavimų schema pavaizduota 22 paveikslėlyje.

Energijos šaltiniu parinktas DC maitinimo šaltinis su pastovia vidaus varža. Prie energijos šaltinio jungiamas nuosekliai ampermetras ir lygiagrečiai voltmėtras ir visa tai prijungiama prie tiriamojo valdiklio jungties. Išėjimo jungtyje nuosekliai įjungiame ampermetrą ir lygiagrečiai voltmėtrą, bei įtampos baterijos imitatoriumi(3-4 voltų).

Keitiklio naudingumo koeficientą galima apskaičiuoti įėjimo galią padalinus iš išėjimo galios $\eta = P_{in}/P_{iš}$, kur $P_{in} = U_{in} \cdot I_{in}$, o $P_{iš} = U_{iš} \cdot I_{iš}$. Norint apskaičiuoti MPPT koeficientą(K_{mppt}) PV elementui, reikia įėjimo galią padalinti iš didžiausios galios t.y šaltinio galios(kuri yra išmatuota saulės baterijos tyrime) $K_{mppt} = P_{in}/P_{max}$, o tiesinio šaltinio K_{mppt} apskaičiavimui didžiausia galia randama $P_{max} = \frac{(U_{evj}/2)^2}{r}$, kur r yra šaltinio varža $r \sim 0.99\Omega$. Tiriant keitiklių veikimą su ištirtąja saulės baterija (23pav.) keičiama saulės baterijos apšvieta (I_{sc} :50mA, 25mA, 5mA,1mA).

Baterijos imitatorius visais atvejais yra įtampos maitinimo šaltinis apkrautas 30Ω varža.

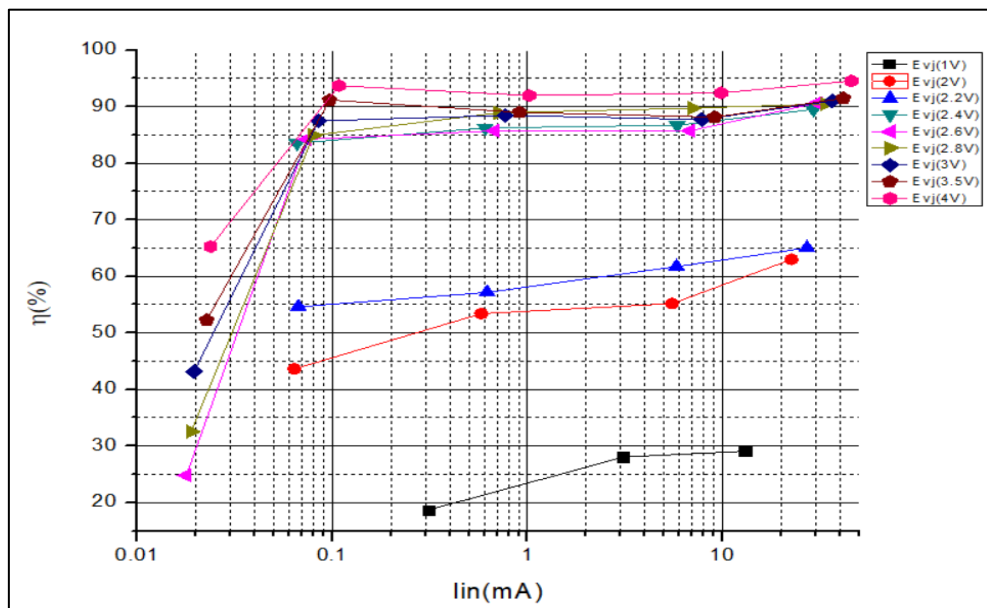


27 pav. Matavimams naudojama principinė schema

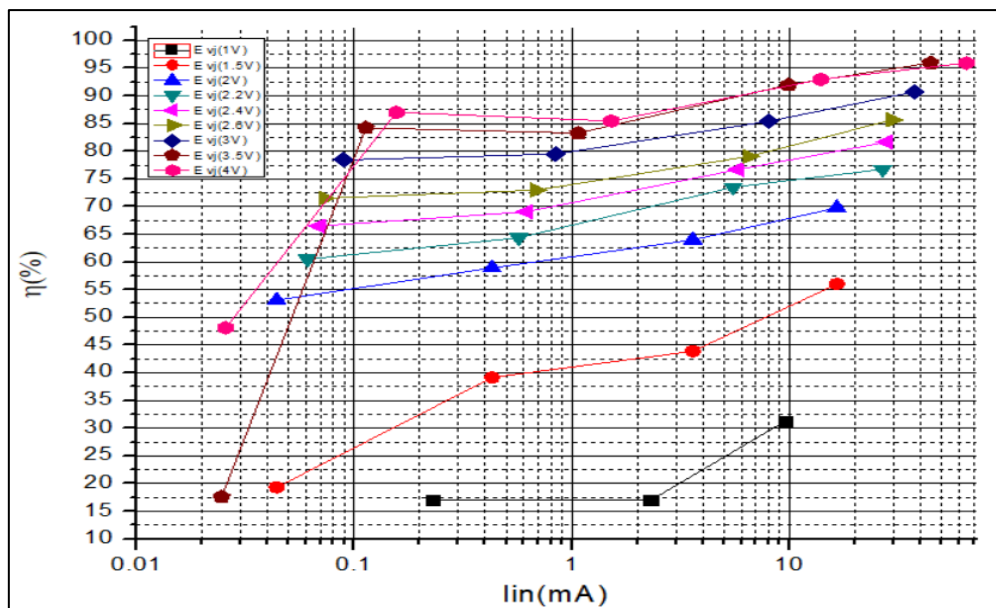
4.3. SPV1050 matavimai

Kiekvieno matavimo metu buvo laukiama 16 sekundžių, kol MPPT algoritmas suveiks ir perkalibruos į aukštesnį galios tašką. Kad pasiektų didžiausią galios tašką tekdavo laukti apie tris ciklus (48 sekundes). Šis algoritmas naudoja atviros grandinės metodą, kuris yra vienas iš pigiausių, bet nelabai tikslų. Kadangi nusistovėjusio MPPT tekdavo laukti 48 sekundes galima daryti išvadą, kad prie dažnai kintančios (nepastovios) apšvietos šis MPPT algoritmas yra netinkamas.

Charakteristikose žemiau galime matyti keitiklio naudingumo koeficiento priklausomybes:



28 pav. SPV1050 naudingumo koeficiento priklausomybė nuo įėjimo srovės prie 3V įtampos išėjime ir skirtingų šaltinio EVJ (Kiekvienai EVJ keičiama šaltinio vidaus varža R_s). Tiesinis šaltinis.

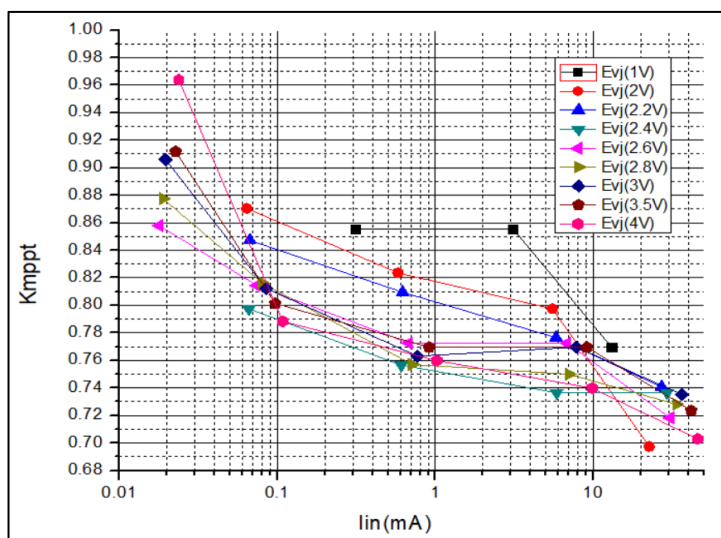


29 pav. SPV1050 naudingumo koeficiento priklausomybė nuo įėjimo srovės prie 4V įtampos išėjime ir skirtingų šaltinio EVJ (Kiekvienai EVJ keičiama šaltinio vidaus varža R_s). Tiesinis šaltinis.

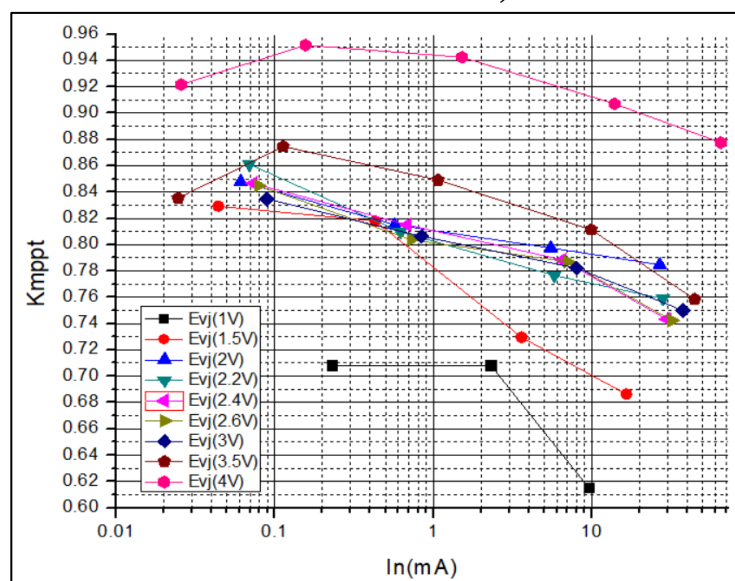
Esant 4V išėjimo įtampai naudingumo koeficientas dėl įėjimo srovių, didesnių už 100uA yra, priklausomai nuo šaltinio E_{vj} , pradedant nuo 2.4V, beveik pastovus 85-95% intervale, kas yra tikrai geras rezultatas. Prie 3V išėjimo įtampos naudingumo koeficiento priklausomybė nuo šaltinio E_{vj} yra tolygesnė, tačiau naudingumo kritimas dėl mažesnių už ~100uA sroviu yra išlikęs. Tai reiškia, kad ~100uA srovė yra ta apatinė riba, nuo kurios šis MPPT valdiklis gali būti efektyviai naudojamas. Vertinant jo efektyvių įėjimo įtampų diapazoną, reikia nepamiršti, kad 2,4V apatinė E_{vj} riba apytiksliai atitinka (pagal MPPT teoriją) 1,2V įėjimo įtampą.

Be to, matosi, kad keitiklio naudingumas yra geresnis prie didesnės, 4V išėjimo įtampos. Todėl naudojant šį valdiklį geriau yra dirbti su aukštesnės įtampos baterijomis

Charakteristikose žemiau yra pavaizduotos K_{mppt} nuo įėjimo srovės I_{in} :

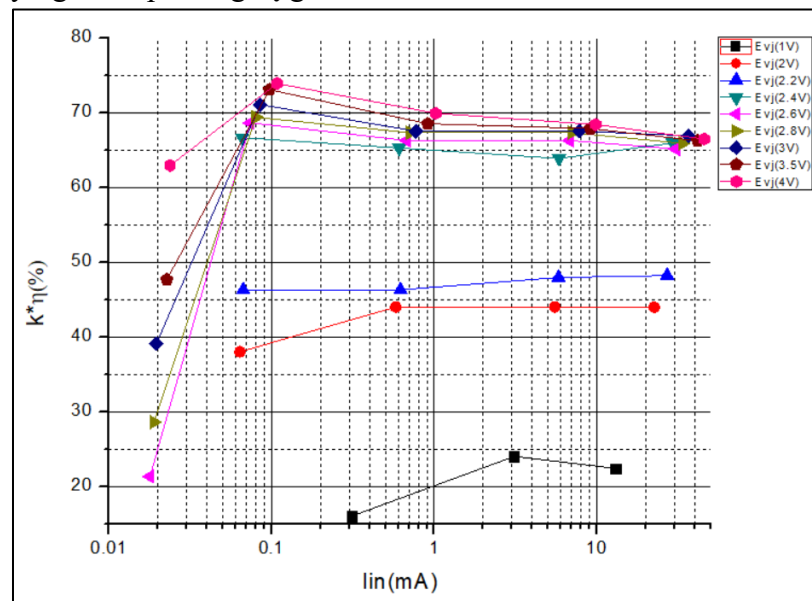


31 pav. SPV1050 K_{mppt} priklausomybė nuo įėjimo srovės prie 4V įtampos išėjime ir skirtingų šaltinio E_{vj} (Kiekvienai E_{vj} keičiama šaltinio vidaus varža R_s). Tiesinis šaltinis.

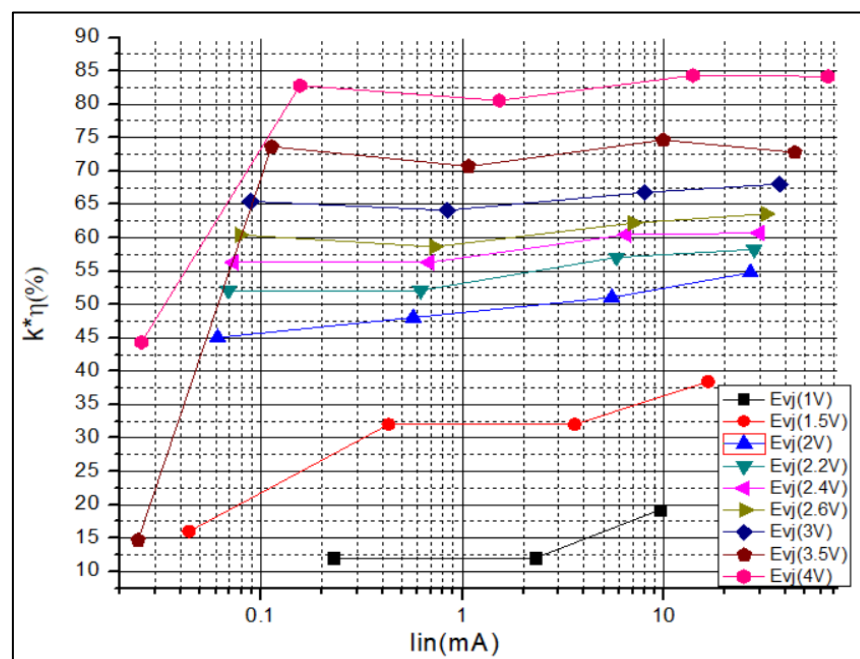


30 pav. SPV1050 K_{mppt} priklausomybė nuo įėjimo srovės prie 3V įtampos išėjime ir skirtingų šaltinio E_{vj} (Kiekvienai E_{vj} keičiama šaltinio vidaus varža R_s).

Iš grafikų galime pastebėti, kad K_{mppt} didžiausias prie mažų įėjimo srovių ir mažėja didėjant įėjimo srovei. Be to, tiesiniam šaltiniui (vidaus varža pastovi) K_{mppt} vertės yra neįprastai mažos (paprastai 0,98 laikoma ne itin geru rezultatu, o 0,95 yra ribiškai prastas rezultatas). Tokie rezultatai gaunami todėl, kad šio valdiklio MPPT algoritmas remiasi atviros grandinės įtampos (3.3.3) stebėjimo metodu ir taiko koeficientą, būdingą dėl kristalinio silicio saulės elementų. Kadangi reikia atsižvelgti tiek į naudingumo koeficientą tiek į MPPT efektyvumą, visam valdiklio naudingumui (efektyvumui), kuris yra valdiklio MPPT koeficiento ir naudingumo sandauga $K_{mppt} * \eta$, nustatyti galime pažvelgti į grafikus žemiau:

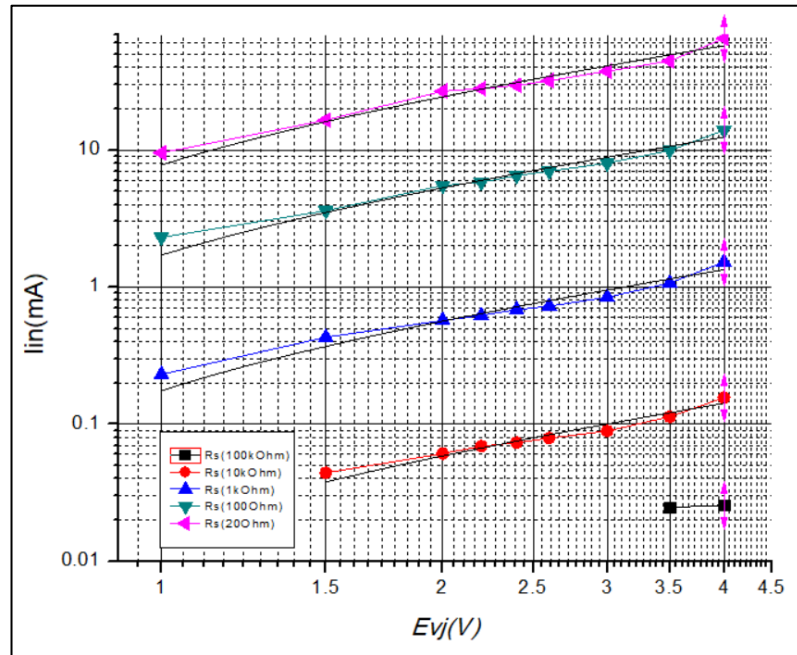


33 pav. SPV1050 $K_{mppt} * \eta$ priklausomybė nuo įėjimo srovės prie 3V įtampos išėjime. Tiesinis šaltinis.



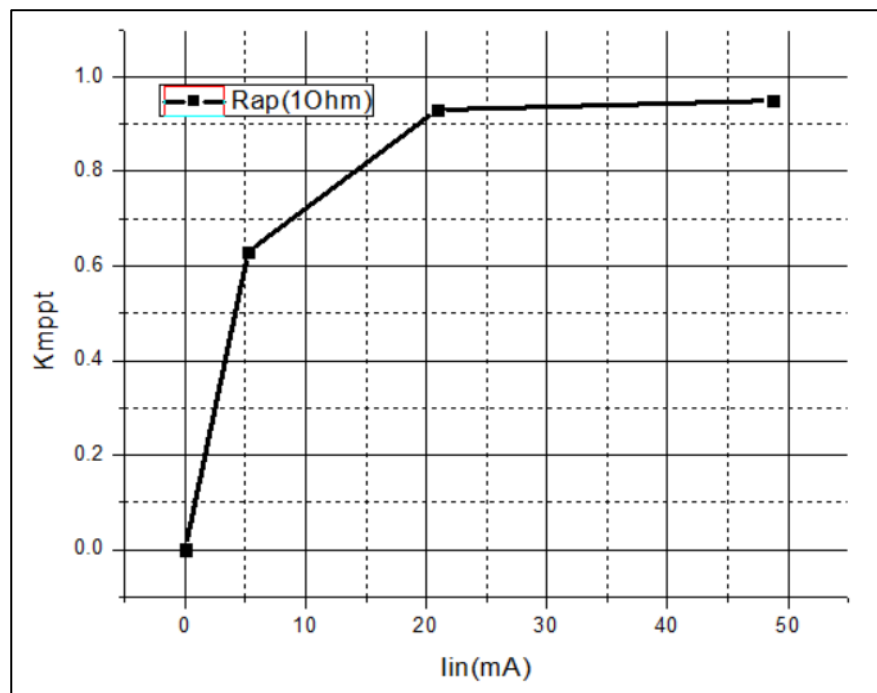
32 pav. SPV1050 $K_{mppt} * \eta$ priklausomybė nuo įėjimo srovės prie 4V įtampos. Tiesinis šaltinis.

Valdiklio SPV1050, efektyvumas(39 pav., 38 pav.) už naudingumą(29pav., 31pav.) mažesnis 10% , efektyvumas nelygus naudingumui, nes valdiklio K_{mppt} , nėra lygus vienam.

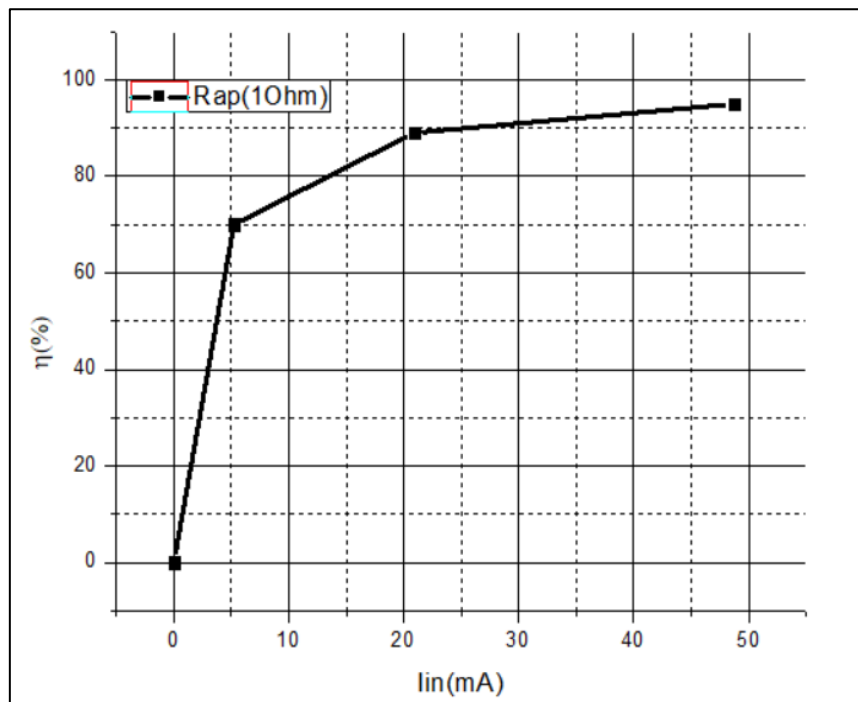


34 pav. SPV1050 įėjimo srovės priklausomybė nuo šaltinio įtampos esant 3V apkrovai. Tiesinis šaltinis.

Matavimo su saulės baterija naudingumo bei MPPT koeficiento grafikai pateikti žemiau:



35 pav. SPV1050 MPPT naudingumo koeficiento priklausomybė nuo įėjimo srovės. PV šaltinis.



36 pav. Naudingumo koeficiento priklausomybė nuo įėjimo srovės PV šaltinis.

Prie apšvietos mažesnės nei 5mA valdiklis nustoja veikti ir pradeda naudoti energiją iš apkrovos.

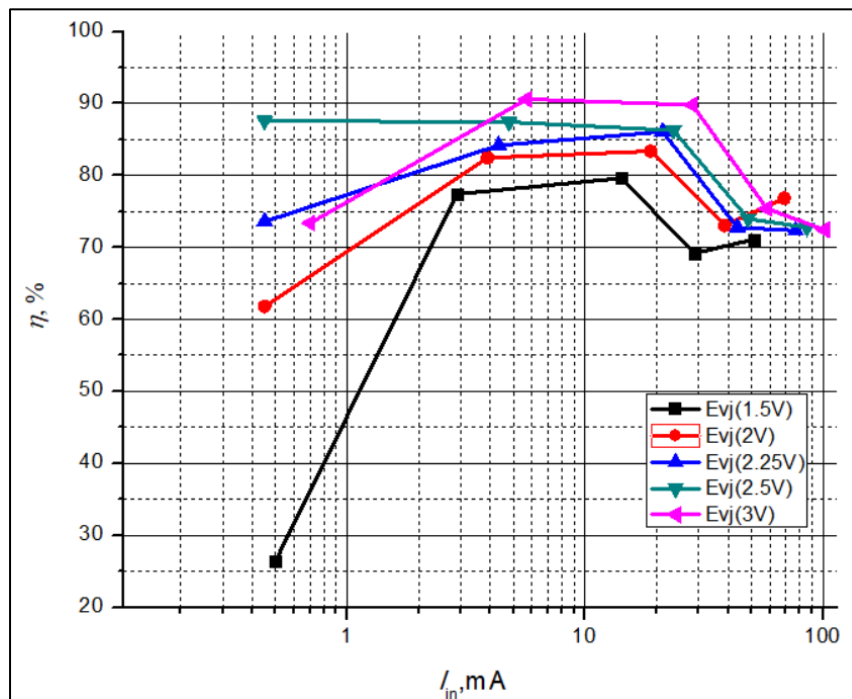
4.4. CY39C831 matavimai

Atliekant matavimus teko pakoreguoti bandomosios plokštės (MB39C831-EVB-03) schemą, detalesnę informaciją apie bandomosios plokštės schemą rasite netinka- tai svarbu, turi būti darbe [17] prijungiant prie įėjimo jungčių lygiagrečiai $47\mu\text{F}$ kondensatorių, kadangi dėl per mažos talpos, keitiklio įėjimo įtampos pulsacijos (41 pav.) lėmė sumažintas išmatuotų naudingumo ir MPPT koeficientų vertes. Matavimai buvo atlikti su 3 ir 3.7 voltų baterijos imitatoriumi.



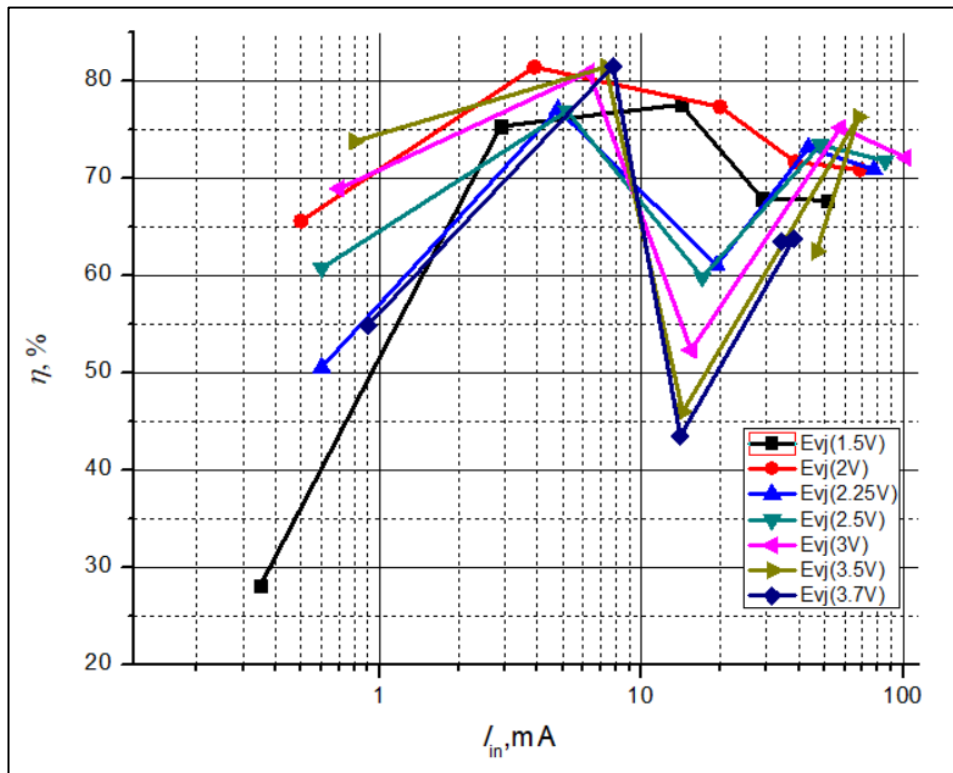
37 pav. CY39C831 įtampos pulsacijos be papildomo kondensatoriaus įėjime ir įtampa su papildomu kondensatoriumi esant 2.5V EVJ ir 4V išėjimo įtampai.

Charakteristikose žemiau galime matyti naudingumo nuo įėjimo srovės priklausomybes:



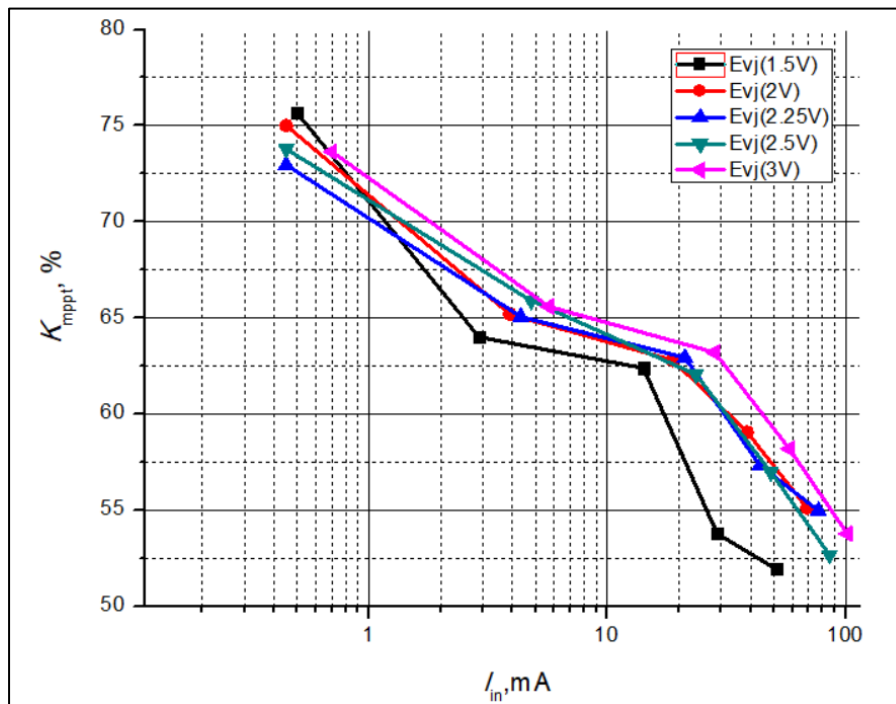
38 pav. CY39C831 naudingumo koeficiento priklausomybė nuo įėjimo srovės su 3V įtampa išėjime. Tiesinis šaltinis.

Esant 3V išėjime, naudingumo koeficientas pilnai pasiekia didžiausią vertę ties $\sim 3\text{mA}$ įėjimo srove, pradedant nuo 2V evj ir išlieka pastovus ties 90%-80%. Naudingumo koeficiento kritimas prie aukštesnių įėjimo srovių $\sim 30\text{mA}$ atsiranda dėl srovės ribojimo, kurį pradeda taikyti CY39C831 integruota baterijos krovimo grandinė. Žemiau $350\mu\text{A}$ įėjimo srovės MPPT valdiklis nustodavo veikti, tiek prie 3.7V tiek 3V išėjimo įtampas, tad $350\mu\text{A}$ yra ribinė valdiklio srovė.

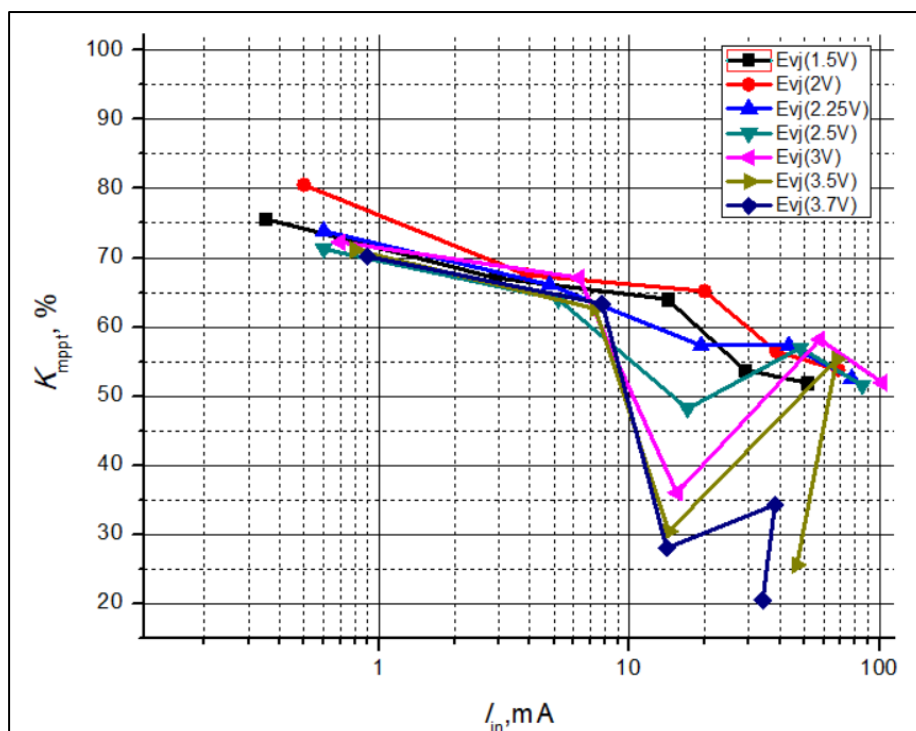


39 pav. CY39C831 naudingumo koeficiento priklausomybė nuo įėjimo srovės su 3.7V įtampa išėjime. Tiesinis šaltinis.

Charakteristikose žemiau yra pavaizduotos K_{mppt} priklausomybė nuo įėjimo srovės, naudojant tiesinį šaltinį:

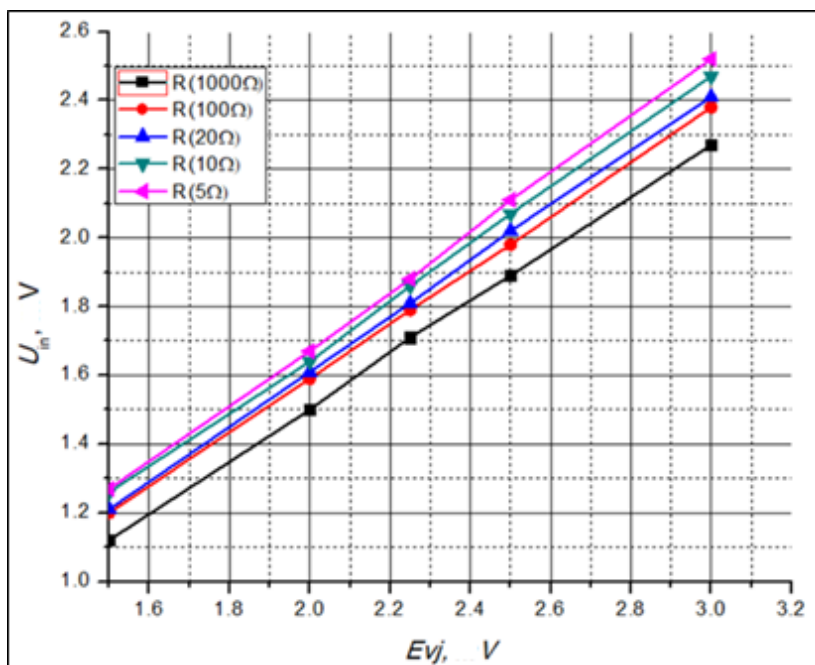


40 pav. CY39C831 MPPT koeficiento priklausomybė nuo įėjimo srovės esant 3V išėjimo įtampai. Tiesinis šaltinis.



41 pav. CY39C831 MPPT koeficiento priklausomybė nuo įėjimo srovės esant 3.7V išėjimo įtampai. Tiesinis šaltinis.

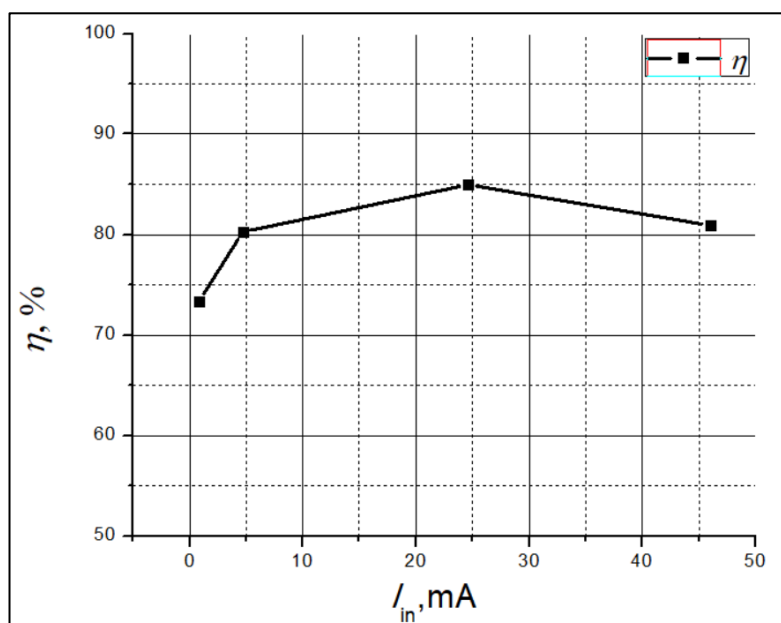
Iš grafikų galime matyti, kad K_{mppt} mažėja didėjant įėjimo įtampai, bei jo vertės yra prastos, kadangi šio valdiklio MPPT algoritmas, kaip ir tirta SPV1050 valdiklio, remiasi atviros grandinės įtampos stebėjimo metodu.



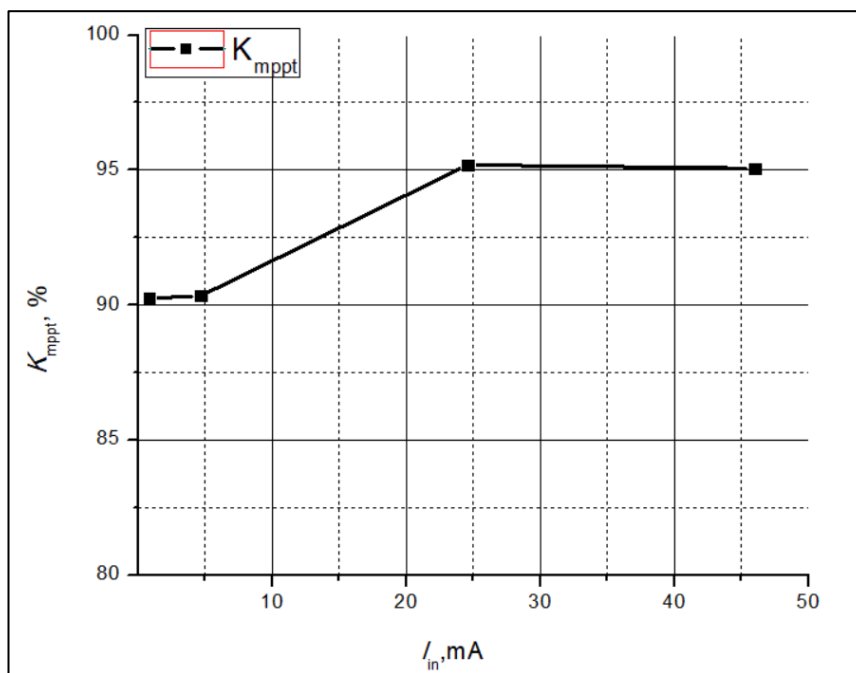
42 pav. CY39C831 įėjimo įtampos priklausomybė nuo šaltinio elektrovaros esant 3V išėjime prie skirtingų šaltinio varžų R . Tiesinis šaltinis.

Iš 46 pav. Matyti, kad tiesinio šaltinio MPPT taškas nėra fiksuotas, o priklauso nuo įėjimo srovės (šaltinio varžos). Didesnėm srovėm jis slenka į didesnių įtampų sritį.

Matavimo su saulės elementu naudingumo bei MPPT koeficiento grafikai pateikti žemiau:



43 pav. CY39C831 naudingumo koeficiento priklausomybė nuo įėjimo srovės prie 3V išėjimo įtampos. PV šaltinis.



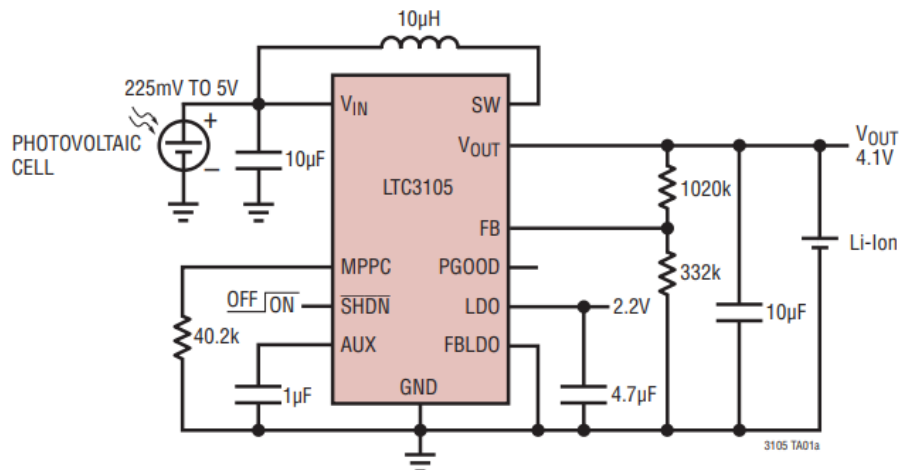
44 pav. CY39C831 MPPT koeficiento priklausomybė nuo įėjimo srovės esant 3V išėjime. PV šaltinis.

Esant 0.5mA apšvietos intensyvumui valdiklis nustoja veikti.

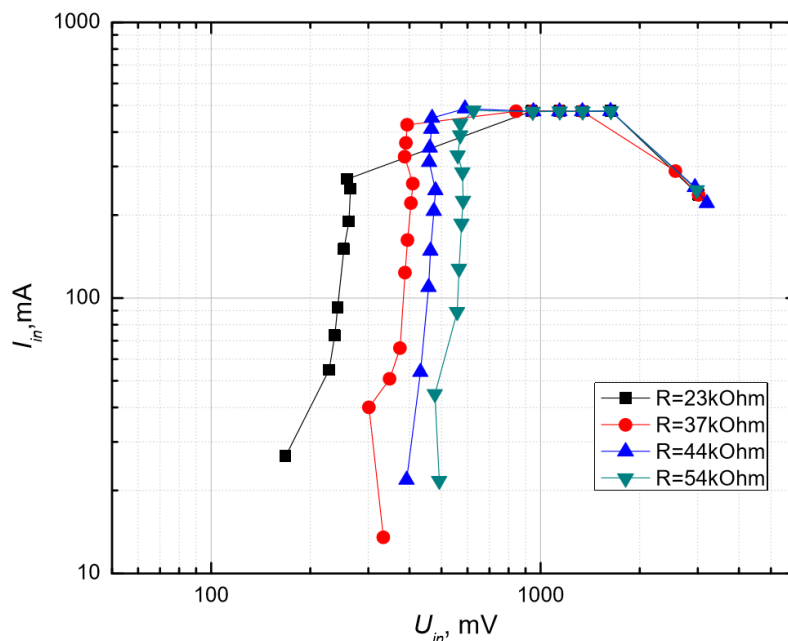
4.5. LTC3105 matavimai

Atliekant matavimus su LTC3105 buvo sumontuota mikroschema su gamintojų siūlomų nominalių komponentais, keičiant tik prie MPPC išvado prijungtos varžos dydį (52 pav.). Schemos sujungimas atliekamas kaip ir matuojant SPV1050 bei CY39C831 (27 pav.). Matavimai atliekami su tiesiniu energijos šaltiniu, išėjimo baterijos imitatoriaus įtampa 4.2V.

Esant MPPC prijungtam rezistoriui $\sim 10\text{k}\Omega$ ir šaltinio varža $\sim 1\Omega$ valdiklis startavo prie 130mV EVJ.



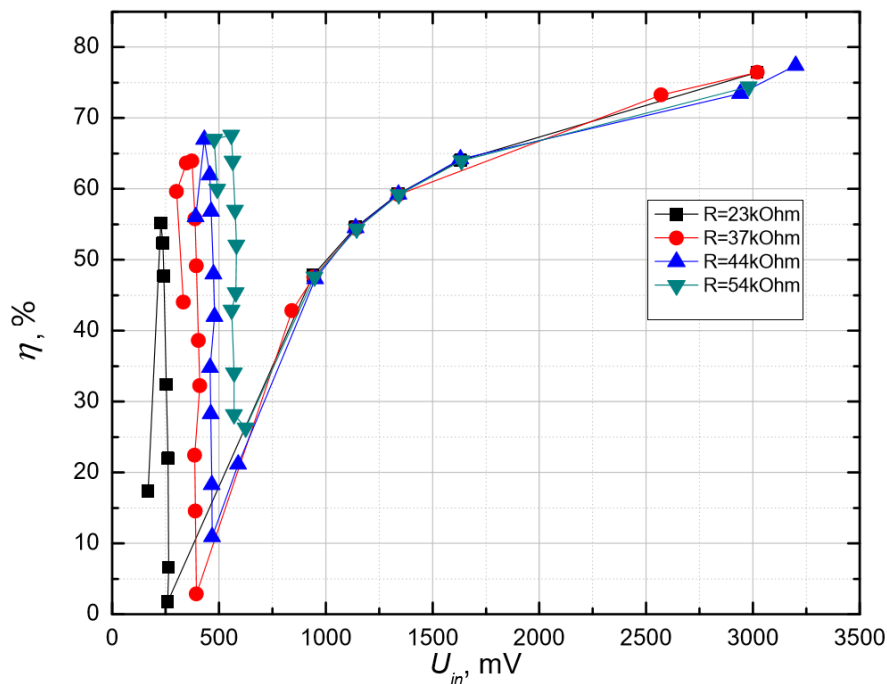
46 pav. LTC3105 su išorinių komponentų vertėmis principinė schema



45 pav. LTC3105 įėjimo srovės priklausomybė nuo įėjimo įtampos esant skirtingoms MPPC varžoms ir 4.2V išėjimo įtampai. Tiesinis šaltinis.

Matome (51 pav.), kad kintant MPPC varžai slenkasi valdiklio įsijungimo darbo taškas, keitklis taikosi palaikyti pastovią įėjimo įtampą, o prie didesnių $\sim 400\text{mA}$ srovių pasiekiamas

srovės droselyje ribojimas. Keliant įtampą didėja išėjimo srovė, todėl pasiekus limitą suveikia baterijos apsauga, mažinama įėjimo srovė.



47 pav. LTC3105 naudingumo koeficiento priklausomybė nuo įėjimo įtampos esant skirtingoms MPPC varžoms ir 4.2V išėjimo įtampai. Tiesinis šaltinis

Iki ~500mV ,priklausomai koks MPPC varžos dydis, matome valdiklio įsijungimo sritį, kai valdiklio keitiklis išjunktas, nuo 500mV keitiklis įjungiamas ir valdiklis veikia normaliuoju režimu. Teisingas keitiklio darbo taškas yra iki naudingumo koeficiento kritimo.

Fiksuotoje MPP įtampoje MPPT koeficientas yra lygus 100%. Jeigu saulės elemento užpildos faktorius yra blogas ir artimas tiesiniam šaltiniui (iš 6 ir 17 lygties galime išvesti, kad

$$FF = \left(\frac{0.5U_{evj} - \frac{0.5U_{evj}}{r}}{U_{evj} * \frac{U_{evj}}{r}} \right) \approx 0.25$$

), o neapkrauto elemento įtampa yra menkai priklausoma nuo apšviestumo, tuomet su MPPC varža galima nustatyti fiksuotą įtampą, kurioje bus vykdomas energijos paėmimas iš tokios baterijos.

5. IŠVADOS

1. Šiuo metu dar negaminami mažos galios energijos išgavimo keitikliai, veikiantys pagal pilną MPPT algoritmą. Vietoje to naudojami algoritmai, naudojantys arba fiksuotą MPP įtampą, arba MPP įtampą, kaip fiksuotą dalį nuo neapkrauto šaltinio įtampos.
2. Naudojant blogo užpildos faktoriaus saulės baterijas geriausiai tinka fiksuotos darbo įtampos keitiklis LTC3105.
3. Mažų $\sim 0.1\text{mA}$ - 3mA srovių režime efektyviausiai veikiantis keitiklis yra SPV1050.
4. Dirbant $3\text{--}30\text{ mA}$ įėjimo srovių diapazone CY39C831 yra pranašesnis mažesnių, $\sim 3\text{V}$, o SPV1050 aukštesnių $\sim 4\text{V}$ išėjimo įtampų diapazone.
5. Gamintojo platinamoje CY39C831 maketinėje plokštėje yra per mažos talpos įėjimo kondensatoriai, neleidžiantys pasiekti aukštų naudingumo ir MPPT koeficiento verčių.

LITERATŪRA

1. David Sanz Morales, degree of Master of Science in Technology 2010. Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Applications, *Faculty of Electronics, Communications and Automatio, Aalto University*, Finland.
2. Ultralow power energy harvester and battery charger, 2018. Nuoroda internete <<https://www.st.com/resource/en/datasheet/spv1050.pdf> SPV1050 >[žiūrėta 2019-1-20]
3. Hlaili, Manel & Mechergui, Hfaiedh. 2016. Comparison of Different MPPT Algorithms with a Proposed One Using a Power Estimator for Grid Connected PV Systems. *International Journal of Photoenergy*. 2016. 1-10. 10.1155/2016/1728398.
4. Faranda, Roberto & Leva, S. (2008). Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems. *J. Electromagn. Anal. Appl.*. 3.
5. Adina, Pop & Paul Petrica, Pop & Barz, Cristian & Latinovic, Tihomir. 2016. HARVESTING ENERGY-ULTRA LOW POWER DEVICE. *Acta Technica corviniensis Hunedoara. Tome IX*. 122-124.
6. Solar Power Manager Micro SKU: DFR0579, 2018. Nuoroda internete: <https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/DFRobot%20PDFs/DFR0579_Web.pdf >[Žiūrėta 2019-05-17].
7. Andrius Poškus, 2009. Fotodiodo tyrimas, *Vilniaus universitetas, Kietojo kūno elektronikos katedra* [žiūrėta 2019-1-20]
8. Green, Martin & Emery, Keith & Hishikawa, Yoshihiro & Warta, Wilhelm. 2011. Solar cell efficiency tables (version 37). *Prog Photovolt Res Appl. Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 19. 84 - 92. 10.1002/pip.1088.
9. Keithley Model 2601A/2602A, 2011. Nuoroda internete: <<https://assets.testequity.com/te1/Documents/pdf/keithley/2601A-2602A-specs.pdf> > [Žiūrėta 2019 05 20].
10. Wang, Meng-Hui & Chen, Mu-Jis, 2012. Two-Stage Fault Diagnosis Method Based on the Extension Theory for PV Power Systems. *International Journal of Photoenergy*. 2012. 10.1155/2012/892690.
11. S.M Sze, Kwok K. NG Physics of Semiconductor Devices. 3rd Edition, 2007m., John Wiley & Sons, Inc. ,79-124psl.
12. Steve Roberts, M.Sc DC/DC Book of Knowledge Practical tips for the User(Second Edition), 2015, RECOM Engineering GmbH & Co KG, Austria 16-23p.
13. CY39C831 Ultra Low Voltage Boost PMIC for Solar/Thermal Energy Harvester, 2019. Nuoroda internete: <<https://www.cypress.com/file/216476/download> > [Žiūrėta 2019 05 20].
14. Ultralow Power Energy Harvester PMUs with MPPT and Charge Management ADP5091/ADP5092, 2016. Nuoroda internete:

- < <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adp5091-5092.pdf> >
[Žiūrėta 2019 05 20].
15. Bq25505 ultra low-power boost charger with battery management and autonomous power multiplexer for primary battery in energy harvester applications, 2019. Nuoroda internete: < <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25505.pdf> > [Žiūrėta 2019 05 20].
 16. Solar Power Manager Micro SKU: DFR0579, 2018. Nuoroda internete: < https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/DFRobot%20PDFs/DFR0579_Web.pdf > [Žiūrėta 2019-05-17].
 17. MB39C831-EVB-03 Ultra Low Voltage Boost PMIC Energy Harvesting, Evaluation Board Operation Guide, 2018. Nuoroda internete: < <https://www.cypress.com/file/258231/download> > [Žiūrėta 2019 05 20].
 18. LTV3105 400mA Step-Up DC/DC Converter with Maximum Power Point Control and 205mV Start-Up, 2011. Nuoroda internete: < <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3105fb.pdf> > [Žiūrėta 2019 05 20].
 19. Lukas Briaukus Bakalauro baigiamasis darbas 2015. Energiją surenkančių integrinių grandinių galimybių tyrimas. *VU-FF-KKEK, Vilnius*.
 20. Julius Jakas kursinis darbas 2019. Mažos galios MPPT valdiklis . *VU-FF-CHFI, Vilnius*.

6. SUMMARY

Julius Jakas

Low power MPPT controller

The aim of this thesis is to look what ultra low power MPPT energy harvesters is in the market today, discuss their working principle, collect information about their electrical parameters, features and find weak spot of each individual device. Then practically evaluate most promising harvesters performances and maximum power point tracking efficiency.

This work consists of two main parts: theoretical and measurements. Theoretical part overview theory about solar elements, MPPT algorithms, dc-dc boost switch and review of MPPT energy harvesters. In measurement part evaluation was done for SPV1050, CY9C831 and LTC3105 low power MPPT controllers.