



**UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

Amar Kapić

**PRIJEDLOG ALGORITMA ZA PRAĆENJE TAČKE
MAKSIMALNE SNAGE FOTONAPONSKIH
PANELA**

-MAGISTARSKI RAD-

Podgorica, septembar 2018.

PODACI I INFORMACIJE O MAGISTRANTU

Ime i prezime	Amar Kapić
Datum i mjesto rođenja	11.9.1993. godine, Podgorica
Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina diplomiranja	Elektrotehnički fakultet, odsjek za Energetiku i Automatiku, 2015

INFORMACIJE O MAGISTARSKOM RADU

Naziv postdiplomskog studija	Studijski program Automatika
Naslov rada	Adaptivni metod za estimaciju sinhrofazora
Fakultet na kome je rad odbranjen	Elektrotehnički fakultet, Podgorica

UDK, OCJENA I ODBRANA MAGISTARSKOG RADA

Datum prijave magistarskog rada	27.12.2017.
Datum sjednice Vijeća Univerzitetske jedinice na kojoj je prihvaćena tema	23.3.2018.
Komisija za ocjenu teme i podobnosti magistranta	Prof. dr Milovan Radulović Prof. dr Božo Krstajić Doc. dr Žarko Zečević
Mentor	Prof. dr Božo Krstajić
Komisija za ocjenu rada	Prof. dr Milovan Radulović Prof. dr Božo Krstajić Doc. dr Žarko Zečević
Komisija za odbranu rada	Prof. dr Milovan Radulović Prof. dr Božo Krstajić Doc. dr Žarko Zečević
Datum odbrane	02.11.2018.

SAŽETAK

Efikasnost fotonaponske ćelije je veoma mala zbog gubitaka unutar same ćelije. Da bi fotonaponski panel dostigao maksimalni mogući stepen iskorištenja potrebno je da panel na izlazu daje maksimalnu snagu. Fotonaponska ćelija daje maksimalnu snagu kada se radna tačka panela, na strujno-naponskoj karakteristici, ima optimalnu vrijednost i tu tačku nazivamo tačkom maksimalne snage. Algoritmi koji se koriste za dovođenje radne tačke u optimalnu poziciju poznati su pod nazivom algoritmi za praćenje tačke maksimalne snage. Prilikom dizajna algoritama za praćenje tačke maksimalne snage treba voditi računa o nekoliko ključnih elemenata: brzini konvergencije, oscilacijama oko tačke maksimalne snage u stacionarnom stanju, kompleksnosti implementacije u računarskom smislu i broju potrebnih senzora.

U ovom radu su predložena dva algoritma za praćenje tačke maksimalne snage kojima se postižu poboljšanja u performansama u odnosu na konvencionalne metode. Prvi predloženi algoritam se zasniva na promjenljivom koraku, čime se ubrzava konvergencija ka optimalnoj tački i redukuju oscilacije u stacionarnom stanju. U slučaju pojave djelimične zasjenčenosti panela, na strujno-naponskoj karakteristici fotonaponskog panela se javlja više lokalnih maksimuma, stoga je predložen i algoritam kojim se obezbjeđuje uspješno pronalaženje globalnog maksimuma. Drugi predloženi algoritam se sastoji od tri procedure koje služe za: ispitivanje da li je došlo do djelimičnog zasjenčenja solarnog panela, pronalaženje globalnog maksimuma i smanjivanje oscilacija oko globalnog maksimuma.

Performanse predloženih algoritama su komparirane sa postojećim metodama kroz različite scenarije simulacija. Rezultati simulacija pokazuju da se predloženim rješenjima postižu brža konvergencija i značajno manje oscilacije oko optimalne tačke, naročito u praktičnim scenarijima kao što su nagla promjena solarne iradijacije i djelimična zasjenčenost solarnog panela.

Predloženi algoritmi se mogu vrlo jednostavno implementirati na DC-DC pretvaraču, čime bi se postigla veća efikasnost fotonaponskog panela, a samim tim i veća ekonomska isplativost fotonaponskog sistema.

Ključne riječi: globalni maksimum, faktor zaboravljanja, fotonaponski panel, MPPT, P&O.

ABSTRACT

Efficiency of the photovoltaic cell is very low because of the losses inside the cell. In order to have the maximum efficiency of the photovoltaic panel it is necessary that panel on the output gives maximum power. Photovoltaic panel gives maximum power when the operating point, on current-voltage characteristic, reaches the optimal value known as the maximum power point. Algorithms' used to bring the operating point into an optimal position are known as maximum power point tracking (MPPT) algorithms. When designing MPPT algorithms there are few main elements needed to take into consideration such as: convergence speed, fluctuations around maximum power point in steady state, computational complexity, sensors they require for their implementation.

Throughout the thesis two algorithms have been proposed. They show excellent results in situations where conventional algorithms have weaknesses as in case sudden change in solar irradiation or partial shading. First proposed algorithm, which is based on a variable step, increases convergence speed and reduces oscillations in steady state what results in the increase of efficiency of the panel. In the case of partial shading phenomena, current-voltage characteristic has more local maximums, therefore one more algorithm is proposed in order to find a global maxima. The second proposed algorithm, which consists of three sub-methods, is designed for the case of partial shading phenomena. Sub-methods examine if there is an occurrence of partial shading, find global maxima and reduce oscillations around global maxima.

Performances of the proposed methods have been compared with the existing ones in different scenarios. Results of the simulations show that proposed algorithms have the ability to exactly define which phenomena occurs, what gives faster convergence speed. In steady state, the fluctuations around maximal power point are noticeably reduced, what increases photovoltaic system efficiency.

Algorithms can be easily implemented in DC-DC converter, which helps to establish higher efficiency and it contributes to greater economic cost-effectiveness of photovoltaic systems as well.

Key words: global maxima, forgetting factor, photovoltaic panel, MPPT, P&O.

SADRŽAJ

SAŽETAK	i
ABSTRACT	iii
SPISAK SKRAĆENICA	vii
SPISAK SLIKA	viii
SPISAK TABELA	x
UVOD.....	1
Glava 1	4
MODELOVANJE I ANALIZA SOLARNE ČELIJE	4
1.1 Istorija nastanka solarne ćelije.....	4
1.2 Poluprovodnička dioda (PN - spoj)	7
1.3 Struktura solarne ćelije	10
1.4 Modelovanje solarne ćelije.....	11
1.5 Faktor popunjenosti i efikasnost fotonaponske ćelije	17
1.6 Način povezivanja solarnih ćelije.....	18
1.7 Uticaj temperature i solarne iradijacije na solarni panel	20
1.8 Uticaj sjenke na solarnu ćeliju.....	21
1.9 Faktori koji ograničavaju efikasnost solarne ćelije	23
1.9.1 IC gubici	23
1.9.2 Gubitak viška energije na visokoenergetske fotone	24
1.9.3 Gubici usljed faktora napona	25
1.9.4 Gubici usljed faktora popunjenosti	25
Glava 2	26
MPPT ALGORITMI	26
2.1 Perturb and Observe algoritam	29
2.2 Incremental Conductance algoritam	32
2.3 Metod konstantnog napona	34
2.4 Metod konstantne struje	35
2.5 Current sweep metoda	35
Glava 3	38
PRIJEDLOG ALGORITAMA ZA PRAĆENJE TAČKE MAKSIMALNE SNAGE	38

3.1 Prijedlog algoritma za praćenje tačke maksimalne snage u slučaju nagle promjene solarne iradijacije	38
3.2 Prijedlog algoritma za praćenje tačke maksimalne snage pri pojavi djelimične zasjenčenosti solarnog panel	41
3.2.1 Metod za detekciju pojave djelimičnog zasjenčenja	42
3.2.2 Mehanizam za traženje tačke maksimalne snage	45
3.2.3 Smanjenje oscilacija oko tačke maksimalne snage	47
Glava 4	49
REZULTATI SIMULACIJA	49
4.1 Komparativna analiza predloženog algoritma u slučaju nagle promjene solarne iradijacije sa postojećim algoritmima	49
4.2 Komparativna analiza predloženog algoritma u slučaju djelimičnog zasjenčenja PV panela sa postojećim algoritmima	54
ZAKLJUČAK	60
LITERATURA	61
PRILOG	67

SPISAK SKRAĆENICA

AM	<i>Air Mass</i>
DMPPT	<i>Distributed Maximum Power Point Tracking</i>
IC	<i>Incremental Conductance</i>
modIC	<i>Modified Incremental Conductance</i>
modP&O	<i>Modified Perturb and Observe</i>
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
MPP	<i>Maximum Power Point</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
PI	<i>Proportional Integral</i>
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
PV	<i>Photovoltaic</i>
PS-P&O	<i>Partial Shading Perturb and Observe</i>
P&O	<i>Perturb and Observe</i>

SPISAK SLIKA

Slika 1.	Prikaz korištenih izvora za proizvodnju električne energije u 2016. godini ..	2
Slika 1.1.	Becquerel-ov eksperiment	4
Slika 1.2.	Uzorak korišten za istraživanje mogućnosti stvaranja fotonaponskog efekta u selenu	5
Slika 1.3.	Fritts-ov eksperiment iz 1883. godine	6
Slika 1.4.	Grondahl-Geiger-ova bakar-kupro-oksidi fotonaponske ćelije (1927. godina)	6
Slika 1.5.	Struktura najefikasnije fotonaponske ćelije razvijene tokom 1930-ih.....	7
Slika 1.6.	Grafički prikaz silicijuma	8
Slika 1.7.	Grafički prikaz kombinacije donorskog atoma i akceptorskog atoma sa silicijumom	8
Slika 1.8.	P-N spoj	9
Slika 1.9.	Dioda.....	9
Slika 1.10.	Ilustracija fotonaponskog efekta	11
Slika 1.11.	Osnovni model solarne ćelije.....	11
Slika 1.12.	Važni parametri za solarnu ćeliju	12
Slika 1.13.	U-I karakteristika solarne ćelije	12
Slika 1.14.	Dvije redno vezane solarne ćelije	13
Slika 1.15.	Šema solarne ćelije sa dodatnom paralelnom otpornošću	14
Slika 1.16.	U-I karakteristika solarne ćelije sa dodatnim paralelnim otporom.....	14
Slika 1.17.	Šema solarne ćelije sa dodatnom rednom otpornošću	15
Slika 1.18.	U-I karakteristika solarne ćelije sa dodatnim rednim otporom.....	15
Slika 1.19.	Kompletni model solarne ćelije.....	16
Slika 1.20.	U-I karakteristika solarne ćelije sa dodatnim paralelnim i rednim otporom .	16
Slika 1.21.	Grafički prikaz snage fotonaponske ćelije	17
Slika 1.22.	Načini povezivanja solarnih ćelija u module	18
Slika 1.23.	Ćelija, modul, panel i njihova veza.....	19
Slika 1.24.	Načini vezivanja redno-paralelnih kombinacija	19
Slika 1.25.	Zavisnost U-I karakteristike od promjene iradijacije (a), odnosno, temperature (b).....	21
Slika 1.26.	Ponašanje ćelije prilikom nailaska sjenke.....	22
Slika 1.27.	Način rješavanja problema stvorenog nailaskom sjenke	22
Slika 1.28.	Dodavanje izolacionih dioda i Zener diode radi zaštite.....	23
Slika 1.29.	Korisna energija na primjeru silicijuma.....	24
Slika 2.1.	Uticaj promjene solarne iradijacije i temperature na poziciju radne tačke...	26
Slika 2.2.	Šematski prikaz fotonaponskog sistema	27
Slika 2.3.	Šema boost pretvarača	28
Slika 2.4.	Blok dijagram P&O algoritma	29
Slika 2.5.	Oscilacije radne tačke oko tačke maksimalne snage	30

Slika 2.6.	Primjeri klizanja radne tačke	32
Slika 2.7.	U-I karakteristika sa definisanim IC algoritmom	32
Slika 2.8.	Šematski prikaz IC algoritma.....	34
Slika 2.9.	Šematski prikaz Current sweep metode	36
Slika 3.1.	Blok dijagram predloženog algoritma	40
Slika 3.2.	P-V i V-I karakteristike pri nagloj promjeni solarne iradijacije i pri djelimičnoj zasjenčenosti	42
Slika 3.3.	Blok dijagram za detekciju djelimičnog zasjenčenja	45
Slika 3.4.	Šema mehanizma za traženje tačke maksimalne snage	47
Slika 4.1.	Izlazna snaga analiziranih metoda	50
Slika 4.2.	Izlazna snaga usljed naglo povećanja solarne iradijacije.....	51
Slika 4.3.	Izlazna snaga usljed naglog smanjenja solarne iradijacije.....	51
Slika 4.4.	Izlazna snaga u stacionarnim stanjima.....	52
Slika 4.5.	Grafički prikaz promjenljivog koraka predloženog algoritma.....	53
Slika 4.6.	Izlazna snaga prilikom konstantne promjene solarnog ozračenja.....	54
Slika 4.7.	Grafički prikaz predloženog algoritma u drugom eksperimentu	54
Slika 4.8.	Redna veza PV modula u slučaju: a) uniformne solarne iradijacije; b) djelimičnog zasjenčenja	55
Slika 4.9.	Simulink šema korištena u analizi	56
Slika 4.10.	Izlazna snaga u prvom eksperimentu	57
Slika 4.11.	Napon u prvom eksperimentu	57
Slika 4.12.	Izlazna snaga u stacionarnom stanju.....	58
Slika 4.13.	Izlazna snaga u drugom eksperimentu	58

SPISAK TABELA

Tabela 2.1.	Prikaz P&O algoritma	30
Tabela 2.2.	Prikaz algoritama.....	37
Tabela 4.1.	Kyocera KC200GT solarni panel [69]	50
Tabela 4.2.	Efikasnost prikazanih algoritama	50
Tabela 4.3.	Efikasnost algoritama u drugom eksperimentu	53
Tabela 4.4.	Efikasnost algoritama u prvom eksperimentu	57
Tabela 4.5.	Efikasnost algoritama u stacionarnom stanju	58
Tabela 4.6.	Efikasnost algoritama u drugom eksperimentu	59

UVOD

Sa porastom broja stanovnika, razvojem industrije, tehnologije, povećanjem potrošačkog konzuma dolazi i do povećanja potrebe za električnom energijom. Do XXI vijeka glavni izvori energije su bili ugalj, nafta, gas, nuklearna goriva i oni se jednim imenom mogu nazvati konvencionalni izvori energije. Činjenica da konvencionalni izvori energije su iscrpni i ograničeni, i uzimajući u obzir da su potrebe za energijom iz dana u dan veće, može se zaključiti da se ubrzava njihova eksploatacija, a time dolazi i do smanjivanja njihovih resursa. Nedostatak zaliha prouzrokuje povećanje tržišne cijene samih izvora, što pored energetske, može dovesti i do ekonomske krize.

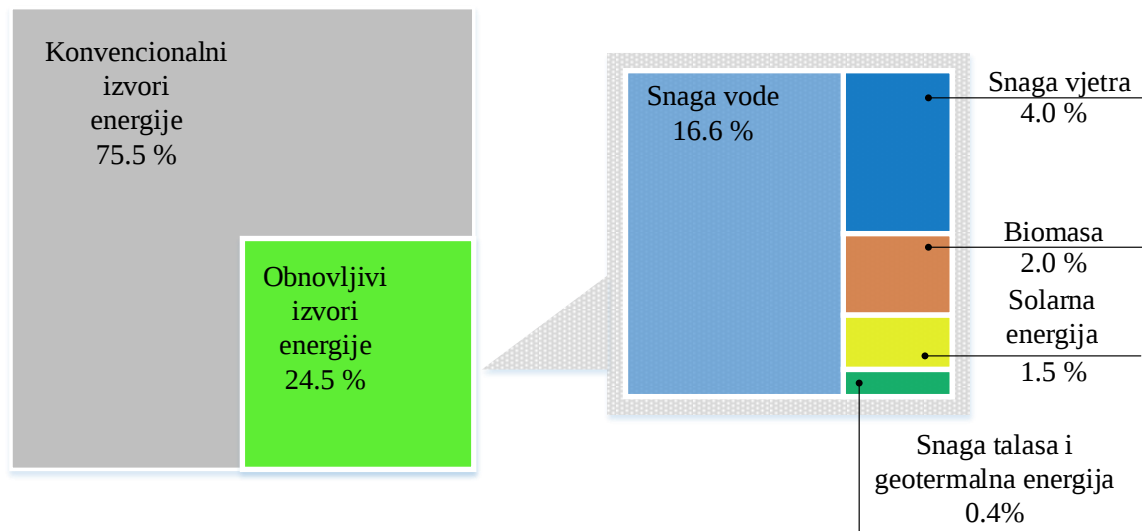
Pored navedenih činjenica, konvencionalni izvori imaju uticaja i na životnu okolinu. Njihovom upotrebom, odnosno korištenjem za dobijanje električne energije, uzrokuje se slanje štetnih gasova u atmosferu (SO_2 , NO_2 , NO_3 ,...), a naročito ugljen dioksida (CO_2), koji najvećim dijelom doprinosi globalnom zagrijavanju i klimatskim promjenama, [1]. Shodno tome, javlja se potreba za novim izvorima energije koji će zadovoljiti buduće zahtjeve i smanjiti zavisnost od konvencionalnih izvora. Kao takvi, nameću se obnovljivi izvori energije u čiji red spadaju: solarna energija, biomasa, snaga vode, snaga talasa, snaga vjetra.

Za obnovljive izvore energije se ne može reći da su ekvivalentni međusobno. Energija vjetra se može tumačiti kao jedan od oblika solarne energije. Vjetar se formira zahvaljujući zagrijavanju i hlađenju atmosfere, koja uzrokuju podizanje i spustanje nivoa vazduha kao i njegovo preplitanje. Na ovaj način dolazi do stvaranja struja vjetra. Biomasa se ne može posmatrati kao prava zamjena za fosilna goriva. Porast cijena prehrambenih proizvoda, kao i porast cijene nafte uzrokuju i porast troškova upotrebe ovog izvora energije, [2].

Na kraju 2016. godine 24,5% električne energije je dobijeno iz obnovljivih izvora, od toga 1,5% zahvaljujući solarnim elektranama (slika 1), [3]. Na osnovu svog potencijala i uzimajući u obzir opadanje cijena izvedbe solarnih sistema [4], [5], očekuje se da dobijanje električne energije konverzijom solarne uskoro preuzme primat na samom tržištu električne energije i da će pokazati smjer u kojem energetika treba da se razvija, [6].

Efikasnost same solarne ćelije iznosi do 22,5 % [7], i ne može biti veća zbog gubitaka unutar same ćelije. Da bi solarni panel dostigao maksimalni stepen efikasnosti, potrebno je radnu tačku solarnog panela dovesti u poziciju maksimalne snage promjenom vrijednosti faktora popunjenosti konvertora, na koji je solarni panel povezan. Metode, koje se koriste za prepodešavanje faktora popunjenosti čopera, poznate su pod nazivom algoritmi za praćenje maksimalne snage (Maximum Power Point Tracking - MPPT). Međutim, konvencionalni algoritmi, koji su najčešće u upotrebi, pokazuju mane u pogledu brzine konvergencije i oscilacija radne tačke oko tačke maksimalne snage. Navedeni nedostaci su najbolje vidljivi u slučajevima nagle promjene solarne iradijacije i djelimične

zasjenčenosti solarnog panela. U prvom slučaju, pored navedenih nedostataka javlja se i problem „klizanja“ radne tačke (detaljnije objašnjeno u radu), dok u slučaju djelimične zasjenčenosti na P-V karakteristici



Slika 1. *Prikaz korištenih izvora za proizvodnju električne energije u 2016. godini*
solarnog panela dolazi do pojave više lokalnih maksimuma, i konvencionalni algoritmi nijesu u mogućnosti da odrede koji je globalni.

U ovom radu su predložena dva algoritma koja omogućavaju radnoj tački da prati tačku maksimalne snage. Prvi algoritam sadrži promjenljiv korak koji povećava brzinu konvergencije i smanjuje oscilacije radne tačke oko tačke maksimalne snage. U slučaju pojave više maksimuma, drugi algoritam na efikasan način određuje koji je maksimum globalni. Sastoji se iz tri dijela koja služe za provjeru da li je došlo do djelimične zasjenčenosti, pronalazak globalnog maksimuma i redukciju oscilacija oko njega.

Magistrski rad se sastoji iz uvoda, četiri poglavlja, zaključka, popisa korištene literature i priloga. U prvoj glavi je dat kratak prikaz istorije nastanka solarne ćelije, strukture solarne ćelije i modelovanje iste. Takođe, definisan je princip nastanka p-n spoja, na kojem je bazirana poluprovodnička dioda, osnova solarne ćelije. Pored navedenog, moguće je pronaći informacije kako različiti spoljni faktori (solarna iradijacija i temperatura) utiču na efikasnost ćelije. Opisano je kako djelimična zasjenčenost utiče na PV sistem i na koji način bypass diode štite sistem od ove pojave. Na kraju glave je dat prikaz unutrašnjih faktora ćelije koji utiču na smanjenje njenog stepena iskorištenja. U narednoj glavi je dat prikaz postojećih, konvencionalnih algoritama za praćenje tačke maksimalne snage. Opisan je princip njihovog rada, ukazano je na nedostatke i izvršena je njihova uporedna analiza.

U trećoj glavi su navedeni i opisani predloženi algoritmi. Predloženi algoritmi efikasno rješavaju dva najveća problema solarnih panela: pojava nagle promjene solarne iradijacije i pojava djelimične zasjenčenosti solarnog panela. Četvrta glava prikazuje komparativnu analizu predloženih i postojećih algoritama. Na kraju rada je su dati

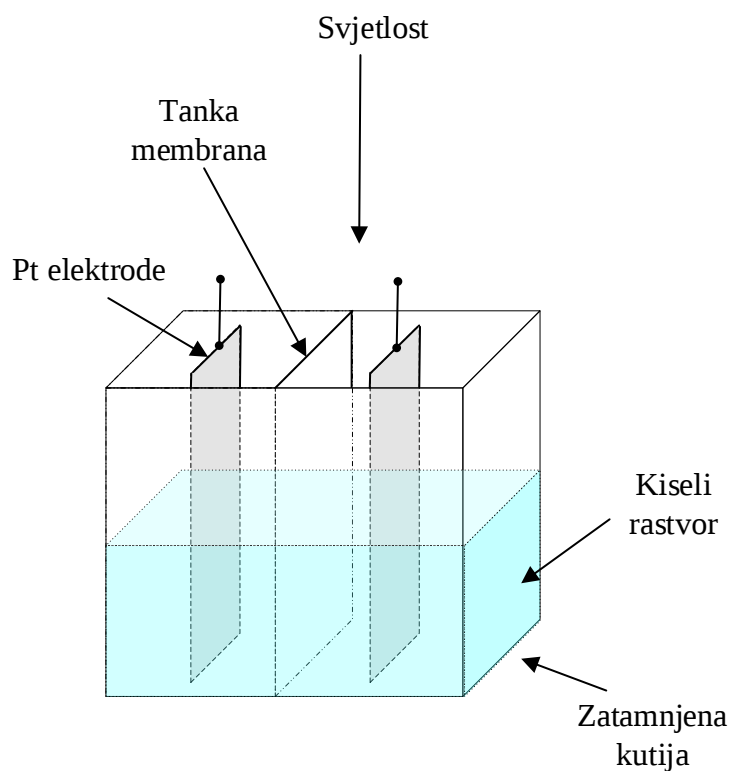
zaključak, popis korištene literature, dok je u dodatku priložen programski kod realizovan u Matlab-u, pomoću kojeg su izvršene prezentovane simulacije.

Glava 1.

MODELOVANJE I ANALIZA SOLARNE ČELIJE

1.1 Istorija nastanka solarne ćelije

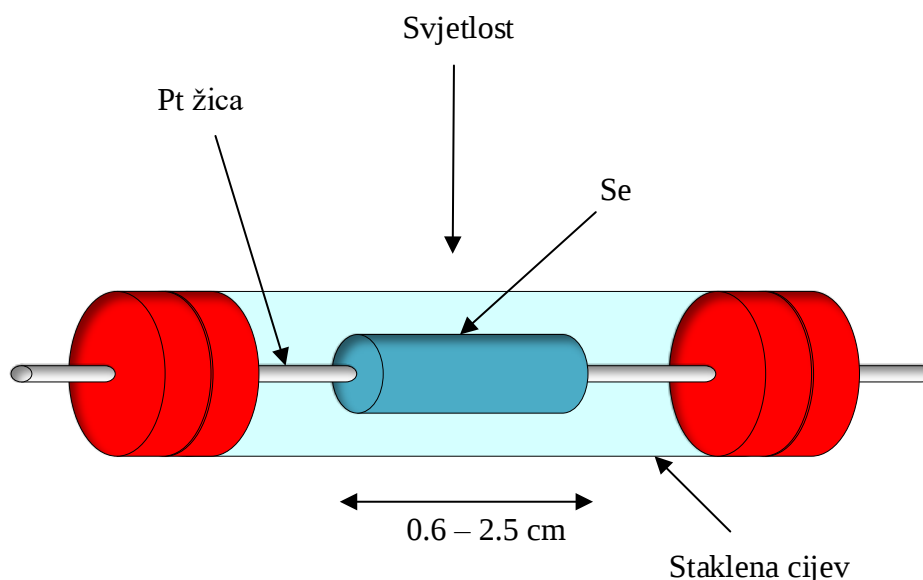
Otkrivanje fotonaponskog efekta pripisuje se Edmond Becquerel-u (1839. godine). On je u svom radu, pod nazivom „Sur les effets electriques produit sous l'influence des rayons solaires“¹, fotonaponski efekat opisao kao proizvodnju električne struje kada se čvrste elektrode (npr. ploče platine ili zlata) urone u rastvor elektrolita (kiseli ili neutralni rastvor) i pri tom se izlože Sunčevom zračenju. Primijetio je da svjetlosni zraci indukuju struju. Najbolji rezultati su dobijeni sa plavim i ultraljubičastim zracima, kada su elektrode obložene sa materijalom koji je osjetljiv na svjetlost, kao na primjer $AgCl$ ili $AgBr$.



Slika 1.1 *Becquerel-ov eksperiment*

¹ „Svjetlost, njeno porijeklo i njeni efekti“

Sljedeći doprinos u detaljnijem objašnjavanju fotonaponskog efekta postignut je uz pomoć eksperimenta koji se sastojao od staklene tube u čijoj unutrašnjosti je postavljen selen. U toku istraživanja fotonaponskog efekta, Adams i Day su zapazili određene anomalije za koje su mislili da se mogu objasniti stvaranjem unutrašnjeg napona. Istraživanje su vršili na osnovu uzoraka, čiji primjer je prikazan na slici 1.2. Zagrijani platinasti kontakti su postavljeni na krajeve staklene tube u kojoj se nalazi selen. Cilj eksperimenta je bio da se provjeri da li je moguće stvaranje struje kroz selen djelovanjem svjetlosti.

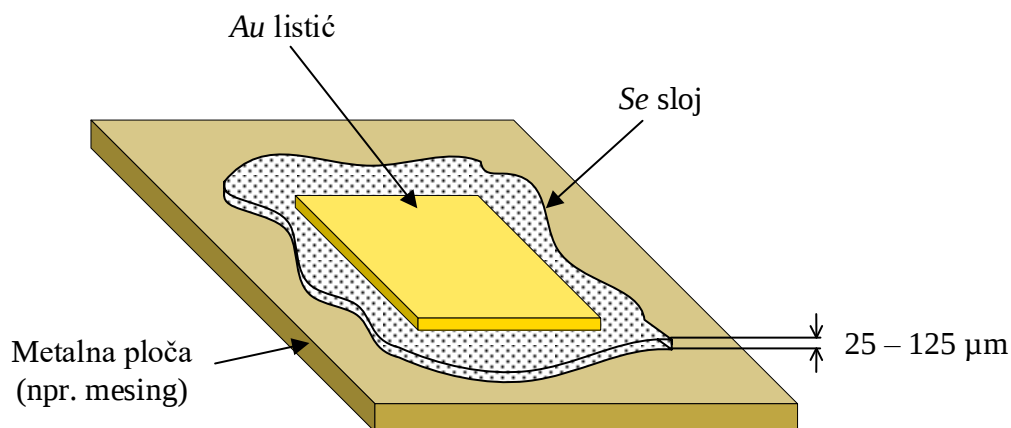


Slika 1.2 *Uzorak korišten za istraživanje mogućnosti stvaranja fotonaponskog efekta u selenu*

Rezultat je bio pozitivan. Ovo je bila prva demonstracija fotonaponskog efekta na čvrstim tijelima. Adams-u i Day-u se pripisuje otkriće mogućnosti stvaranja struje pomoću svjetlosti koja je indukovana u toku kristalizacije spoljašnjih slojeva selena. Nekoliko decenija je trebalo da prođe prije nego je došlo do razvoja fizike na nivo koji bi mogao da da bolji uvid u unutrašnjost ovog procesa. Adams i Day su 1877. godine napravili uređaj za mjerenje svjetlosti, koji se bazirao na opisanom principu.

Sljedeći značajni korak desio se šest godina kasnije (1883. godine). Nakon kompresovanja otopljenog selena između ploča napravljenih od dva različita materijala, Fritts je na tako izloženu površinu selena postavio tanak sloj zlata i na taj način je ostvario potencijalnu barijeru na kontaktu metal – poluprovodnik. Stvorena je prva solarna ćelija čija je površina bila 30 cm^2 . Efikasnost ove solarne ćelije je bila manja od 1%. On je, takođe, prvi prepoznao potencijal fotonaponskih ćelija. Uvidio je da se uređaji mogu proizvesti po niskoj cijeni i istakao da ukoliko struja nije potrebna odmah, ona se može čuvati gdje je proizvedena, u akumulatorima, može da se prenosi na daljinu, gdje takođe može da se koristi ili čuva.

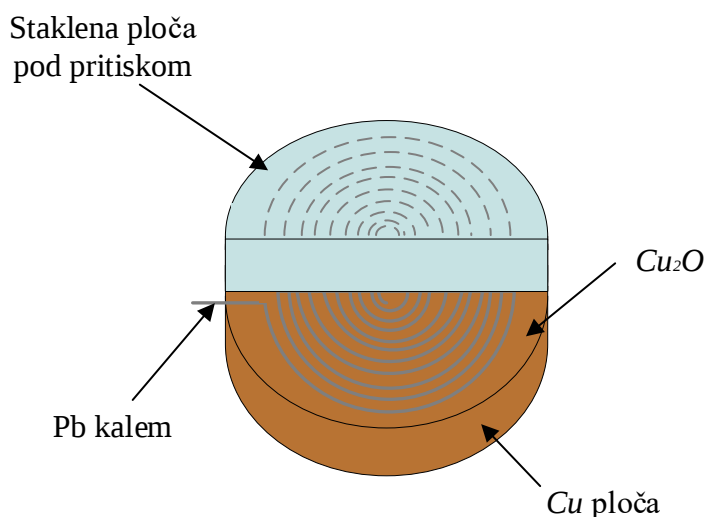
Moralo je proći 50 godina da bi se desio novi značajni događaj koji je doprinio razvitku fotonaponske ćelije kakva nam je poznata danas. U međuvremenu, Albert Einstein



Slika 1.3 *Fritts-ov eksperiment iz 1883. godine*

je 1904. godine objasnio princip fotonaponskog efekta, za koji je dobio Nobelovu nagradu 1921. godine, i na taj način doprinio teorijskom razvoju solarnih ćelija. Dok je proučavao djelovanje fotonaponskog efekta na slojeve kupro-oksida² dobijenog od bakra, Grondahl je otkrio mogućnost ostvarivanja pojačanja na spoju bakar – kupro-oxid. To je dovelo do velikog razvoja pojačavača, praćenog razvojem fotonaponske ćelije. Grondahl opisuje razvoj i bakar – kupro-oxid pojačavača i bakar – kupro-oxid fotonaponske ćelije.

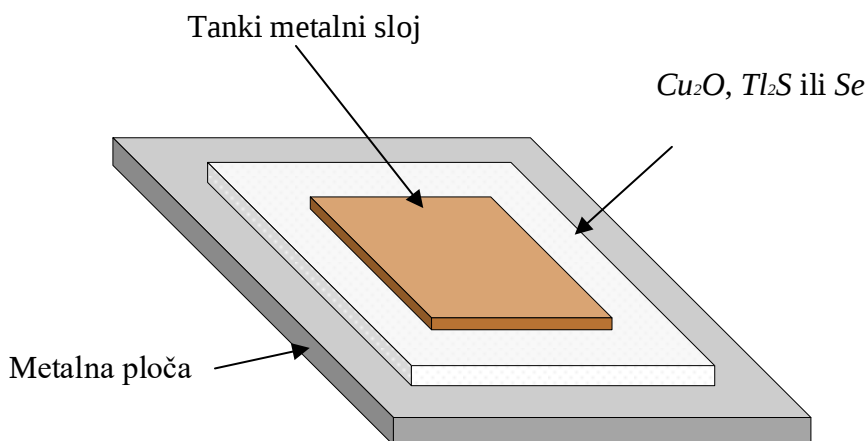
Na slici ispod prikazana je veoma jednostavna struktura ranijih ćelija baziranih na bakar – kupro-oxid spoju. Ovakav razvoj događaja doprinio je razvoju u ovoj oblasti i objavljivanju brojnih publikacija. Grondahl dokumentuje 38 publikacija koje se bave bakar – kupro-oxid fotonaponskim ćelijama u periodu od 1930-32.



Slika 1.4 *Grondahl-Geiger-ova bakar-kupro-oxid fotonaponska ćelija (1927. godina)*

² Kupro-oxid (bakar(I) oksid; Cu_2O) je oksidni poluprovodnik koji se primjenjuje kao anodni materijal u obliku tankog filma u litijumskim baterijama i solarnim ćelijama. Jedan je od glavnih oksida bakra i crvene je boje.

Ove aktivnosti su probudile interesovanje za selen kao materijal za fotonaponske ćelije. Posebno poboljšanje fotonaponskoj ćeliji napravljenom od selen donio je Bergmann 1931. godine. Ovo poboljšanje se pokazalo superiornije u odnosu na uređaj baziran na bakar – kupro- oksidu i preuzelo je primat na tržištu. Tl_2S ćelija sličnih karakteristika 1939. godine je izumljena od strane Nix-a. Struktura ove ćelije napravljene od najefikasnijeg selen i bakar – kupro-oksida prikazana je na sljedećoj slici, [8]–[12].

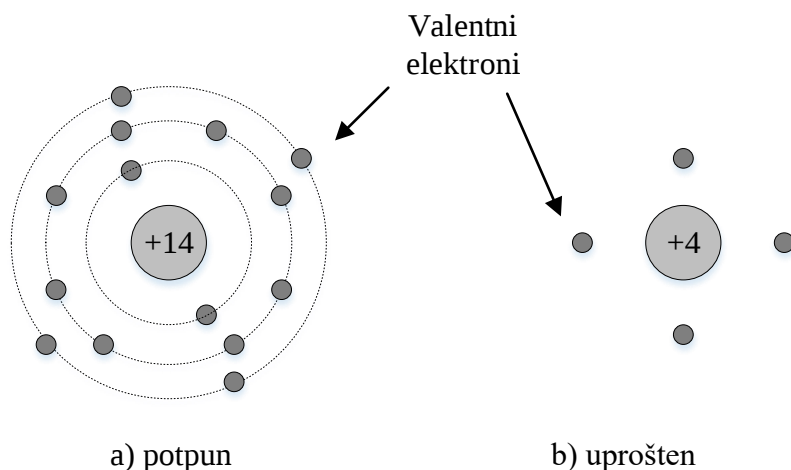


Slika 1.5 *Struktura najefikasnije fotonaponske ćelije razvijene tokom 1930-ih*

1.2 Poluprovodnička dioda (PN-spoj)

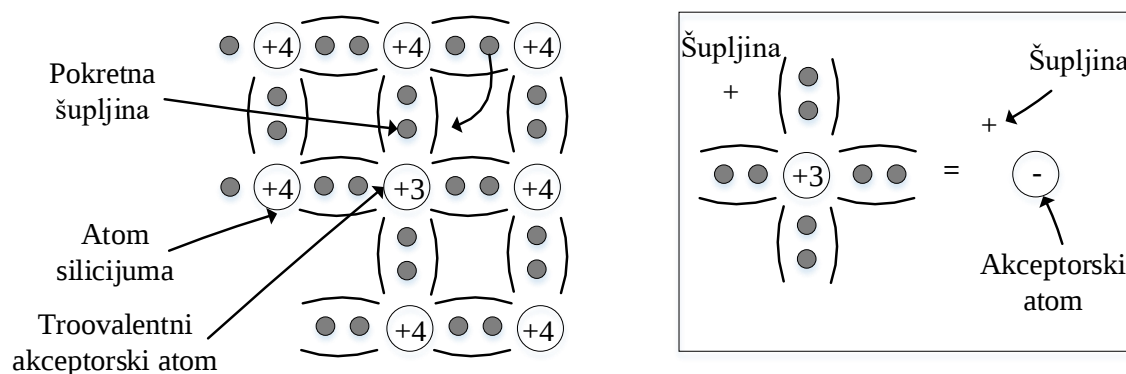
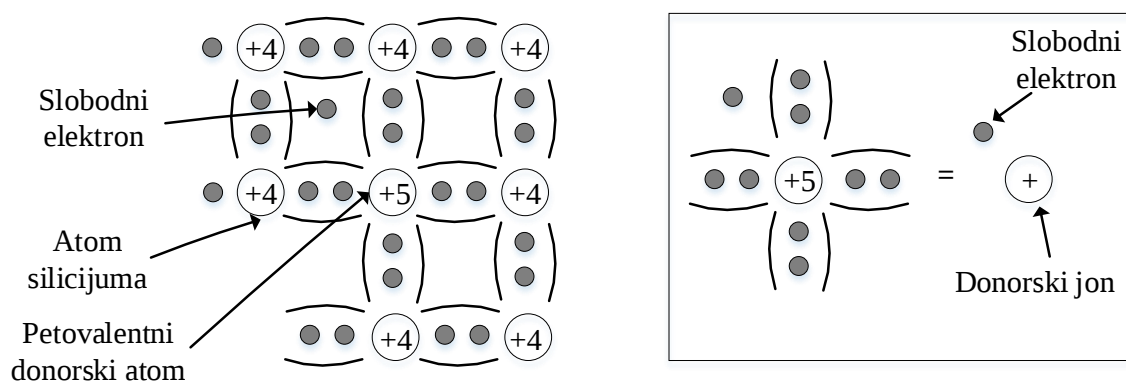
Za samo modelovanje fotonaponske (solarne) ćelije, koje će u nekom od narednih potpoglavlja biti prikazano, potrebno je definisati poluprovodničku diodu. Sunčeva svjetlost je elektromagnetni zrak od kojeg su za solarnu ćeliju u interesu samo fotoni koji ga sačinjavaju. Kada foton, dovoljne energije da razbije kovalentnu vezu koju su stvorila dva valentna elektrona susjednih atoma, dopiye do solarne ćelije, on odvaja elektron (negativno naelektrisanje) od jezgra atoma i na njegovom mjestu ostavlja tzv. šupljinu (pozitivno naelektrisanje). Šupljinu, koja je nastala odvajanjem elektrona od jezgra atoma, moguće je popuniti elektronom susjednog atoma, pri čemu se na njegovom mjestu stvara nova šupljina koju može popuniti neki sljedeći elektron. Ovaj proces se naziva proces rekombinacije. Ovakvo pomjeranje elektrona dovodi do protoka struje.

Problem koji se može javiti jeste da se proces rekombinacije izvrši sa istim elektronom koji je tu šupljinu stvorio. U cilju zaobilazjenja navedene situacije potrebno je napraviti P-N spoj. P-N spoj je najlakše objasniti na osnovu sljedećeg primjera. Kao primjer je moguće posmatrati silicijum koji se nalazi u IV grupi periodnog sistema. U jezgru silicijuma se nalazi 14 protona, što znači da se u njegovima orbitama prostire 14 elektrona (slika 1.6. a)). Silicijum je grafički jednostavnije prikazati kao što je prikazano na slici 1.6. b), gdje su prikazana četiri valentna elektrona i četiri, njima odgovarajuća, protona koja se nalaze u jezgru atoma.



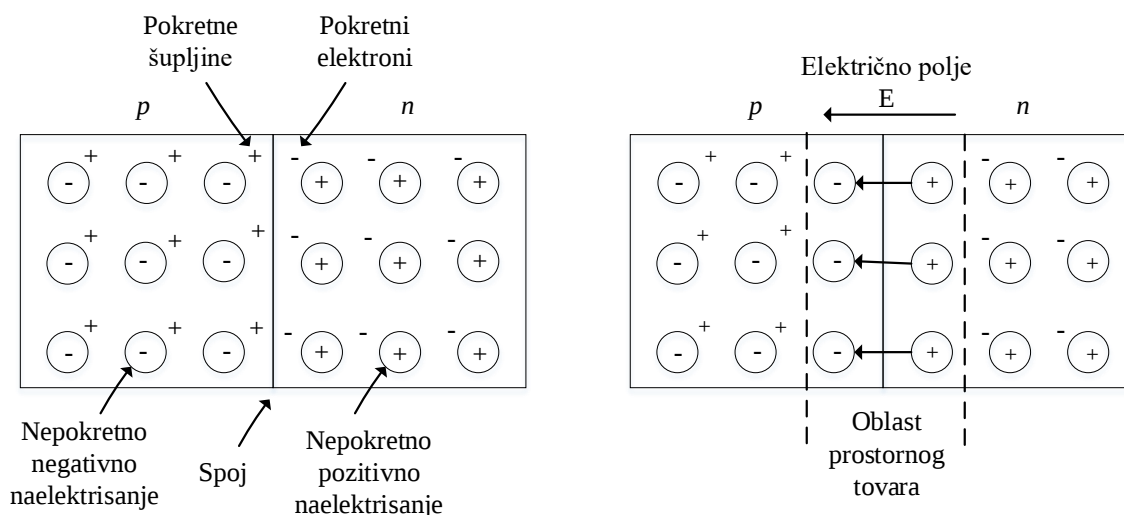
Slika 1.6 *Grafički prikaz silicijuma*

Da bi se formirao P-N spoj potrebno je na jednoj strani dodati element iz V grupe periodnog sistema koji sadrži pet valentnih elektrona, npr. fosfor. Kada petovalentni element dođe u kontakt sa silicijumom, doći će do stvaranja četiri kovalentne veze, dok će jedan valentni elektron petovalentnog elementa ostati da kruži oko jezgra. Fosfor se u ovom



Slika 1.7 *Grafički prikaz kombinacije donorskog atoma i akceptorskog atoma sa silicijumom*

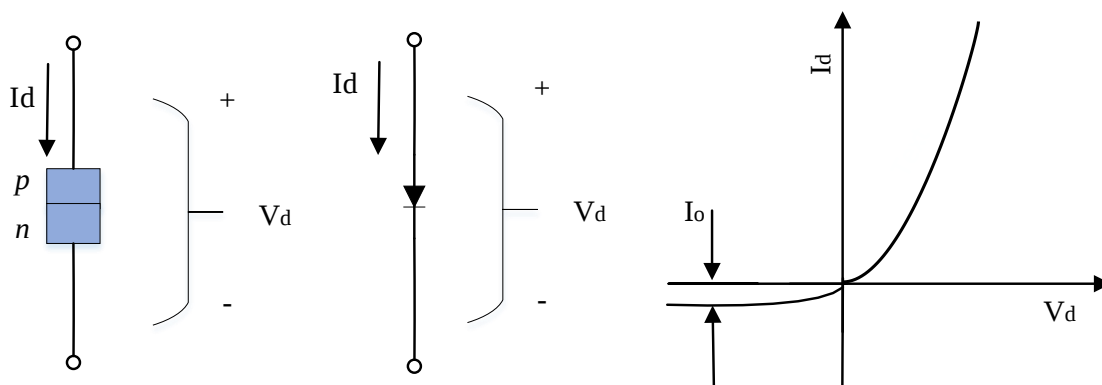
slučaju naziva „donor“, i na ovaj način se stvara „N materijal“. Na drugoj strani je potrebno dodati trovalentni element, npr. bor. Prilikom stvaranja kovalentnih veza, atom bora neće imati dovoljan broj valentnih elektrona i na jednom mjestu će se stvoriti šupljina. Na ovaj način se stvara „P materijal“. Spajanjem P i N materijala nastaje P-N spoj. Elektroni iz N dijela mogu da popune stvorene šupljine u P dijelu. Kako je spajanjem bora i silicijuma nastala šupljina, atom bora se naziva „akceptor“, jer na tom mjestu šupljina treba da primi elektron. Ovi procesi su prikazani na slici 2.7.



Slika 1.8 P-N spoj

Prelaskom elektrona iz N dijela u P dio dolazi do stvaranja struje u suprotnom smjeru od kretanja elektrona. Ovaj način rada odgovara principu funkcionisanja poluprovodničke diode. Dioda se predstavlja sa trouglom čija orijentacija pokazuje u kojem smjeru protiče struja.

Ukoliko se propusti struja u suprotnom smjeru, proteći će inverzna struja diode koja je veoma malog reda i poznata je pod imenom struja curenja, [13]–[16].



Slika 1.9 Dioda

Veza između spoljašnjeg napona U i struje I_d kroz PN – spoj, tzv. UI karakteristika diode, može se prikazati jednačinom:

$$I_d = I_0 \left[e^{\frac{eV}{AkT}} - 1 \right], \quad (1.1)$$

gdje je:

I_d – struja diode [A]

I_0 – struja zasićenja [A]

e – elementarno naelektrisanje [= $1.602 \cdot 10^{-19}$ C]

V – električni napon [V]

A – faktor kvaliteta diode

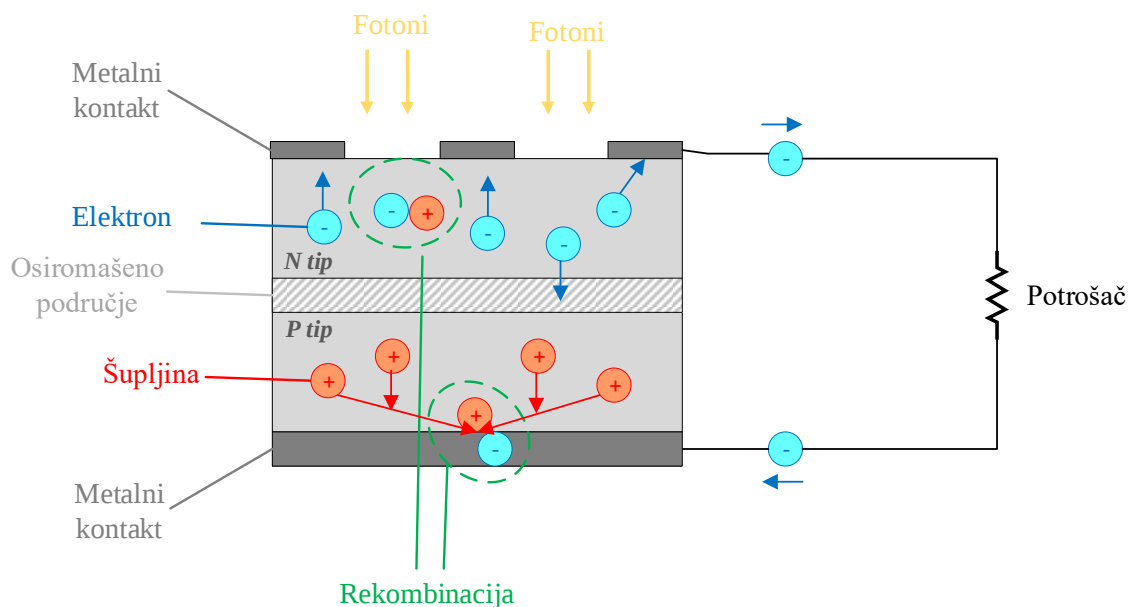
k – Bolcmanova konstanta [= $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K]

T – termodinamička temperatura [K]

1.3 Struktura solarne ćelije

Solarna ćelija najčešće predstavlja P-N spoj, koji pomoću fotonaponskog efekta Sunčevo zračenje pretvara u električnu energiju. Svjetlost koja dopire do solarne ćelije stvara struju i napon koji proizvode električnu energiju. Ovaj proces prvo zahtijeva da je materijal, od koga je napravljena solarna ćelija, takav da apsorbovanjem svjetlosti postavlja elektron na viši energetske nivo, i drugo, da elektron koji je prešao na viši energetske nivo pređe iz solarne ćelije u spoljašnji dio. Tada elektron rasipa energiju u okolni prostor i vraća se u solarnu ćeliju. Mnoštvo materijala i procesa može potencijalno da ispunjava uslove za fotonaponsku konverziju energije, ali u praksi se najčešće koriste poluprovodnički materijali P-N spoja.

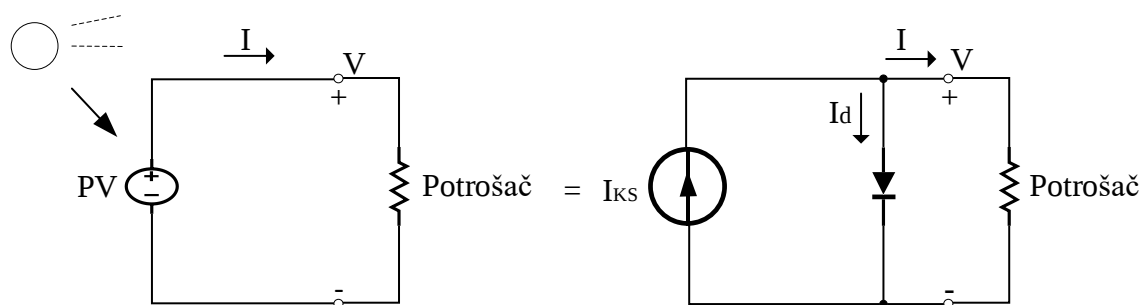
Na slici 1.10. je prikaz presjek solarne ćelije. Današnje solarne ćelije su oko četiri puta tanje od vlasi kose, to jest njihova debljina je oko 200 mikrona. Sunčeva svjetlost (fotoni) pada na solarnu ćeliju, ulazi unutar nje i pobuđuje elektrone. Tako pobuđeni elektroni se kreću unutar ćelije i stvaraju električno polje, koje odvaja naelektrisanja i stvara napon. Dolazi do razmjene naelektrisanja stvarajući potencijalnu razliku između dva terminala. Ukoliko su terminali povezani sa spoljašnjim potrošačem doći će do protoka struje kroz takvo kolo, [9], [17], [18].



Slika 1.10 Ilustracija fotonaponskog efekta

1.4 Modelovanje solarne ćelije

Solarna ćelija najjednostavnije se može ekvivalentirati diodom koja je paralelno povezana sa strujnim izvorom. Strujni izvor daje struju koja je proporcionalna solarnom fluksu kojem je ona izložena.

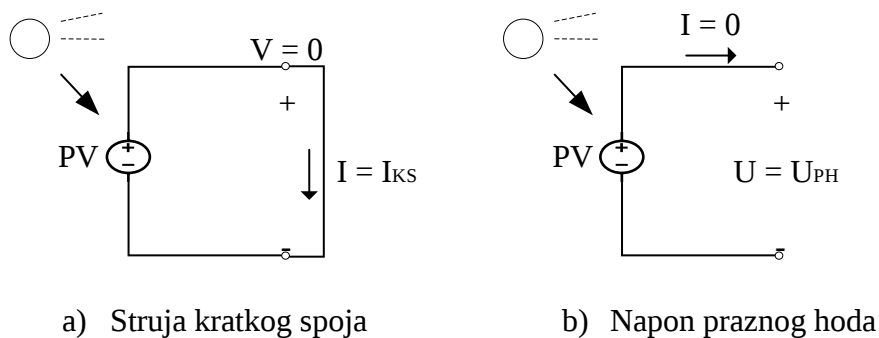


Slika 1.11 Osnovni model solarne ćelije

Postoje dva slučaja koja su od praktičnog interesa:

- 1) Kada je kraj kola kratko spojen. U tom slučaju se dobija struja kratkog spoja I_{KS} koja odgovara vrijednosti struje koju predaje strujni izvor kolu.
- 2) Kada je kraj kola otvoren. Na ovaj način se dobija napon u praznom hodu, U_{PH} .

Struja kratkog spoja I_{KS} i napon u praznom hodu U_{PH} predstavljaju maksimalne vrijednosti za struju, odnosno napon, solarne ćelije.



Slika 1.12 Važni parametri za solarnu ćeliju

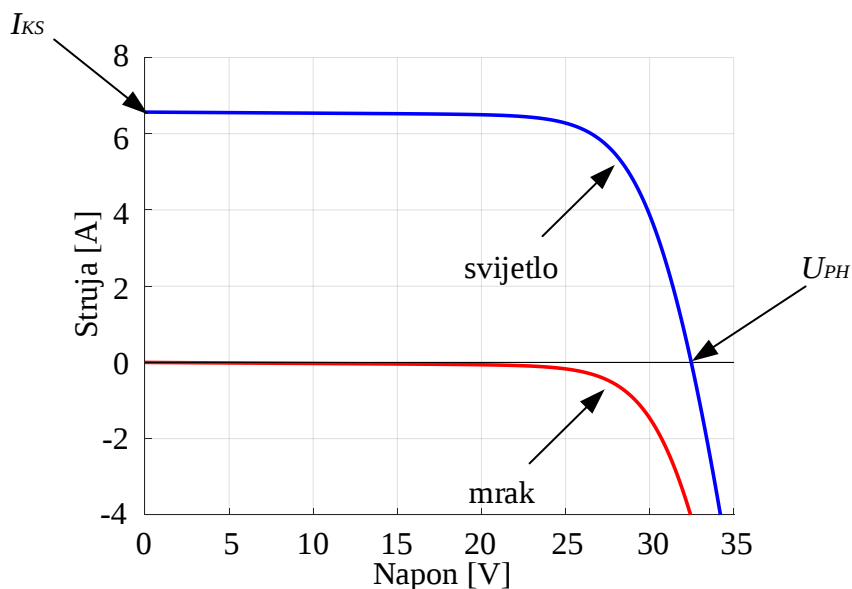
Na osnovu slike 1.11. je moguće napisati relacije za određivanje napona i struje:

$$I = I_{KS} - I_d, \quad (1.2)$$

gdje je struja I_d predstavlja struju koja prolazi kroz diodu. Uvrštavanjem izraza za struju koja protiče kroz diode, struja kroz potrošač dobija izraz:

$$I = I_{KS} - I_0 \left[e^{\frac{eU_d}{AKT}} - 1 \right]. \quad (1.3)$$

Drugom dijelu jednačine, koji opisuje struju diode, prethodi negativan predznak. Negativni predznak dopriniće tome da se kriva, koja opisuje zavisnost napona i struje kroz diodu, zarotira u odnosu na x osu. Takva kriva dodaje se pravoj (jer je I_{KS} konstantno) i dobija se rezultujuća kriva koja prikazuje struju kroz potrošač u zavisnosti od napona potrošača (prikazana na slici 1.13. pod imenom „svijetlo“). Takođe, na slici 1.13. prikazana je veza između napona i struje solarne ćelije u slučaju kada nema osvijetljenja („mrak“). U slučaju, kad nema osvijetljenja, struja I_{KS} je jednaka nuli.



Slika 1.13 U-I karakteristika solarne ćelije

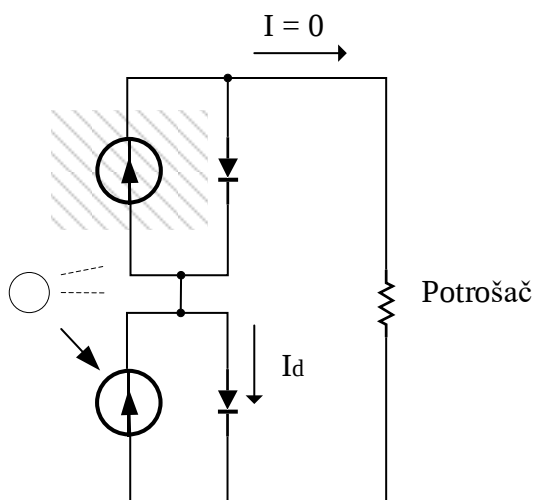
Struja kratkog spoja, odnosno struja koju daje strujni izvor je direktno proporcionalna količini solarnog ozračenja koje padne na solarnu ćeliju.

Veoma česti su slučajevi kada je potrebno detaljnije ekvivalentirati kolo nego kao što je prikazano na slici 1.11. Na primjer, ukoliko postoje dvije redno vezane ćelije (slika 1.14) od kojih je jedna ćelija osvijetljena, a druga prekrivena sjenkom. Na ćeliju koja je prekrivena sjenkom ne dopiru solarni zraci, pa samim tim kroz nju ne protiče struja, odnosno, struja koju predaje strujni izvor je jednaka nuli. Takođe, dioda, koja se nalazi u grani paralelnoj sa granom strujnog izvora, postavljena je u smjeru da ne dozvoljava prolazak struje kroz nju od druge redno vezane solarne ćelije (može doći samo do protoka struje curenja). Iz ovog primjera se vidi da ako je makar jedna ćelija, u rednoj vezi više ćelija, gdje su solarne ćelije modelovane kao što je prikazano na slici 2.11., obuhvaćena sjenkom, da će struja potrošača biti jednaka nuli. Solarne ćelije su osjetljive na prekrivanje sjenkom, zato je potreban kompleksniji model solarne ćelije.

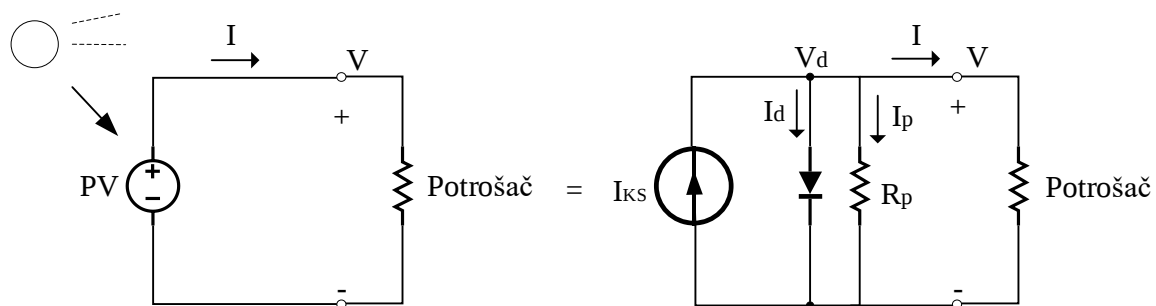
Na slici 1.15. prikazana je šema gdje je paralelno diodi dodata paralelna otpornost R_p . Paralelnim otporom su predstavljeni mikro defekti i nečistoće unutar solarne ćelije, koji zavise od osobina ćelije. Sada se struja, koju daje strujni izvor I_{KS} , dijeli na struju kroz diodu, kroz paralelnu otpornost i kroz potrošač:

$$I = (I_{KS} - I_d) - \frac{U}{R_p}. \quad (1.4)$$

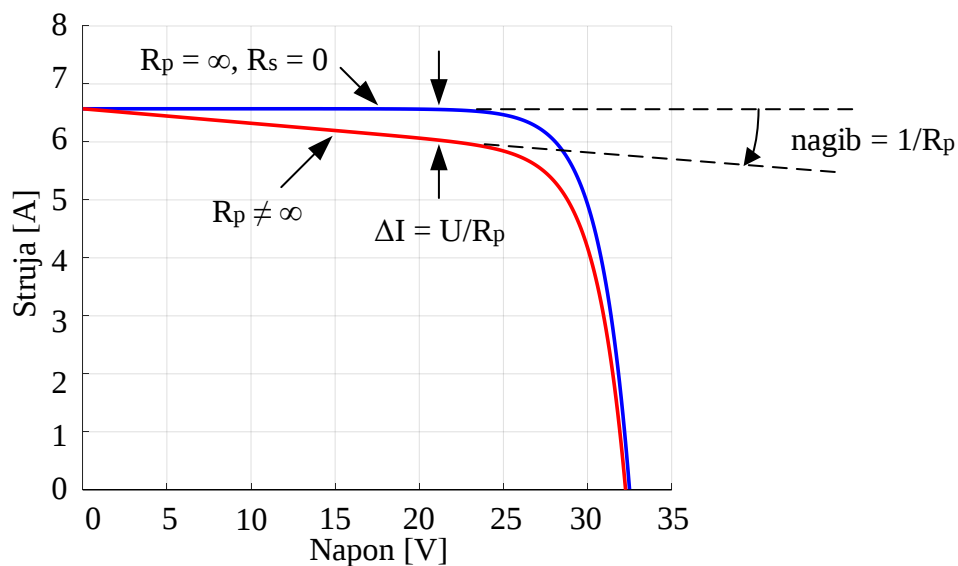
Iz prethodne relacije se zaključuje da ukoliko postoji napon V na paralelno postavljenom otporniku struja kroz potrošač će biti umanjena za vrijednost V/R_p (slika 1.16.).



Slika 1.14 Dvije redno vezane solarne ćelije



Slika 1.15 Šema solarne ćelije sa dodatom paralelnom otpornošću



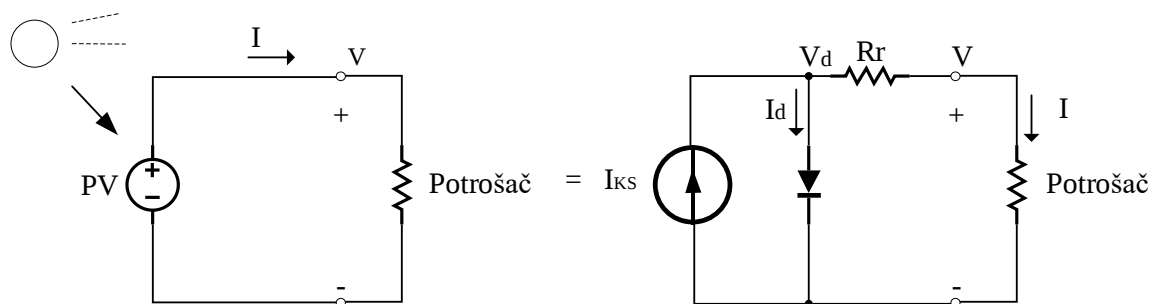
Slika 1.16 U - I karakteristika solarne ćelije sa dodatim paralelnim otporom

Da bi ćelija imala gubitke manje od 1% kroz otpornik R_p potrebno je da njegova vrijednost zadovoljava sljedeći izraz:

$$R_p > \frac{100 \cdot V_{PH}}{I_{KS}}. \quad (1.5)$$

Za velike ćelije struja kratkog spoja I_{KS} može imati vrijednost oko 7 A, a napon praznog hoda V_{PH} oko 0.6 V na osnovu čega zaključujemo da bi vrijednost otpornika R_p morala da bude veća od 9 Ω , u cilju smanjivanja gubitaka u ćeliji.

Otpornost između P i N slojeva, kao i otpor elektroda može se ekvivalentirati dodavanjem redne otpornosti u osnovno kolo.



Slika 1.17 Šema solarne ćelije sa dodatom rednom otpornošću

Sa slike 1.17. proizilazi:

$$I = I_{KS} - I_d = I_{KS} - I_0 \left[e^{\frac{eU_d}{AkT}} - 1 \right]. \quad (1.6)$$

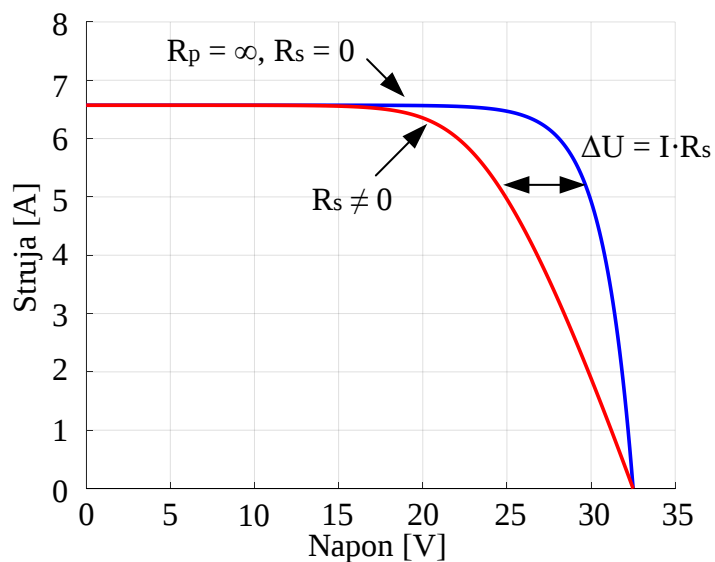
Kada se doda uticaj redne otpornosti R_r napon na diodi može da se zapiše u obliku:

$$U_d = U + I \cdot R_r. \quad (1.7)$$

Pa na kraju struju kroz potrošač opisuje sljedeći izraz:

$$U = I_{KS} - I_d = I_{KS} - I_0 \left[e^{\frac{e(U+I \cdot R_r)}{AkT}} - 1 \right]. \quad (1.8)$$

Na slici 1.18. prikazano je kako redna otpornost utiče na $U - I$ karakteristiku solarne ćelije.



Slika 1.18 $U-I$ karakteristika solarne ćelije sa dodatim rednim otporom

Da bi gubici u rednoj otpornosti bili manji od 1% potrebno je da njena vrijednost zadovoljava sljedeću nejednačinu:

$$R_r > \frac{0.01 \cdot V_{PH}}{I_{KS}}. \quad (1.9)$$

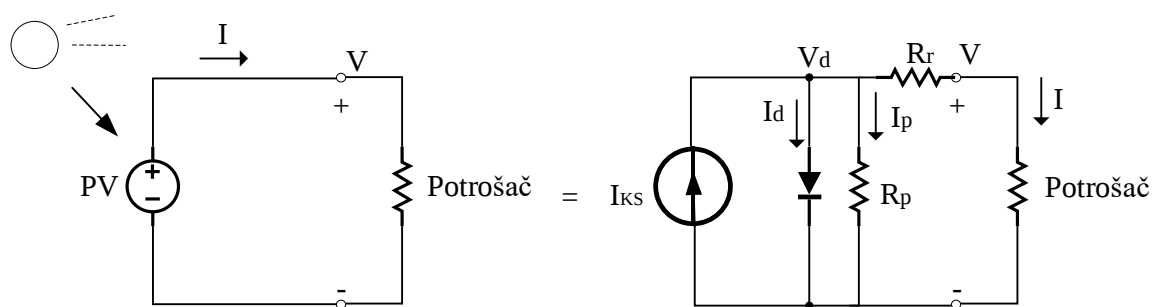
Uzimajući podatke iz prethodnog slučaja kada imamo veliku ćeliju ($I_{KS} \approx 7A$, $V_{PH} \approx 0.6V$), vrijednost redne otpornosti treba da bude manja od 0.0009Ω . [19]

Na kraju, kada u se ekvivalentnu šemu uključi i redna i paralelna otpornost izrazi za struju i napon potrošača su sljedeći:

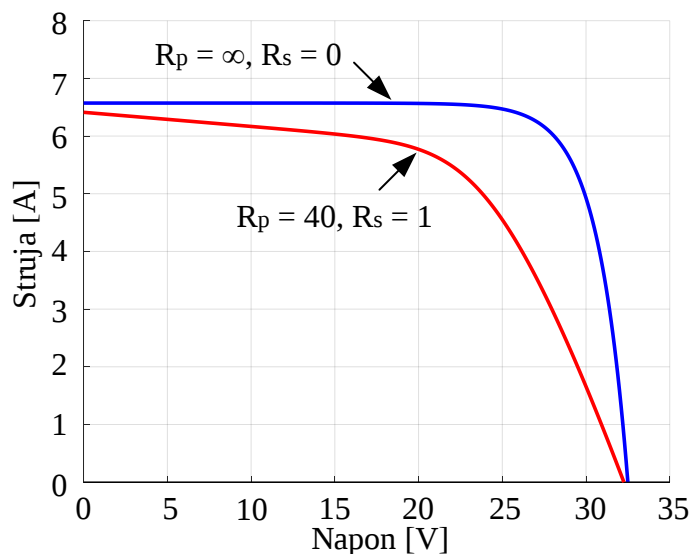
$$I = I_{KS} - I_0 \left[e^{\frac{e(U+I \cdot R_r)}{AkT}} - 1 \right] - \frac{U + I \cdot R_r}{R_p}, \quad (1.10)$$

$$U = U_d - I \cdot R_r. \quad (1.11)$$

Na slici 1.19. je prikazan kompletan model solarne ćelije, dok je na slici 1.20. prikazana $U - I$ karakteristika solarne ćelije kada su uzete obzir i redna i paralelna otpornost, [19], [20].



Slika 1.19 Kompletan model solarne ćelije



Slika 1.20 $U-I$ karakteristika solarne ćelije sa dodatim paralelnim i rednim otporom

Jednačina, kojom se matematički opisuje solarna ćelija, je nelinearna i za njeno rješavanje je potrebno koristiti neku od iterativnih metoda. Jedna od takvih je Njutn-Rapsonova metoda:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}, \quad (1.12)$$

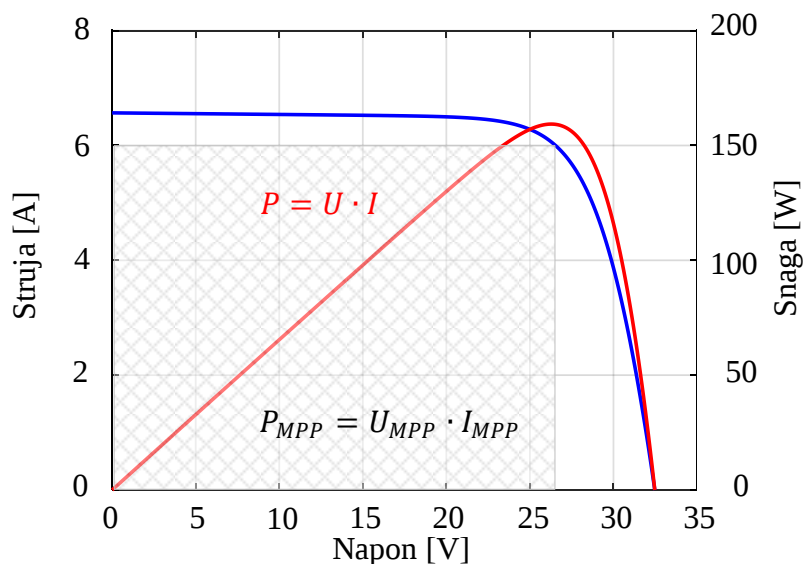
gdje je x_n je vrijednost promjenljive x u n -toj iteraciji, dok je f' je izvod funkcije f po promjenljivoj x . Promjenljiva x može biti I_{pv} ili V_{pv} , [21], [22].

1.5 Faktor popunjenosti i efikasnost fotonaponske ćelije

Faktor popunjenosti (eng. filling factor) predstavlja odnos maksimalne snage i proizvoda struje kratkog spoja i napona praznog hoda pri određenoj solarnoj iradijaciji i temperaturi solarne ćelije:

$$F = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_{PH} \cdot I_{KS}}. \quad (1.13)$$

Faktor popunjenosti se može definisati i kao odnos pravougaonika sa stranicama U_m i I_m , i pravougaonika sa stranicama U_{PH} i I_{KS} , kako je i prikazano na slici 1.21. Maksimalna snaga koju idealna ćelija može dati $P_{MPP} = U_{MPP} \cdot I_{MPP}$ označena je šrafiranom površinom. Računski se može odrediti traženjem pravougaonika sa najvećom površinom ispod U-I krive. Faktor popunjenosti je bezdimenziona veličina i njegova vrijednost je obično u opsegu od 0,7 do 0,9.



Slika 1.21 Grafički prikaz snage fotonaponske ćelije

Efikasnost (stepen korisnog dejstva) solarne ćelije definiše se kao odnos izlazne snage solarne ćelije i solarne snage koja dopijeva na površinu ćelije:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{G \cdot S} = \frac{F \cdot U_{PH} \cdot I_{KS}}{G \cdot S}, \quad (1.14)$$

gdje je:

I_{MPP} , U_{MPP} – struja i napon u optimalnoj tački,

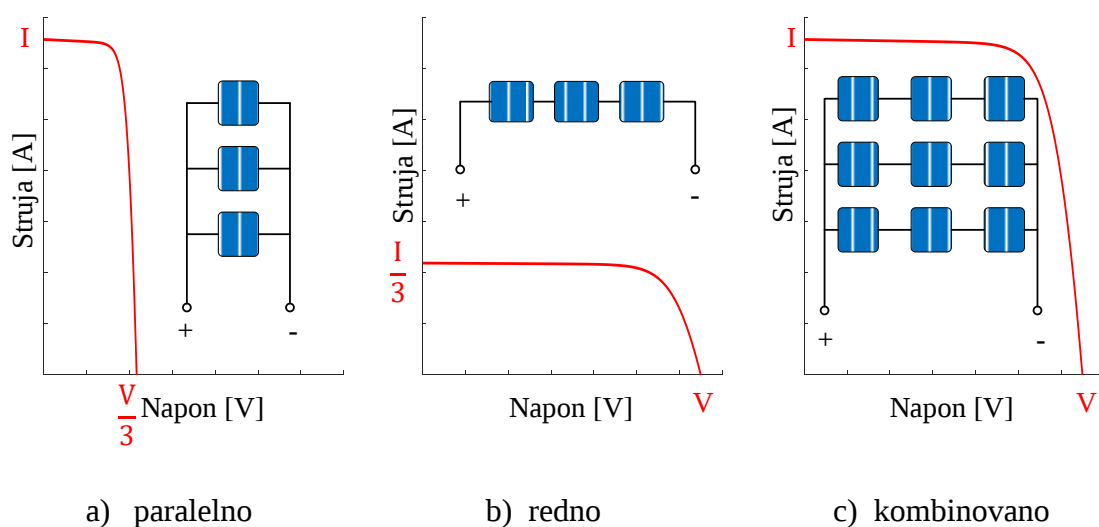
G – intenzitet sunčevog zračenja,

S – površina FN ćelije.

Na osnovu prethodne relacije može se zaključiti da je efikasnost solarne ćelija veća kada su U_{PH} i I_{KS} veći i kada je faktor popunjenosti što bliži jedinici, [19].

1.6 Način povezivanja solarnih ćelija

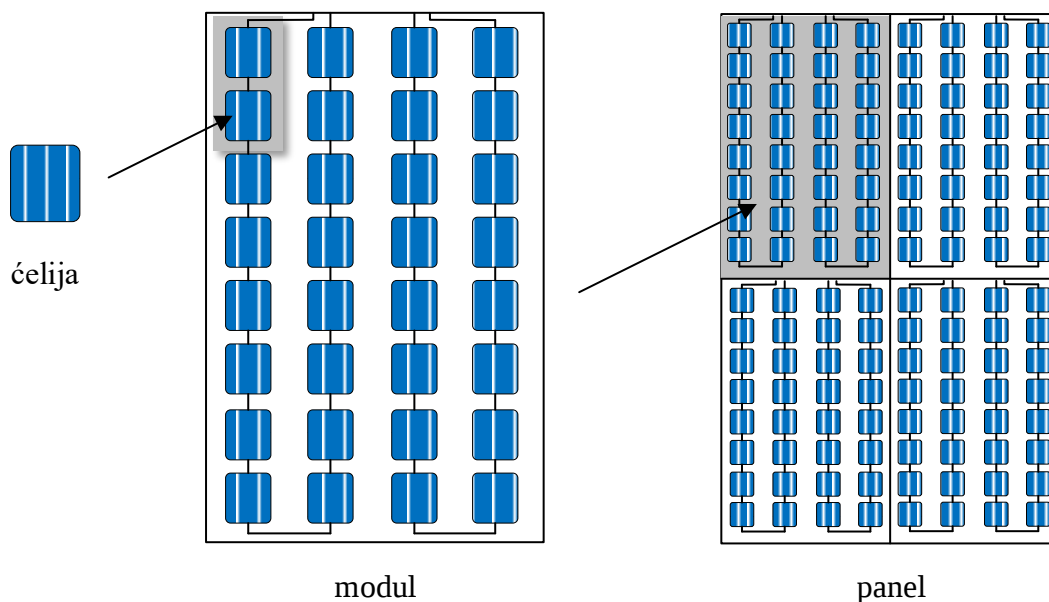
Kako je napon, koji solarna ćelija može da proizvede, do 0.5 V, može se zaključiti da kao takva ne bi mogla šire da se upotrebljava. Stoga, kao osnovni element kod fotonaponskih sistema koristi se modul. Modul se sastoji iz većeg broja solarnih ćelija, koje su unutar njega povezane redno, paralelno ili njihovom kombinacijom (slika 1.22.). Na osnovnu načina povezivanja ćelija može se zaključiti da ukoliko je potrebno dobiti veći izlazni napon potrebno je ostvariti redno vezivanje ćelija. Ako je potrebno dobiti veću izlaznu struju realizovaće se paralelno povezivanje ćelija. Tipični solarni modul, koji je poznat po nazivom „12-V modul“, sastoji se od 36 redno vezanih solarnih ćelija. U posljednje vrijeme sve češće se izrađuju moduli koji se sastoji od 72 ćelije. Unutar ovakvog modula ćelije se najčešće povezuju da se dobiju 24-V moduli (redno vezivanje 72 ćelije) ili 12-V moduli (dva paralelno povezana niza, koja se sastoje od 36 redno vezanih ćelija).



Slika 1.22 *Načini povezivanja solarnih ćelija u module*

Analogno, u cilju daljeg povećanja napona, odnosno, struje (odnosno snage, koja predstavlja proizvod napona i struje) moguće je izvršiti redno ili paralelno povezivanje modula. Takođe, moguće je ostvariti i redno-paralelnu kombinaciju vezivanja. Povezivanjem više modula obrazuju se solarni paneli.

Na slici 1.23. prikazan je odnos između ćelije, modula i panela.

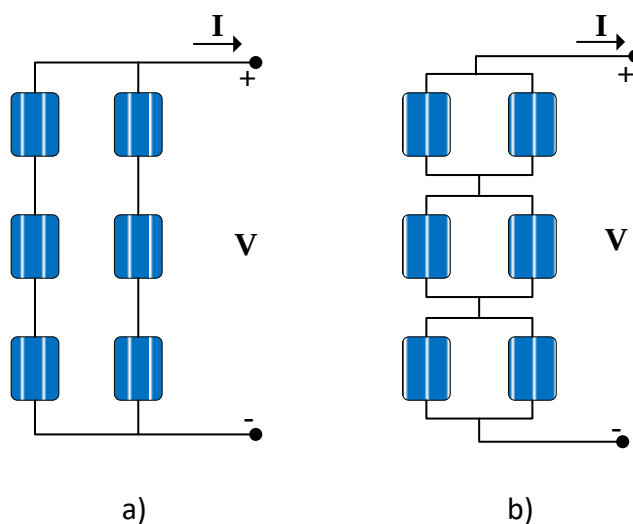


Slika 1.23 Ćelija, modul, panel i njihova veza

Postoje dva načina vezivanja redno-paralelnih kombinacija:

- 1) paralelno povezivanje nizova, dok su ćelije redno vezane unutar njih
- 2) redno povezivanje nizova, dok su ćelije paralelno vezane unutar njih

Navedene kombinacije su prikazane na narednoj slici:



Slika 1.24 Načini vezivanja redno-paralelnih kombinacija

Kada je u pitanju snaga, korištenjem bilo kojeg od prethodno pomenutih načina vezivanja dobiće se ista izlazna snaga panela. Interesantno je, ipak, da prilikom izrade panela teži se kombinaciji prikazanoj na slici 1.24 a). Razlog za to je mogućnost isključivanja cijelog niza u cilju remonta, a da pri tome napon, koji je potreban potrošaču, ostane nepromijenjen. U drugom slučaju to nije moguće ostvariti, [19], [23].

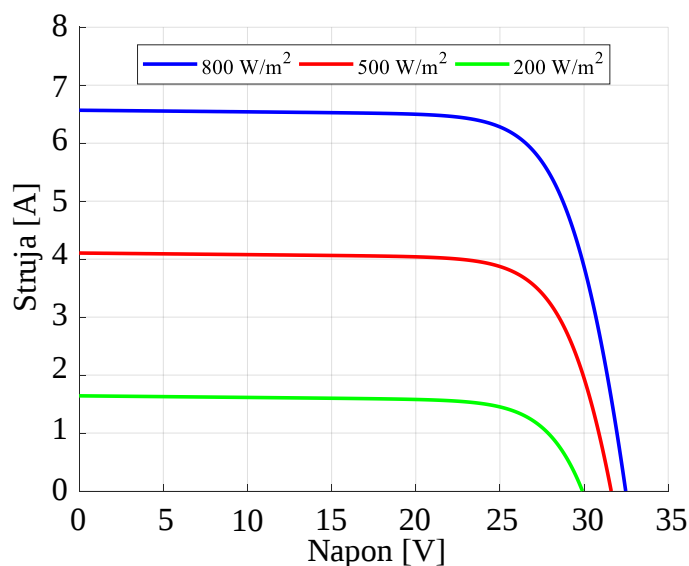
1.7 Uticaj temperature i solarne iradijacije na solarni panel

Polazeći od izraza za napon praznog hoda:

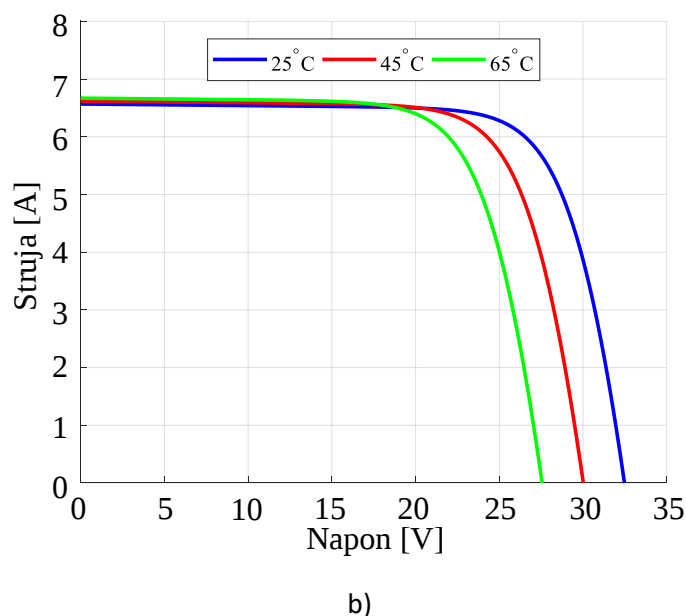
$$U_{PH} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_{KS}}{I_0} + 1 \right), \quad (1.15)$$

dolazi se do zaključka da iradijacija jako malo utiče na napon solarne ćelije. Sa druge strane, struja solarne ćelije je direktno srazmjerna sa iradijacijom, to jest, što je veća osvijetljenost ćelije (iradijacija) javlja se jača struja, odnosno stvara više elektron-šupljina. Napon fotonaponske ćelije je direktno srazmjeran sa temperaturom. Pri višim temperaturama elektroni imaju veću energiju, odnosno smanjuje se energetska barijera između provodne i valentne zone što utiče na smanjenje napona fotonaponske ćelije. Temperatura jako malo utiče na struju ćelije. Zavisnost U-I karakteristike od iradijacije i temperature prikazana je na slici 1.25.

Posmatrajući sliku može se zaključiti da će se struja duplo smanjiti ukoliko se iradijacija upolovi, a samim tim i snaga, jer napon ćelije ostaje praktično nepromijenjen. Tipična promjena ovih veličina za fotonaponske ćelije od kristalnog silicijuma iznosi: $\Delta U_{PH} = -0,37 \frac{\%}{^{\circ}\text{C}}$, $\Delta I_{KS} = 0,05 \frac{\%}{^{\circ}\text{C}}$ i $\Delta P = -0,5 \frac{\%}{^{\circ}\text{C}}$. Da bi se ovaj uticaj uzeo u obzir, neophodno je poznavati temperaturu fotonaponske ćelije. Temperatura fotonaponske ćelije je jedan od bitnih parametara koji utiču na efikasnost same ćelije. Povećanje temperature



a)



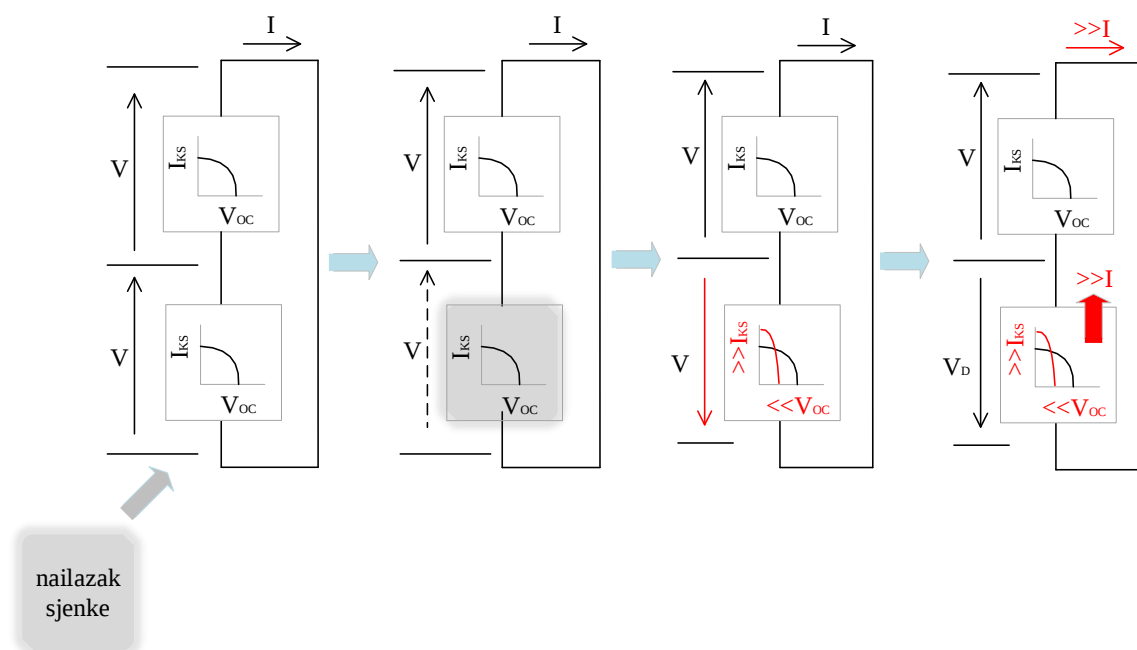
Slika 1.25 Zavisnost U - I karakteristike od promjene iradijacije (a), odnosno, temperature (b)

ćelije uzrokuje značajan pad efikasnosti. Na primjer, ako je temperatura fotonaponskog modula $65\text{ }^{\circ}\text{C}$, onda je njegova efikasnost oko 25% manja od deklarirane efikasnosti, koja se odnosi na temperaturu modula od $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, [24].

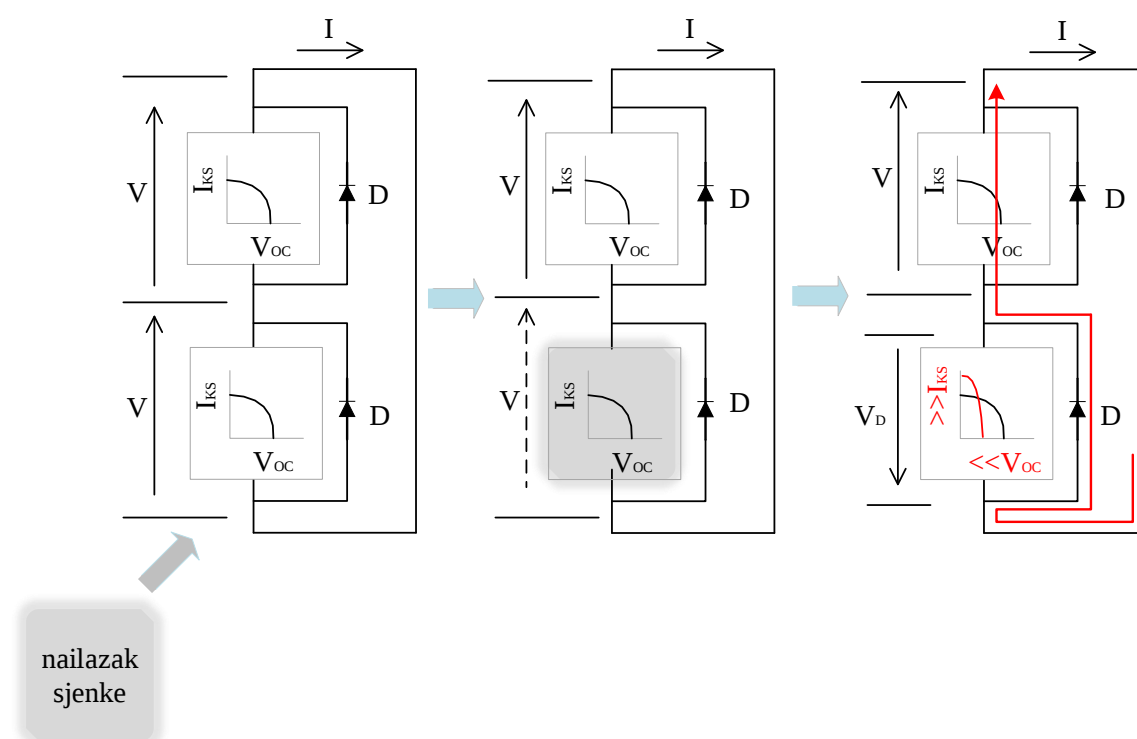
1.8 Uticaj sjenke na solarnu ćeliju

Izlaz solarnog modula/panela može drastično da se umani ukoliko je čak i mali dio prekriven sjenkom. Navedeni problem se najbolje može objasniti kroz primjer dvije redno vezane ćelije. Potrebno je napomenuti da su solarne ćelije istih karakteristika. Problem se javlja kada je jedna od njih osvijetljena solarnim radijacijama manjeg intenziteta, ili ukoliko se jedna od njih nađe u sjenci (slika 1.26.). Tada zbog nelinearne prirode U - I karakteristike solarnih ćelija, u uslovima kratkog spoja na izlaznim krajevima, kroz osjenčenu solarnu ćeliju teče veća struja, od one koju može da generiše. Na osnovu toga ćelija postaje inverzno polarisana, više ne radi kao generator, već se ponaša kao potrošač (slika 1.26. – treća skica sa desne strane). Cjelokupna energija koju pri tome stvara osvijetljena ćelija troši se na osjenčenoj. Zbog disipacije energije na njoj, ova ćelija će se zagrijavati, postaje “vruća tačka”, što može dovesto do njenog oštećenja.

Problem se rješava na način što se paralelno svakoj solarnoj ćeliji dodaju paralelne (by-pass) obične diode, koje su pri normalnom radu inverzno polarisane (slika 1.27). Kada neka od solarnih ćelija uđe u sjenku ili joj vremenom oslabe karakteristike, tada zbog pojave negativnog inverznog napona na njenim krajevima, provede by-pass dioda i kroz nju teče struja redne veze (označena crvenom putanjom). Ovim je izbegnuta disipacija snage u osjenčenoj ćeliji, odnosno izvršena je minimizacija gubitaka

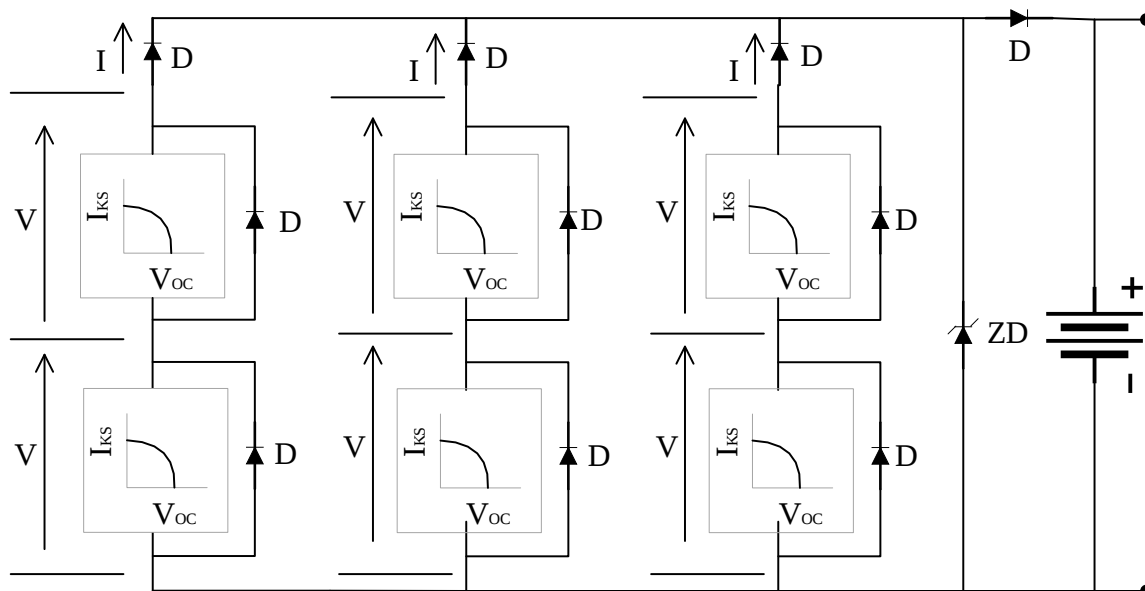


Slika 1.26 Ponašanje ćelije prilikom nailaska sjenke



Slika 1.27 Način rješavanja problema stvorenog nailaskom sjenke

Redne diode (dioda za blokiranje odnosno izolacione diode) između paralelno vezanih grana izoluju međusobni uticaj u slučaju oštećenja jedne od solarnih ćelija u nizu. Takođe, u uslovima kada solarni generator ne generiše napon (noću) blokirajuće odnosno izolacione diode postaju inverzno polarisane i sprečavaju tok struje od baterije ka solarnom generatoru.



Slika 1.28 Dodavanje izolacionih dioda i Zener diode radi zaštite

Zener dioda ZD služi za zaštitu od prekomjernog porasta napona koji generiše redno-paralelna grupa. Zener dioda ograničava izlazni napon na V_z . Redna diode D (koja se nalazi u blizini akumulatorske baterije) služi kao zaštita od obrnutog polariteta akumulatorske baterije u odnosu na priključne krajeve solarnog generatora. Mana je u tome što u normalnom režimu kada generator puni bateriju pravi dodatni pad napona, [25].

1.9 Faktori koji ograničavaju efikasnost solarne ćelije

Približna teoretska efikasnost solarne ćelije iznosi oko 25%. U realnim uslovima ona je i manja i ima vrijednost oko 16%. Efikasnost same solarne ćelije zavisi i od tipa (monokristalni, polikristalni, amorfni,...) i ona je dosta niska. Prema tome, zaključujemo da je glavni cilj maksimizovati efikasnost solarne ćelije pri konverziji Sunčeve energije u električnu. Ono što ograničava efikasnost solarne ćelije su spoljašnji i unutrašnji gubici koji se javljaju pri njenom radu. Kada su u pitanju spoljašnji gubici, na njih se može uticati, odnosno oni se mogu minimalizovati i kontrolisati. Unutrašnji gubici su neizbježni i na njih se ne može uticati. Unutrašnji gubici se mogu podijeliti na:

- IC gubici (u infracrvenoj oblasti)
- gubitak viška energije za visokoenergetske fotone
- gubici zbog faktora napona
- gubici usljed faktora popunjenosti

1.9.1 IC gubici

Polazeći od Ajnštajnovne relacije za energiju fotona:

$$E_g = \frac{hc}{\lambda_g} = hf_g, \quad (1.16)$$

gdje je:

E_g – širina zabranjene zone [J]

h – Plankova konstanta [= $6.62 \cdot 10^{-34}$ Js]

c – brzina svjetlosti [= $3 \cdot 10^8$ m/s]

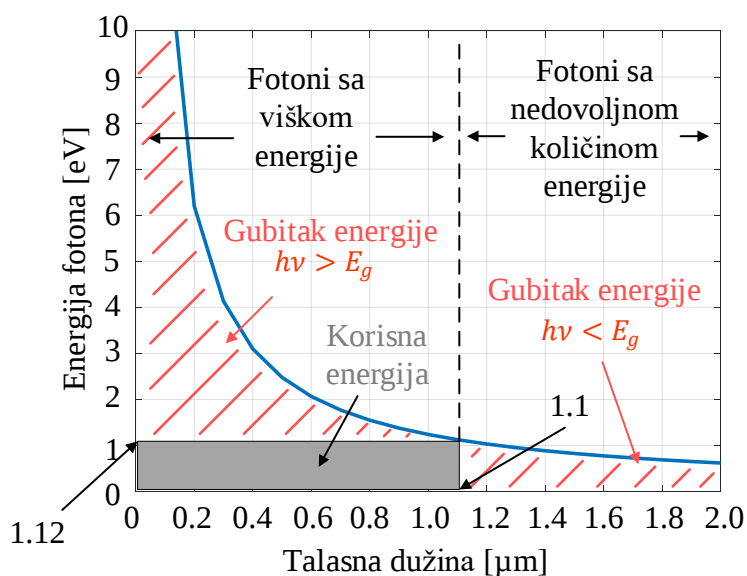
λ_g – granična talasna dužina (= talasna dužina zabranjene zone) [μm]

f_g – frekvencija [Hz]

može se vidjeti da fotoni svjetlosnih talasnih dužina većih od granične talasne dužine λ_g ne mogu generisati parove elektron-šupljina, ne mogu se apsorbovati, odnosno da elektron nema dovoljno energije da pređe u provodnu zonu. Ovakvi fotoni disipiraju svoju energiju u vidu toplote što dovodi do zagrijavanja solarne ćelije. Kako svako zagrijavanje ćelije doprinosi povećanju gubitaka i smanjenju efikasnosti, slijedi da pomenuti slučaj uzrokuje smanjenje efikasnosti za do 25 %, [25].

1.9.2 Gubitak viška energije na visokoenergetske fotone

Pozivajući se ponovo na Ajnštajnovu relaciju za energiju fotona proizilazi da za sve apsorbovane fotone talasnih dužina manjih od granične, višak energije se gubi u toplotu. Svi elektroni prevedeni iz valentne zone u provodnu teže da se “termalizuju” ka donjoj ivici provodne zone. Zagrijavanje zbog gubitka viška energije može doprinijeti još dodatnih 35 % gubitaka pri AM 1,5 solarnim radijacijama. Na slici 1.29. su ilustrativno opisana prethodna dva slučaja smanjenja efikasnosti na primjeru solarne ćelije napravljene od silicijuma, [19], [25].



Slika 1.29 Korisna energija na primjeru silicijuma

1.9.3 Gubici usljed faktora napona

Zbog termodinamičkih uticaja u solarnoj ćeliji napon praznog hoda U_{PH} ne može nikada dostići vrijednost širine zabranjene zone. Za silicijum gornja granica za napon praznog hoda iznosi 0.8 V. Ovo dododi do stvaranja novih gubitaka i oni mogu da iznose i do 12 %, [25].

1.9.4 Gubici usljed faktora popunjenosti

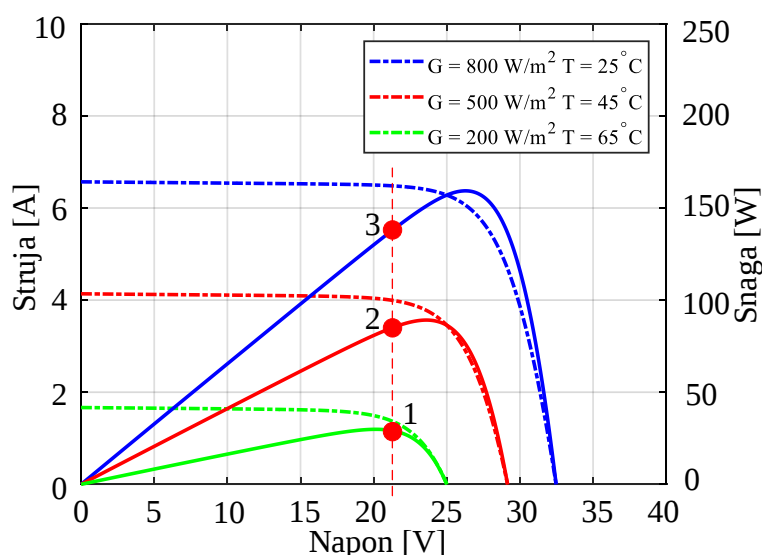
Za idealnu solarnu ćeliju postoje unutrašnji termodinamički gubici. Oni nastaju kada solarna ćelija na izlazu daje maksimalnu snagu. Za silicijum idealna vrijednost za faktor popunjenosti je 0.9, što se ispoljava u gubitku od 3%.

Uzimajući u obzir prethodno navedene uzroke gubitaka unutar solarne ćelije dolazi se do podatka da je efikasnost solarne ćelije približno jednaka 25%, [25].

Glava 2.

MPPT ALGORITMI

Kako je efikasnost fotonaponske ćelije veoma niska, glavni zadatak je pronaći način da se minimizuju gubici tokom konverzije solarne energije u električnu. U prethodnom poglavlju je navedeno da su gubici u efikasnosti fotonaponske ćelije podijeljeni na unutrašnje i spoljašnje. Unutrašnji gubici su neizbježni i na njih se ne može uticati, dok spoljašnji gubici zavise od promjene solarne iradijacije i temperature. Na slici 1.24 je prikazano da sa povećanjem, odnosno, smanjenjem inteziteta iradijacije ili temperature dolazi i do promjene vrijednosti moguće maksimalne snage. Sa povećanjem inteziteta solarne iradijacije dolazi do povećanja izlazne snage, dok sa povećanjem temperature ista opada nelinearno. Prilikom pomenutih promjena radna tačka ostaje na istom naponskom nivou, koji ne odgovara naponu u tački maksimalne snage, što doprinosi smanjenju efikasnosti solarnog panela. U cilju povećanja efikasnosti osmišljeni su algoritmi za praćenje tačke maksimalne snage, poznati pod nazivom *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) algoritmi.

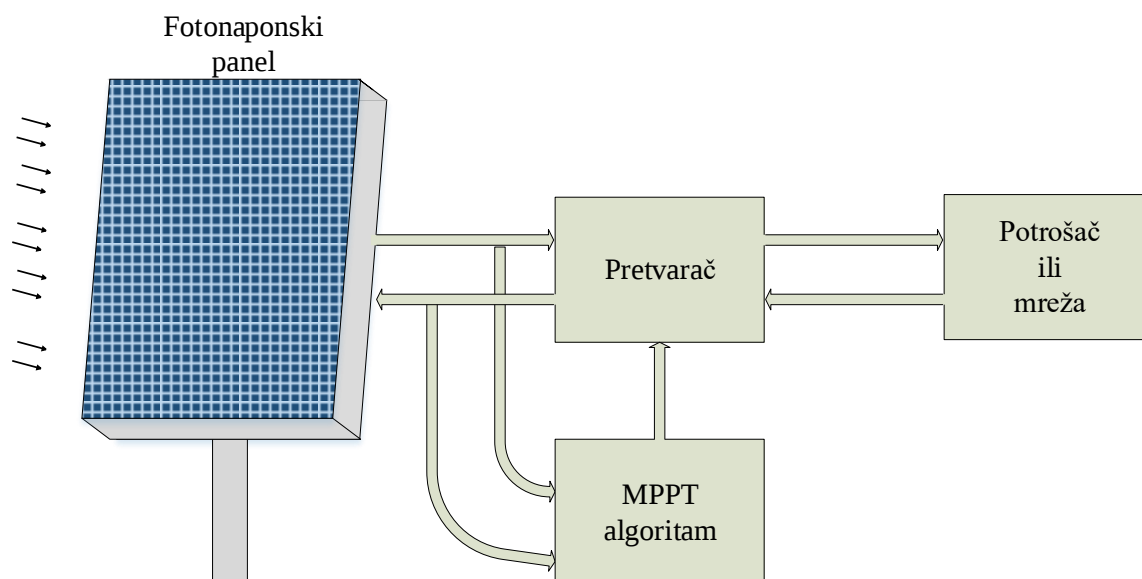


Slika 2.1. Uticaj promjene solarne iradijacije i temperature na poziciju radne tačke

Na slici 2.1. je prikazan primjer ponašanja radne tačke u zavisnosti od promjene atmosferskih uslova. U prvom slučaju radna tačka se nalazi u poziciji gdje je maksimalna snaga (tačka 1). Nakon promjene atmosferskih uslova, odnosno, povećanja solarne iradijacije i temperature, radna tačka ostaje na istom naponskom nivou, ali udaljena od

tačke maksimalne snage (tačka 2). U trećem slučaju, nakon nove promjene atmosferskih uslova, radna tačka se i dalje nalazi na istom naponskom nivou, ali znatno udaljenija od pozicije maksimalne snage, što dovodi do uvećanja gubitaka i smanjivanja efikasnosti solarne ćelije.

U posljednjoj deceniji razvijeni su mnogi algoritmi za praćenje tačke maksimalne snage. Algoritmi se razlikuju po složenosti implementacije, potrebnim senzorima, brzini konvergencije, rasponu efikasnosti, cijeni, odzivu pri brzim promjenama temperature, odnosno zračenja, te po sklopovima potrebnima za implementaciju. MPPT algoritam implementira se u energetsom pretvaraču, tačnije u jednosmjernom pretvaraču napona koji je sastavni dio energetskog pretvarača. Preko energetskog pretvarača fotonaponski sistem se priključuje na elektroenergetsku mrežu ili na potrošač, zavisno od primjene sistema. Od jednosmjernih pretvarača, najčešće se koriste uzlazni pretvarač (eng. *Boost converter*) i silazno-uzlazni pretvarač (eng. *buck-boost converter*), [26].

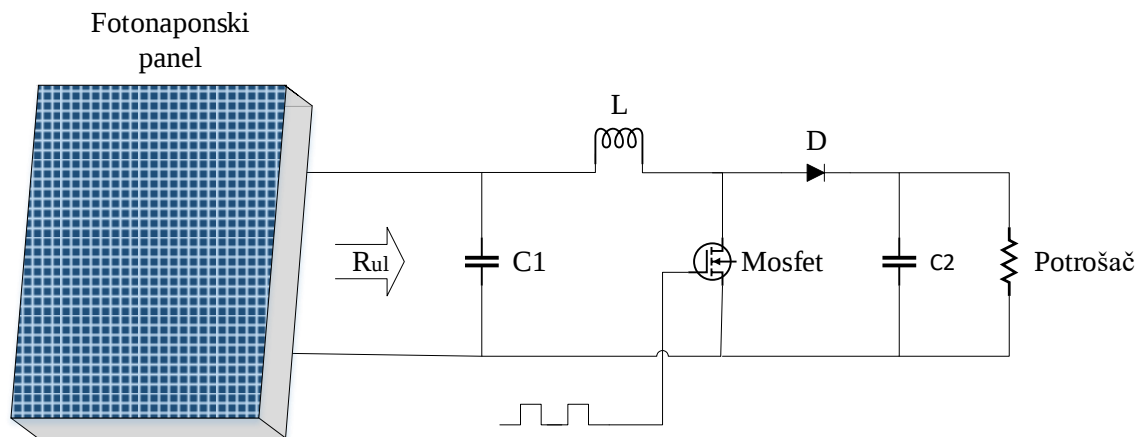


Slika 2.2. Šematski prikaz fotonaponskog sistema

U cilju postizanja maksimalne izlazne snage, izlazna otpornost (potrošač), koju vidi panel, mora biti jednaka ulaznoj otpornosti. Stoga, da bi se dobila adekvatna ulazna otpornost koriste se pretvarači (čoperi). Promjenom faktora popunjenosti D prekidačkog elementa čopera može se uticati na podešavanje otpornosti na željenu vrijednost. Kao primjer je uzet boost pretvarača i prikazan je na slici 2.3. Za prekidački element usvojen je Mosfet.

Kod boost čopera, kondenzator C_1 služi da smanji fluktacije ulaznog napona, to jeste da ga "ispegla". U stacionarnom stanju kod pomenutog pretvarača, relacija između ulazne i izlazne otpornosti data je izrazom:

$$R_{ul} = (1 - D)^2 R_{potrošača} , \quad (2.1)$$



Slika 2.3. Šema boost pretvarača

gdje je sa R_{ul} označena ulazna otpornost, dok je sa $R_{potrošača}$ označena izlazna otpornost, odnosno otpornost potrošača. Iz jednačine (2.1) jednostavno je zaključiti da promjenom faktora popunjenosti D lako se može uticati na promjenu ulazne otpornosti. Korišćenjem različitih MPPT algoritama utiče se na faktor popunjenosti, sa ciljem dobijanja odgovarajućeg faktora da bi se na izlazu dobila maksimalna snaga. U svakoj iteraciji faktor popunjenosti se mijenja za vrijednost ΔD , koja može biti konstantna ili se u svakoj narednoj iteraciji prepodešava u zavisnosti od promjene napona, odnosno snage. Promjenljivost pomjeraja ΔD zavisi od algoritma koji se koristi, [27]. Kada je u pitanju boost čoper, na promjenu faktora popunjenosti može se uticati promjenom napona ili struje. U daljoj analizi MPPT metoda umjesto promjene faktora popunjenosti radi jednostavnosti biće posmatrana promjena napona ΔV .

MPPT metode se mogu svrstati u dvije kategorije: konvencionalne metode i metode *soft computing*-a, [28]. Konvencionalne metode su danas najčešće u upotrebi zbog svoje jednostavne implementacije, ne zahtijevaju jaku računarsku podršku i ekonomski su prihvatljiviji. Kao najznačajniji predstavnici izdvajaju se metoda „Pomjeraja i posmatranja“ (eng. *Perturb and Observe* – P&O) [29]–[31], i „Inkrementalni algoritam“ (eng. *Incremental Conductance* - IC) [32], [33]. Takođe, u pomenutu grupu se svrstavaju i „Metoda konstantnog napona“ (eng. *Fractional open circuit voltage*) [34] i „Metoda konstantne struje“ (eng. *Short circuit current*) [35], *Current Sweep* [36], i mnogi drugi. *Soft computing* metode pokazuju prednosti pri pojavi djelimične zasićenosti panela i brzini konvergencije ka stacionarnom stanju. U metode *soft computing*-a spadaju: Fazi logika (eng. *Fuzzy logic*) [37], Neuralne mreže (eng. *Neural network*) [38], *Differential Evolution* [39], *Particle Swarm Optimization* (PSO) [40], *Cuckoo Search* [41] i drugi. Uprkos prethodno navedenim prednostima u odnosu na konvencionalne metode, *soft computing* metode su u praksi mnogo sporije, zahtijevaju dodatnu opremu i u ekonomskom pogledu nisu prihvatljive, što prednost daje konvencionlanim metodama, [42], [43].

U nastavku će biti opisane neke od konvencionalnih metoda. Takođe, na kraju glave predstavljen je tabelrani prikaz prednosti i mana istih, [44], [45].

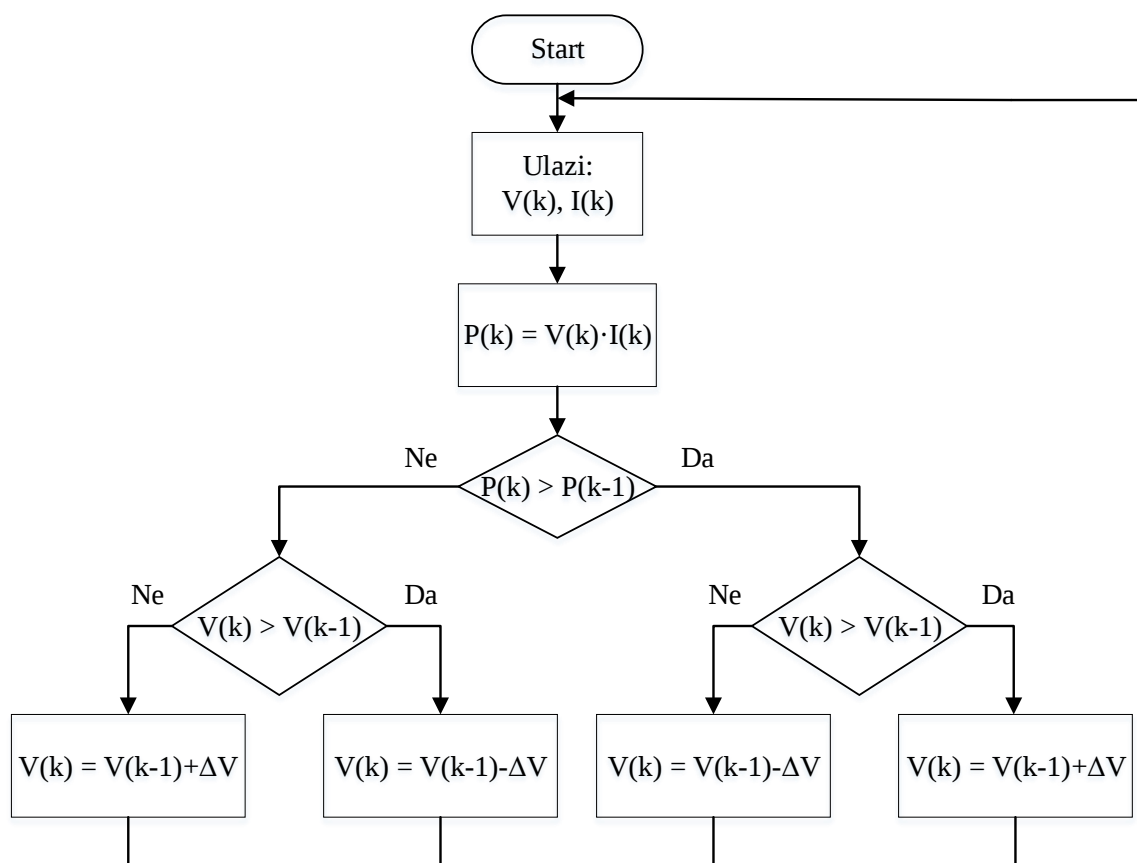
2.1. Perturb and Observe algoritam

MPPT algoritam Pomjeraj i posmatranje (eng. Perturb and Observe, P&O) je najčešće korišćeni metod u praksi zbog svoje jednostavnosti i lake implementacije. Ubraja se u tzv. *hill-climbing* algoritme, koji su naziv dobili po tome što se kod njih radna tačka fotonaponskog sistema pomjera u smjeru porasta snage, [46].

Algoritam u diskretnim koracima mijenja faktor popunjenosti čopera, odnosno, napon jednosmjerne veze između fotonaponskog sistema i energetskog pretvarača, pri čemu predznak promjene snage i predznak promjene napona određuju sljedeći korak. Ako je predznak promjene snage pozitivan, zadržava se isti predznak promjene napona, tj. ako je napon u prethodnom koraku povećan, i u sljedećem koraku će biti povećan, i obrnuto. Ako je predznak promjene snage negativan, odnosno ako se snaga u odnosu na prethodno stanje smanjila, mijenja se predznak promjene napona. Drugim riječima, promjena napona zadržava isti predznak sve dok važi uslov:

$$\frac{dP}{dV} > 0. \quad (2.2)$$

Šematski prikaz P&O algoritma prikazan je na slici 2.4.



Slika 2.4. Blok dijagram P&O algoritma

Suština P&O algoritma je stvaranje pomjeraja smanjivanjem ili povećanjem vrijednosti napona (ili faktora popunjenosti čopera (D)) i potom posmatranje smjera

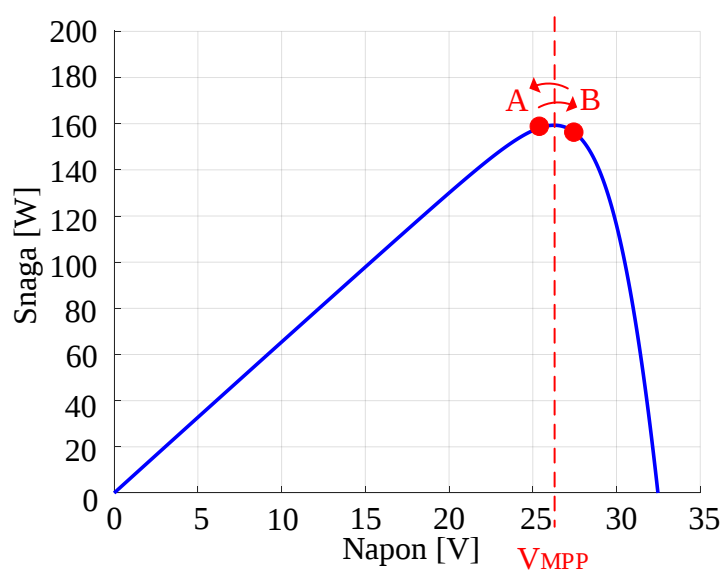
promjene izlaza iz fotonaponskog sistema. Ukoliko su za bilo koje k izlazna snaga fotonaponskog sistema $P(k)$ i napon $V(k)$ veći nego prethodno izmjerena snaga $P(k-1)$, odnosno, napon $V(k-1)$ smjer pomjeraja ostaje nepromijenjen, u suprotnom dolazi do promjene smjera. Promjena smjera pomjeraja se reguliše povećanjem ili smanjenjem vrijednosti napona V za pomjeraj ΔV (šema prikazana na slici 2.4.), [26], [47].

Tabela 2.1. Prikaz P&O algoritma

ΔV	ΔP	Sljedeća perturbacija
+	+	+
+	-	-
-	+	-
-	-	+

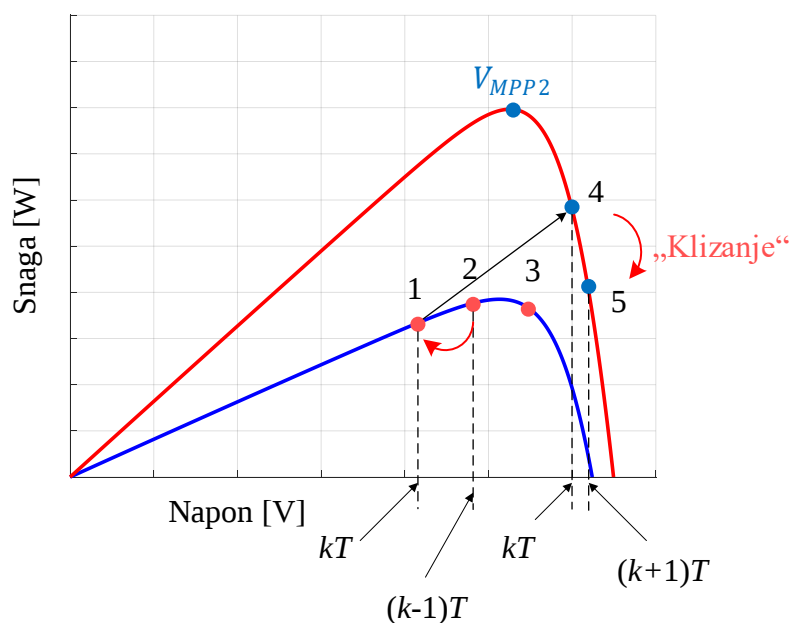
Nedostaci koji umanjuju efikasnost ovog algoritma su sljedeći:

- Algoritam ne može dovesti radnu tačku u poziciju stvarnog maksimuma. Tokom konstantne iradijacije, radna tačka će oscilovati oko tačke maksimalne snage što će doprinijeti smanjenju efikasnosti. Ovo se događa zbog toga što je promjena napona diskretna. Na slici 2.5 je prikazan primjer dolaska radne tačke u blizinu tačke maksimalne snage. Ako se radna tačka nalazi u poziciji A, i ukoliko su promjene snage i napona pozitivne, u narednoj iteraciji doći će do prelaska radne tačke u poziciju B. Kako je došlo do smanjenja snage u odnosu na prethodnu vrijednost i do povećanja vrijednosti napona P&O algoritam će u sljedećem koraku umanjiti vrijednost napona i radnu tačku vratiti u poziciju A. U ovom primjeru je vidljivo kako radna tačka osciluje oko tačke maksimalne snage i na taj način smanjuje stepen iskorištenja solarnog panela.

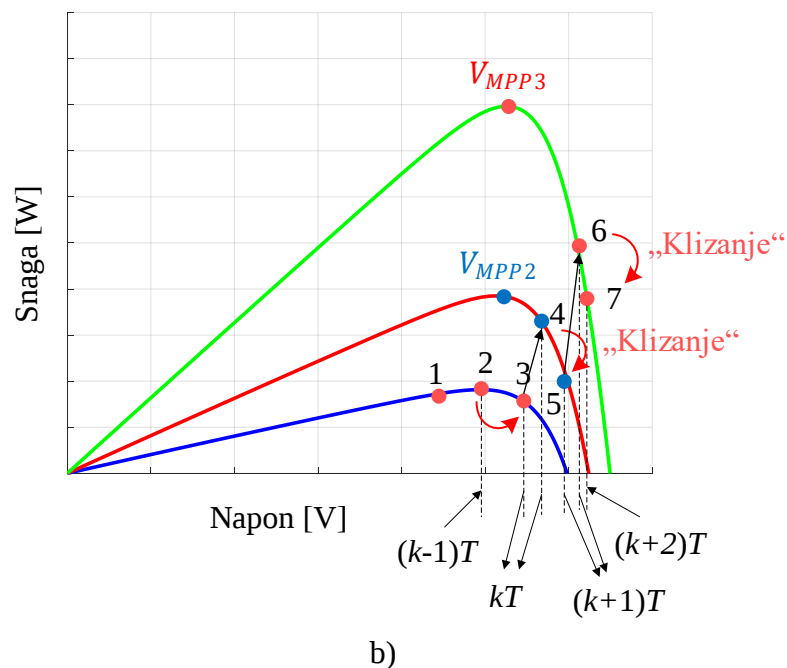


Slika 2.5. Oscilacije radne tačke oko tačke maksimalne snage

- Prilikom nagle promjene solarne iradijacije dolazi do promjene radne karakteristike solarnog panela i do pomjeranje radne tačke iz prethodnog maksimuma. Brzina dolaska u poziciju nove maksimalne tačke zavisi od veličine promjene napona. Što je promjena veća, radna tačka će prije doći u poziciju maksimalne snage, ali će i oscilacije oko nje biti veće. Ukoliko za promjenu napona definišemo manji korak, oscilacije oko tačke maksimalne snage će biti manje, ali će algoritam sporije dovesti radnu tačku u tu poziciju, što može uzrokovati velike gubitke energije pri brzim promjenama solarne iradijacije.
- Još jedan nedostatak se javlja pri naglim promjenama solarnog ozračenja, a to je pojava „klizanja“ radne tačke. Pojava „klizanja“ se javlja zbog nedostatka informacija o tome da li je promjena snage pozitivna zbog perturbacija ili zbog nagle promjene solarne insolacije. Ova pojava je objašnjena na slici 2.6. Neka se radna tačka nalazi u poziciji 1 i neka u tom trenutku dođe do naglog povećanja solarne iradijacije. Tačka će iz pozicije 1 preći u poziciju 4. Vidljivo je da je u novoj poziciji snaga veća, kao i napon, što uzrokuje pozitivne promjene snage i napona koji će, posmatrajući šemu P&O algoritma, doprinijeti uvećanju vrijednosti napona u sljedećem koraku. Na taj način će radna tačka iz pozicije 4 preći u poziciju 5, a samim tim i dodatno se udaljiti od tačke maksimalne snage (dolazi do „klizanja“ radne tačke). Za slučajeve da se radna tačka nalazila u pozicijama 2 i 3, na isti način bi došlo do klizanja radne tačke. Ovaj problem postaje ozbiljan ukoliko dođe do naglog porasta insolacije kao što je prikazano na slici 2.6. b), [48].



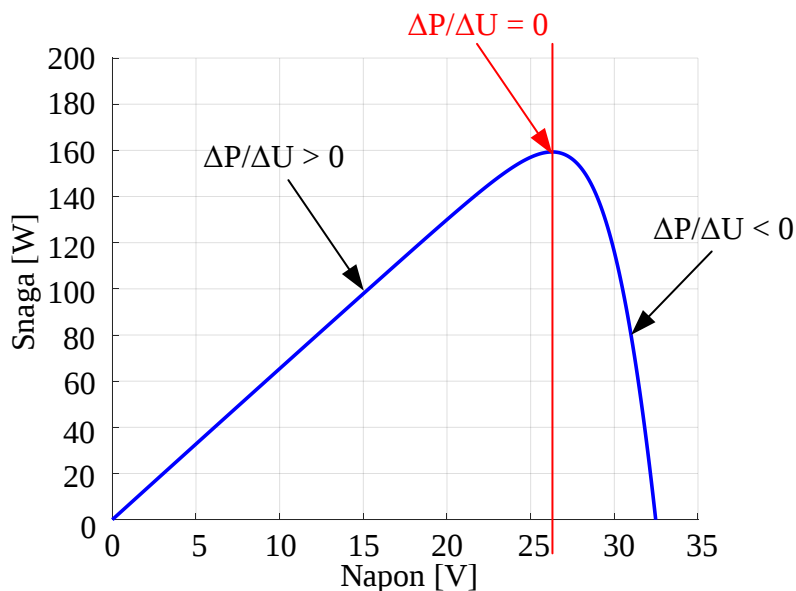
a)



Slika 2.6. Primjeri klizanja radne tačke

2.2. Incremental Conductance algoritam

Namjena Inkrementalnog algoritma (eng. Incremental Conductance - IC) je bila da prevaziđe nedostatke koje je imao P&O. Inkrementalni algoritam temelji se na posmatranju nagiba P-V karakteristike, odnosno, činjenici da je izvod snage po naponu jednak nuli u tački maksimalne snage. Takođe, pomenuti izvod je pozitivan na lijevoj strani od tačke maksimalne snage, dok je negativan na desnoj strani, kao što se može vidjeti na slici 2.7.



Slika 2.7. U-I karakteristika sa definisanim IC algoritmom

$$\begin{aligned}\frac{\Delta P}{\Delta V} &= 0 \quad - \text{ u tački maksimalne snage,} \\ \frac{\Delta P}{\Delta V} &> 0 \quad - \text{ s lijeve strane,} \\ \frac{\Delta P}{\Delta V} &< 0 \quad - \text{ s desne strane.}\end{aligned}\tag{2.7}$$

Ukoliko se prethodni odnos zapiše u obliku:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V \cdot I)}{dV} = V \frac{dI}{dV} + I \frac{dV}{dV},\tag{2.4}$$

u tački maksimalne snage važi:

$$0 = V \frac{dI}{dV} + I \frac{dV}{dV},\tag{2.5}$$

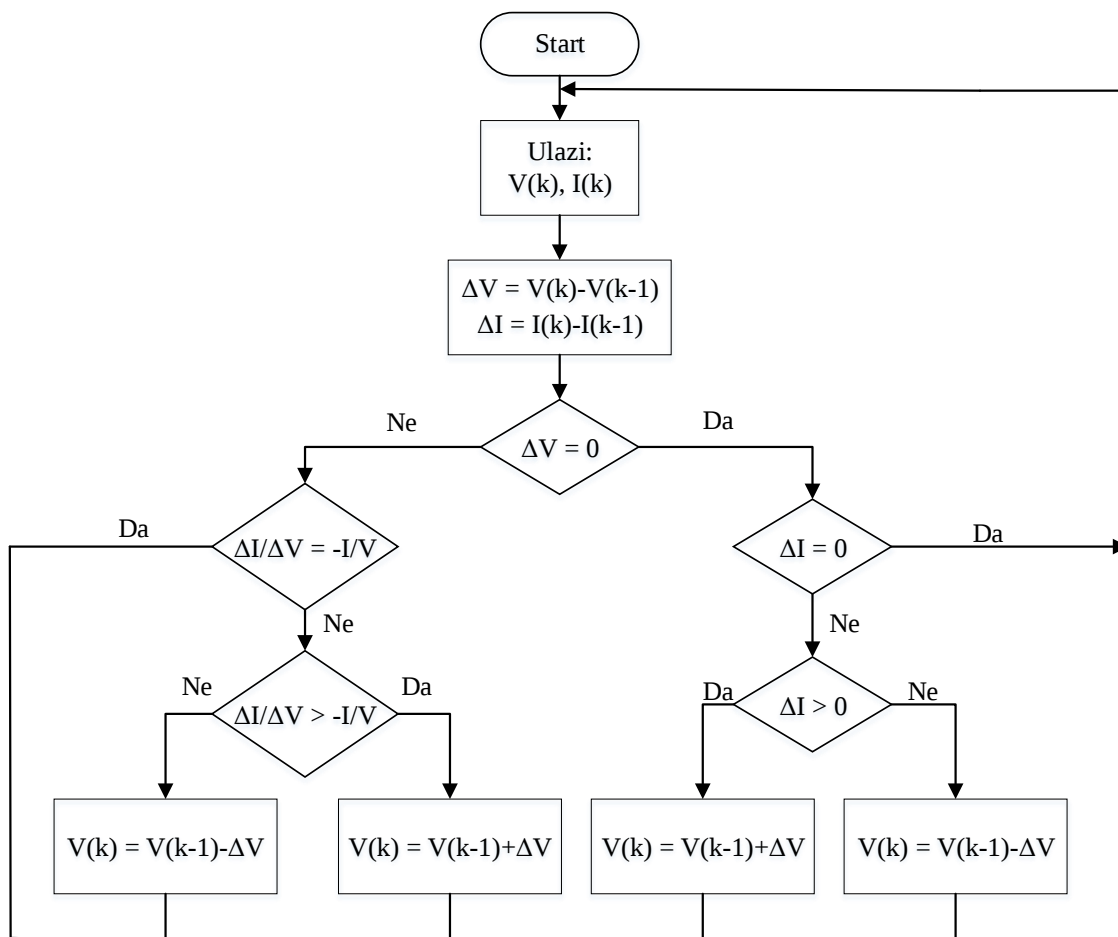
odnosno

$$\frac{I}{V} = - \frac{dI}{dV}.\tag{2.6}$$

Sada se prethodni set jednačina može zapisati u obliku:

$$\begin{aligned}\frac{I}{V} &= - \frac{dI}{dV} \quad - \text{ u tački maksimalne snage,} \\ \frac{I}{V} &> - \frac{dI}{dV} \quad - \text{ s lijeve strane,} \\ \frac{I}{V} &< - \frac{dI}{dV} \quad - \text{ s desne strane.}\end{aligned}\tag{2.7}$$

Upoređujući promjenu snage s promjenom napona između dva uzastopna koraka, može se odrediti smjer promjene napona u sljedećem koraku, [49]. Prednost Inkrementalnog algoritma je u tome što kada radna tačka dođe u poziciju maksimalne snage, algoritam taj događaj registruje i prestaje sa daljim pomjeranjem radne tačke. Ponovna aktivacija algoritma se javlja ukoliko dođe do atmosferskih promjena (promjena temperature, promjena solarnog ozračenja,...). Takođe, prednost Inkrementalnog algoritma u odnosu na P&O je i u tome što može brže da prati promjene solarne iradijacije i sa boljom preciznošću. Mane, u poređenju sa P&O, je u povećanju kompleksnosti izvedbe samog algoritma. Na sljedećoj slici je moguće vidjeti blok šemu Inkrementalnog algoritma:



Slika 2.8. Šematski prikaz IC algoritma

Tokom različitih studija i poslije nekoliko eksperimenata došlo je do zaključka da jednakost (2.6) se ne pojavljuje često. Stoga, jednostavno rješenje je predloženo u [50] i implementirano dodavanjem granica greške jednačini (2.6) i dobija se izraz:

$$\left| \frac{dI}{dV} + \frac{I}{V} \right| \leq \varepsilon. \quad (2.8)$$

2.3. Metod konstantnog napona

Umjesto promjene napona, snaga solarnog panela može biti definisana podešavanjem radnog napona na fiksnu vrijednost. Povremenim mjerenjem napona praznog hoda radni napon može da bude podešen na osnovu sljedeće relacije:

$$V_{MPP} = k_1 \cdot V_{PH}. \quad (2.9)$$

Konstanta k_1 se obično postavlja u opsegu od 0.7 do 0.8 (70%-80% napona praznog hoda). Vrijednost je eksperimentalno određena na osnovu pozicije napona maksimalne tačke i predložena u [51]. Ukoliko efikasnost solarnog panela nije od presudne važnosti u posmatranom sistemu, metod konstantnog napona predstavlja dobar izbor s obzirom na

njegovu relativno ekonomski isplativom i lakom implemetacijom. Korišćenjem ove metode moguće je proizvesti 70% od potencijalne maksimalne snage fotonaponskog sistema.

2.4. Metod konstantne struje

Za ovaj metod je neophodno posmatrati struju kratkog spoja. Struja kratkog spoja se mijenja sa promjenom atmosferskih uslova, dok se mijenja proporcionalno sa promjenom solarnog ozračenja. Kod ove metode struja pri kojoj se postiže maksimalna snaga je linearna struji kratkog spoja i zadovoljava izraz:

$$I_{MPP} = k_2 \cdot I_{KS} . \quad (2.10)$$

Konstanta k_2 najčešće uzima vrijednosti iz opsega 0.78-0.92 (78%-92% struje kratkog spoja), [44]. Ono što usložnjava izvedbu metode konstantne struje je potrebna dodatnog prekidača kod konvertora za određivanje struje kratkog spoja. To dovodi do porasta potrebnih komponenti, a samim tim i do povećanja troškova. Dodatni prekidač se koristi za simuliranje kratkog spoja usljed koje se određuje struja uz pomoć postojećeg senzora, što doprinosi smanjenju efikasnosti ovog algoritma. Takođe, pored smanjivanja izlazne snage prilikom određivanja struje kratkog spoja, ona se smanjuje i iz razloga što na osnovu relacije (2.10) radna tačka se ne može poklopiti sa tačkom maksimalne snage.

2.5. Current sweep metoda

Current sweep metoda se zasniva na periodičnom određivanju V-I karakteristike. V-I karakteristika se ažurira za tačno definisane intervale u kojima je moguće i odrediti napon tačke maksimalne snage. Nakon određivanja V_{MPP} lako je odrediti struju u tački maksimalne snage, čiji proizvod daje maksimalnu snagu pri trenutnim atmosferskim uslovima. Dobijena vrijednost V_{MPP} se prosljeđuje čoperu i radna tačka se pomjera na poziciju sa kordinatama (V_{MPP} , I_{MPP}) i tu će se nalaziti sve dok ne dođe do novog ažuriranja V-I krive i dobijanja nove vrijednosti za V_{MPP} , [36]. Na slici 2.9 je prikazan šematski prikaz Current sweep metode.

Za proračun maksimalne snage (proizvod napona i struje) potrebno je koristiti analogni pojačavač. U cilju eliminisanja analognog pojačavača iz upotrebe, struja panela je prikazana kao vremenski promjenljiva funkcija:

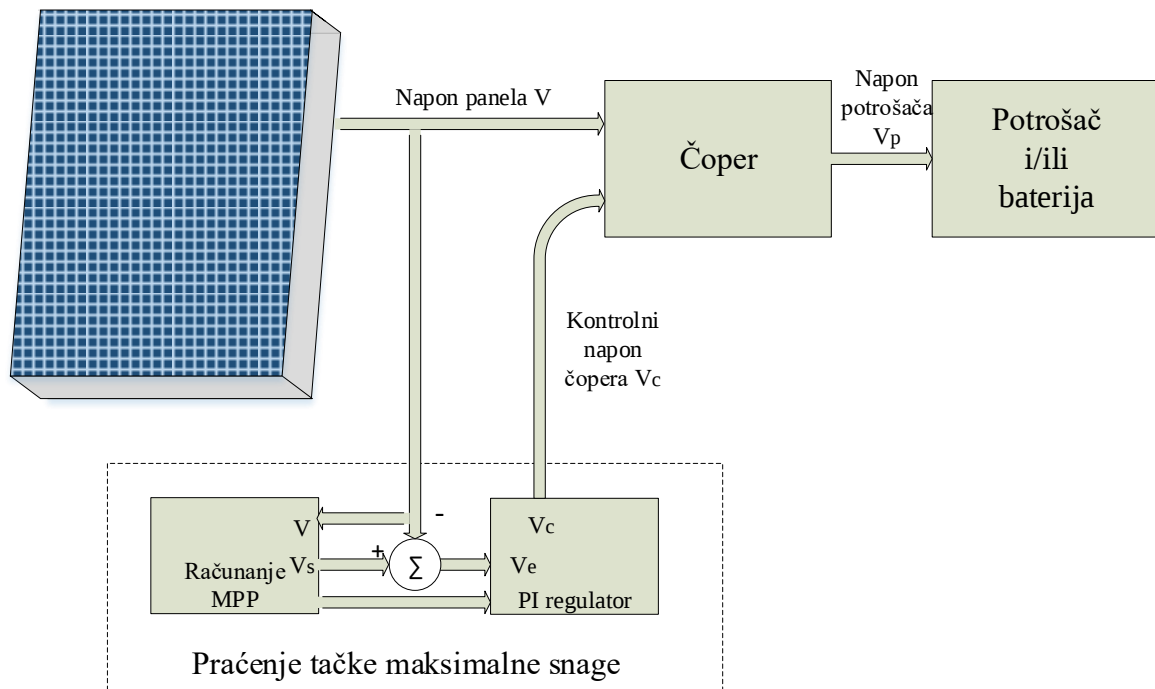
$$i(t) = f(t). \quad (2.11)$$

Prema tome, snaga panela se može zapisati kao:

$$p(t) = v(t)i(t) = v(t)f(t). \quad (2.12)$$

Maksimalna snaga solarnog panela određuje se izjednačavanjem izvoda snage po vremenu sa nulom:

$$\frac{dp(t)}{dt} = v(t) \frac{df(t)}{dt} + f(t) \frac{dv(t)}{dt} = 0. \quad (2.13)$$



Slika 2.9. Šematski prikaz *Current sweep metode*

U cilju pojednostavljanja prethodne relacije, vremenski promjenljiva funkcija može da se definiše da je direktno proporcionalna svom izvodu:

$$f(t) = k_3 \frac{df(t)}{dt}, \quad (2.14)$$

gdje je k_3 konstanta proporcionalnosti. Rješenje ove diferencijalne jednačine se zapisuje u obliku:

$$f(t) = k_4 \cdot e^{\frac{t}{k}}. \quad (2.15)$$

Konstantu k_4 je potrebno izabrati da bude jednaka maksimalnoj struji panela (struja kratkog spoja I_{KS}), dok se za konstantu k uzima negativna vrijednost kako bi rješenje prethodne relacije bila opadajuća eksponencijalna funkcija sa vremenskom konstantom $\tau = -k$:

$$f(t) = I_{KS} e^{\frac{-t}{\tau}}. \quad (2.16)$$

Uvrštanjem jednačine (2.14) u (2.13) dobija se:

$$\frac{dp(t)}{dt} = \left(k_3 \frac{dv(t)}{dt} + v(t) \right) \frac{df(t)}{dt} = 0. \quad (2.17)$$

Pretpostavljajući da izvod $f(t)$ nije jednak nuli u opsegu vremenski promjenljive funkcije, jednačinu (2.17) je moguće podijeliti sa $df/dt = di/dt$ da bi se odredilo dp/di :

$$\frac{dp}{di} = k_3 \frac{dv(t)}{dt} + v(t). \quad (2.18)$$

Iz posljednje relacije se vidi da određivanje tačke maksimalne snage, prikazano jednačinom (2.17), je moguće ukoliko je poznat napon panela i njegov izvod, uz postavljanje uslova:

$$k_3 \frac{dv(t)}{dt} + v(t) = 0. \quad (2.19)$$

Current sweep metoda se implementira korištenjem analogne komputacije. Ova metoda se odvija svakih 50 ms što dovodi do određenog gubitka dostupne snage. Metod je izvodljiv ukoliko je potrošnja snage koja se utroši za praćenje manja od mogućeg povećanja snage koje može dobiti cijeli sistem uvođenjem ove metode, [44].

U nastavku je data tabela u kojoj su komparirane prethodno opisane metode. Za analizu je posmatrano: da li algoritam može da pronađe stvarnu tačku maksimalne snage, brzina ulaska u konvergentno stanje, kompleksnost implementacije algoritma, kao i potrebni senzori za realizaciju algoritma.

Tabela 2.2. *Prikaz algoritama*

<i>MPPT algoritam</i>	<i>Stvarni maksimum</i>	<i>Brzina konvergencije</i>	<i>Kompleksnost implementacije</i>	<i>Potrebni senzori</i>
P&O	Da	Varira	Niska	Naponski, strujni
IC	Da	Varira	Srednja	Naponski, strujni
Metod konstantnog napona	Ne	Srednja	Niska	Naponski
Metod konstantne struje	Ne	Srednja	Srednja	Strujni
Current Sweep	Da	Spora	Velika	Naponski, strujni

Glava 3.

PRIJEDLOG ALGORITAMA ZA PRAĆENJE TAČKE MAKSIMALNE SNAGE

3.1. Prijedlog algoritma za praćenje tačke maskimalne snage u slučaju nagle promjene solarne iradijacije

Kod konvencionalnih algoritama (P&O) korak promjene je fiksiran. Ako za korak promjene uzmemo veliku vrijednost, ona će uzrokovati veliku promjenu napona, što doprinosi pojavi velikih oscilacija. Međutim, što je veća promjena, algoritam brže dođe u tačku maksimalne snage. Prema tome, potrebno je pronaći optimalan korak promjene napona jer relativno mali korak uzrokuje sporo pronalaženje tačke maksimalne snage što može uzrokovati velike gubitke u proizvodnji energije pri bržim promjenama Sunčevog zračenja, ali u isto vrijeme smanjuje oscilacije oko tačke maksimalne snage. Relativno veliki korak osigurava brže pronalaženje tačke maksimalne snage, ali može uzrokovati velike oscilacije oko tačke maksimalne snage, što takođe dovodi do gubitka u proizvodnji električne energije, [26].

Kako bi se smanjile oscilacije oko tačke maksimalne snage i poboljšala brzina dolaska u istu, nekoliko rješenja je ponuđeno. Rješenja se baziraju na korišćenju promjenljivog koraka. Jedno od njih je ponuđeno u literaturi [52], gdje se promjenljivi korak mijenja u obliku:

$$\Delta V_{n+1} = N \frac{\Delta P_n}{\Delta V_n}, \quad (3.1)$$

gdje je N skalirajuća konstanta, a ΔP i ΔV promjena snage, odnosno, napona, respektivno. U literaturi [53], predloženo je da se promjenljivi korak mijenja u zavisnosti od odnosa promjene snage i promjene faktora popunjenosti:

$$\Delta V_{n+1} = N \frac{\Delta P_n}{\Delta D_n}, \quad (3.2)$$

gdje je ΔD promjena faktora popunjenosti. Konstantu N definiše korisnik i ona zahtijeva podešavanje. Takođe, u cilju postizanja konvergencije, skalirajuću konstantu je potrebno

ograničiti, kao što je prezentovano u pomenutim radovima.

Mane navedenih rješenja su vidljive u slučaju pojave nagle promjene solarne iradijacije. Ukoliko dođe do naglog povećanja iradijacije promjena snage postaje velika, dok promjena napona ostaje mala. Analogno je i za drugi slučaj koji uzima u obzir promjenu faktora popunjenosti. Kako razlomak trenutno poprima veliku vrijednost, dovešće do kratkotrajnog „zbunjivanja” algoritma u pokušaju praćenja tačke maksimalne snage. Uvođenjem logaritamske funkcije je pokušano da se otkloni navedeni problem, [54]:

$$\Delta V_{n+1} = \log_{10} \left(\frac{\Delta P_n}{\Delta V_n} \right), \quad (3.3)$$

čime se postižu boljih rezultata u odnosu na prethodno pomenuta rješenja.

U radovi [55]–[57] su predloženi adaptivni algoritmi kojima se postiže poboljšanje u slučaju pojave nagle promjene solarne iradijacije, ali za njihovu realizaciju su potrebni dodatni senzori, što uzrokuje povećanje troškova same izvedbe.

U cilju poboljšanja dolaska radne tačke u tačku maksimalne snage, a u istom trenutku smanjivanja oscilacija i prevazilaženja prethodnih rješenja, u ovom radu je opisan algoritam koji se bazira na promjenljivom koraku promjene napona, [58]. Predloženi promjenljivi korak sastoji se iz dva člana. Prvi član sadrži faktor zaboravljanja, koji služi za „zaboravljanje“ određenog dijela vrijednosti prethodnog koraka, dok drugi član predstavlja opšte poznat odnos promjene snage i promjene napona, skaliran konstantom:

$$\Delta v_{n+1} = \beta \cdot \Delta v_n + \gamma \cdot \left| \frac{\Delta P_n}{\Delta V_n} \right|, \quad (3.4)$$

gdje je Δv_{n+1} promjenljivi korak, Δv_n vrijednost promjenljivog koraka u prethodnoj iteraciji, ΔP_n promjena snage, ΔV_n promjena napona, β faktor zaboravljanja i γ konstanta. Faktor zaboravljanja smanjuje uticaj starijih podataka, to jest prethodno dobijenih vrijednosti. Uzima se određeni procenat prethodnog promjenljivog koraka, koji pomaže u estimaciji novih podataka. Faktor zaboravljanja može imati bilo koju vrijednost iz opsega [0-1]. Toj vrijednosti se dodaje razlomak $\Delta P_n / \Delta V_n$, koji je zbog sprečavanja dostizanja velike vrijednosti, skaliran konstantom γ . Konstanta γ se određuje eksperimentalno, kao i u radovima [52], [53].

Takođe, algoritam se sastoji od još jednog uslova koji služi za provjeru da li je došlo do nagle promjene u solarnoj iradijaciji. Uzeto je u obzir da prilikom svakog povećanja ili smanjenja solarne iradijacije više od 100 W/m^2 dođe do prepodešavanja koraka, odnosno, postavljanja na neku fiksnu, veću vrijednost u cilju bržeg dolaženja do željenog stanja. Da bismo odredili iradijaciju potreban nam je još jedan senzor, što povećava ekonomske potrebe za realizacijom ovog algoritma. U tom cilju, kako bi se dodatni senzor izbjegao, uzima se aproksimacija da je struja proporcionalna iradijaciji. Dakle, ukoliko dođe do promjene iradijacije, doći će i do promjene vrijednosti struje:

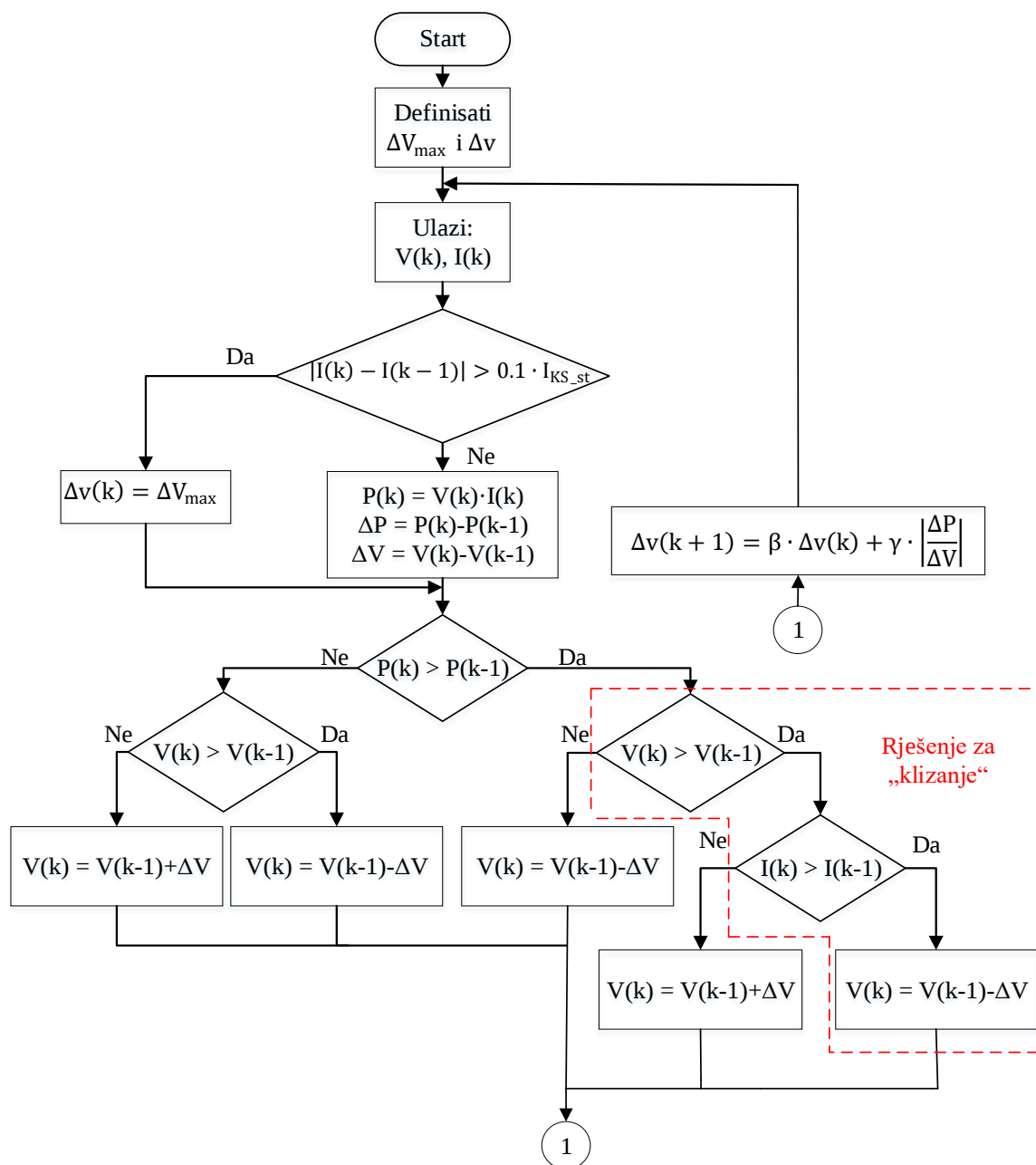
$$I(k) - I(k - 1) > 0.1 \cdot I_{KS_st}, \quad (3.5)$$

ili

$$I(k-1) - I(k) > 0.1 \cdot I_{KS_st} . \quad (3.6)$$

gdje su $I(k)$ i $I(k-1)$ vrijednosti struje u trenutnoj i prethodnoj iteraciji, respektivno, dok je I_{KS_st} struja kratkog spoja pri iradijaciji od 1000 W/m^2 .

Treći nedostatak, „klizanje“ radne tačke prilikom potrage za novim maksimumom, otklonjen je korišćenjem rješenja prikazanog u [48]. Problem je riješen dodavanjem još jednog uslova za struju kada su promjena snage i promjena napona pozitivne. U nastavku je prikazan blok dijagram predloženog algoritma.



Slika 3.1. Blok dijagram predloženog algoritma

U prvom koraku potrebno je definisati početni korak, maksimalni mogući korak, konstante β i γ , kao i početnu vrijednost napona, struje i snage radne tačke. Nakon mjerenja

napona i struje, vrši se provjera da li je došlo do nagle promjene solarne iradijacije. Ukoliko jeste, korak se postavlja na prethodno definisanu maksimalnu vrijednost. Nakon izvršene provjere da li je došlo do nagle promjene u solarnom ozračenju, provjerava se da li je promjena snage posljednje iteracije u odnosu na prethodnu pozitivna ili negativna. U slučaju da je pozitivna, onda se posmatra promjena napona u posljednje dvije iteracije. Ako je promjena napona pozitivna, kod konvencionalnog algoritma bi došlo do uvećanja napona što bi doprinijelo „klizanju“ radne tačke. To je eliminisano dodavanjem još jednog uslova koji provjerava promjenu struje. Za pozitivnu promjenu struje napon se umanjuje, dok za negativnu promjenu struje napon se uvećava i na ovaj način se prevazilazi problem klizanja. Pri negativnoj promjeni napona, napon u sljedećoj iteraciji će biti umanjen.

Kada je promjena snage negativna, za negativnu promjenu napona doći će do uvećanja napona u sljedećoj iteraciji, dok za pozitivnu vrijednost promjene napona isti će biti umanjen za promjenljiv korak. Nakon definisanja pozicije radne tačke u narednoj iteraciji, vrši se proračun promjenljivog koraka za naredni slučaj.

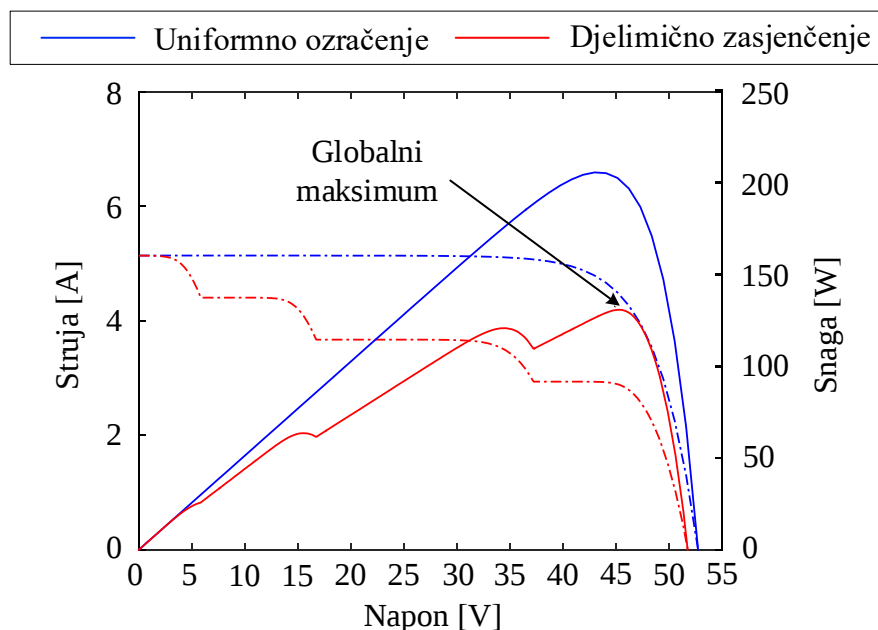
Promjenljivi korak je moguće implementirati u kombinaciji sa P&O ili IC algoritmom. U ovom slučaju on je implementiran kod P&O algoritma i u glavi 4 su prikazana njegova poređenja sa postojećim algoritmima.

3.2. Prijedlog algoritma za praćenje tačke maksimalne snage pri pojavi djelimične zasjenčenosti solarnog panela

Pored nagle promjene solarne iradijacije, drugi problem koji konvencionalne metode ne mogu da riješe je pojava djelimične zasjenčenosti solarnog panela. Djelimična zasjenčenost je pojava kada solarni panel registruje različite vrijednosti solarne iradijacije u istom trenutku. Sve dok je prisutna zasjenčenost, P-V karakteristika solarnog panela se sastoji iz više maksimuma i konvencionalne metode nisu u mogućnosti da odrede koji je maksimum lokalni, a koji globalni. U slučaju pojave ovog fenomena, konvencionalne metode će radnu tačku pomjeriti do prvog maksimuma koji pronađu i njega će proglasiti globalnim. Radna tačka solarnog panela će ostati u toj poziciji dok se ne dogodi sljedeća promjena u atmosferskim uslovima. Na slici 3.2. je prikazana V-I i P-V karakteristika pri uniformnoj solarnoj iradijaciji i pri pojavi djelimične zasjenčenosti.

Postoji mnoštvo radova u kojim su predloženi algoritmi koji prevazilaze navedeni problem. U radu [59] Distributivni MPPT (DMPPT) algoritam je predložen. Svaki solarni panel je povezan na konvertor u kojem se implementira konvencionalni P&O algoritam i na kraju se izlazna snaga svakog čopera sumira i dobija se kumulativna snaga cijelog sistema. Svaki konvertor radi sa određenim gubicima u snazi. Povećanje broja konvertora dovodi do povećanja gubitka snage u cijelom sistemu, kao i povećanje troškova njegove izvedbe. U radovima [60], [61] su predloženi dvodjelni metod, odnosno metod koji koristi Fibonačijevu sekvencu u cilju praćenja maksimuma, ali one ne mogu da obezbijede radnoj

tački da konvergira ka globalnom maksimumu u svim slučajevima. Algoritam u [62] koristi dodatne senzore, čime se povećavaju troškovi realizacije.



Slika 3.2. *P-V i V-I karakteristike pri nagloj promjeni solarne iradijacije i pri djelimičnoj zasjenčenosti*

Takođe, mana nekih algoritama je nemogućnost da pouzdano odrede da li je došlo do pojave djelimične zasjenčenosti solarnog sistema. Jedan takav scenario je opisan u radu [63]. Da bi se otklonio ovaj nedostatak, u literaturi [64] je predložen metod kojim se egzaktno određuje da li je došlo pojave zasjenčenja. Metod se bazira na proračunu solarne iradijacije u dvije tačke – tački kratkog spoja i tački maksimalne snage. Predloženi algoritam ne zahtijeva upotrebu dodatne opreme.

U ovom poglavlju će biti opisan predloženi algoritam koji predstavlja kombinaciju tri metode: detekcija pojave djelimičnog zasjenčenja, metod za pronalaženje globalnog maksimuma i algoritma za smanjivanje oscilacija oko maksimuma, [65].

3.2.1. Metod za detekciju pojave djelimičnog zasjenčenja

Metod za detekciju pojave zasjenčenja je predložena u [64]. Bazira se na posmatranju V-I karakteristike. Uzimajući u obzir da je struja solarnog panela proporcionalna solarnoj radijaciji, metod se sastoji od poređenja vrijednosti struje u dvije različite tačke – struji kratkog spoja i tački maksimalne snage. Na osnovu rada [60], može se definisati da struja kratkog spoja se nalazi na oko 80% napona praznog hoda jednog solarnog modula, dok struja u tački maksimalne snage odgovara naponu koji je približno jednak 80% napona niza solarnih modula. U ovim tačkama moguće je aproksimativno odrediti nivo solarne iradijacije tako što struju u prvoj tački podijelimo sa strujom kratkog

spoja I_{KS_st} , dok struju u drugoj tački podijelimo sa vrijednošću struje u tački maksimalne snage I_{MPP_st} . Vrijednosti I_{KS_st} i I_{MPP_st} su određene pri standardnim uslovima – pri solarnoj iradijaciji od 1000 W/m^2 i pri temperaturi od $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Jednačine za dobijanje aproksimativne vrijednosti solarne iradijacije su:

$$G_1 = \frac{I_{KS}}{I_{KS_st}} G_{st} , \quad (3.7)$$

$$G_2 = \frac{I_{MPP}}{I_{MPP_st}} G_{st} . \quad (3.8)$$

Testiranjem modula različitih konfiguracija i napravljenih od različitih materijala došlo se do zaključka da pri odstupanju proračunatih aproksimativnih vrijednosti solarnih iradijacija većem od 40 W/m^2 dolazi do detekcije zasjenčenosti:

$$|G_1 - G_2| > 40, \quad (3.9)$$

gdje je G_1 aproksimativna vrijednost solarnog ozračenja u tački kratkog spoja, a G_2 aproksimativna vrijednost ozračenja u tački maksimalne snage. Može se zaključiti da uniformna solarna iradijacija preovladava kada je razlika manja od 40 W/m^2 .

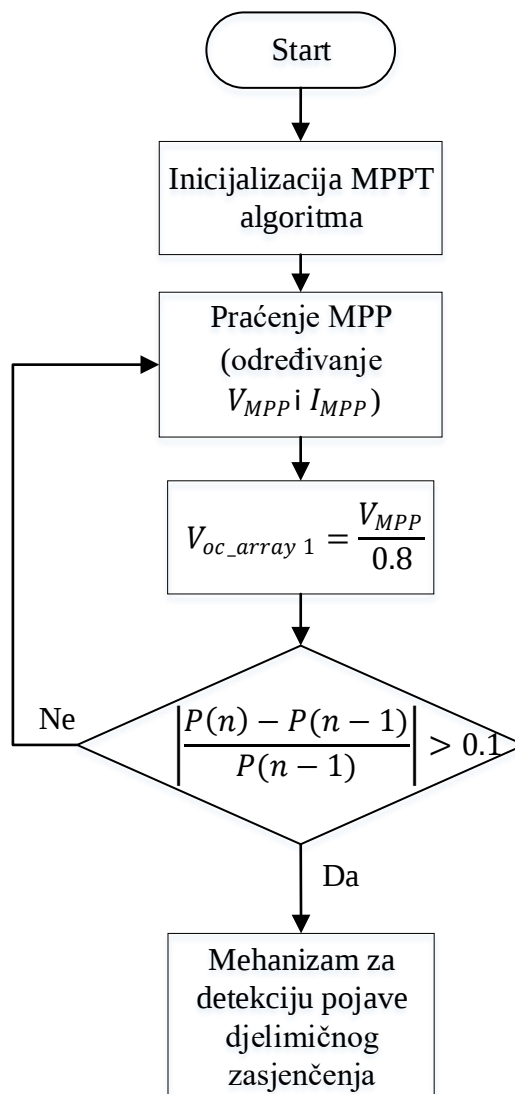
Sa promjenom solarne iradijacije dolazi i do promjene ukupnog napona cijelog sistema. U cilju preciznijeg određivanja vrijednosti iradijacije u ove dvije tačke, potrebno je vršiti ažuriranje vrijednosti napona niza modula na sljedeći način:

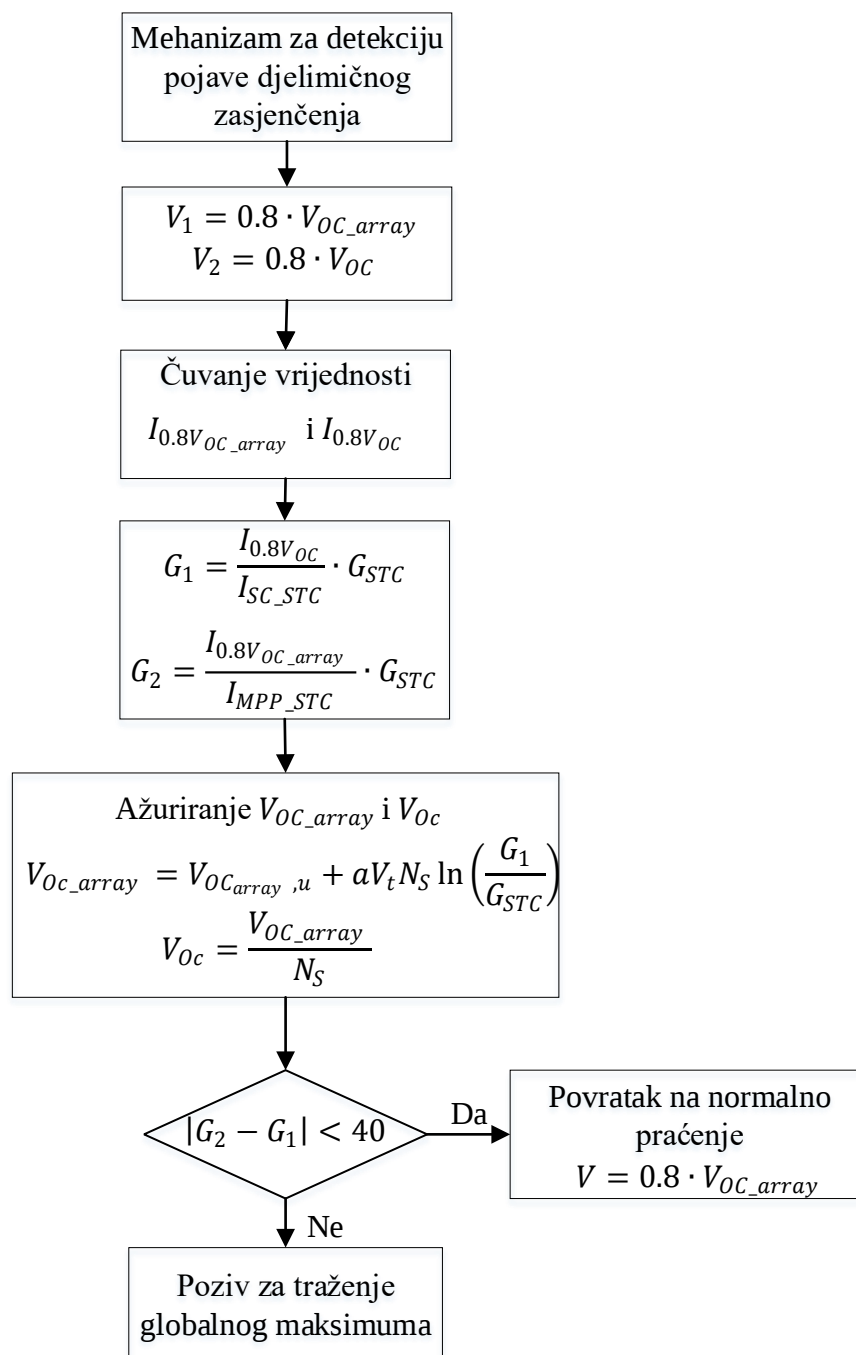
$$V_{PH_niz} = V_{PH_{niz,u}} + \alpha V_t N_s \ln \left(\frac{G_1}{G_{st}} \right), \quad (3.10)$$

gdje su $V_{PH_{niz,u}}$ napon praznog hoda cijelog niza, $V_{PH_{niz,u}}$ napon praznog hoda niza pri uniformnoj solarnoj iradijaciji, α faktor kvaliteta ćelije, V_t termalni napon, N_s broj redno vezanih modula, G_1 solarna iradijacija u tački kratkog spoja, G_{st} solarna iradijacija pri standardnim uslovima.

Napon praznog hoda niza modula pri uniformnoj ozračenosti se računa polazeći od pretpostavke da tačka maksimalne snage se nalazi na 80% napona niza. Napon praznog hoda jednog solarnog modula je moguće odrediti dijeljenjem napona niza sa brojem redno povezanih modula.

Na sljedećoj slici je prikazan šematski blok dijagram metode za detekciju pojave djelimičnog zasjenčenja.





Slika 3.3. Blok dijagram za detekciju djelimičnog zasjenčenja

3.2.2. Mehanizam za traženje tačke maksimalne snage

Većina postojećih mehanizama za traženje tačke maksimalne snage polazi od činjenice da tačka maksimalne snage leži na 80% naponu praznog hoda. Analogno, pomenuti mehanizmi pretpostavljaju i da se lokalni maksimumi aproksimativno nalaze na 80% naponu praznog hoda modula. Na osnovu prethodno navedene pretpostavke, ovi

mehanizmi pronalaze lokalne maksimume koje upoređuju i određuju globalni maksimum. U slučajevima kada je veći broj modula ozračen istom količinom solarne iradijacije, prethodno tvrđenje nije tačno, kako je i prezentovano u radu [66]. Prema tome, u cilju pronalaženja lokalnih maksimuma potrebno je uspostaviti odnos između napona lokalnog maksimuma i napona praznog hoda. Relacija je predložena u [66] i kasnije modifikovana u radu [67] do konačnog oblika:

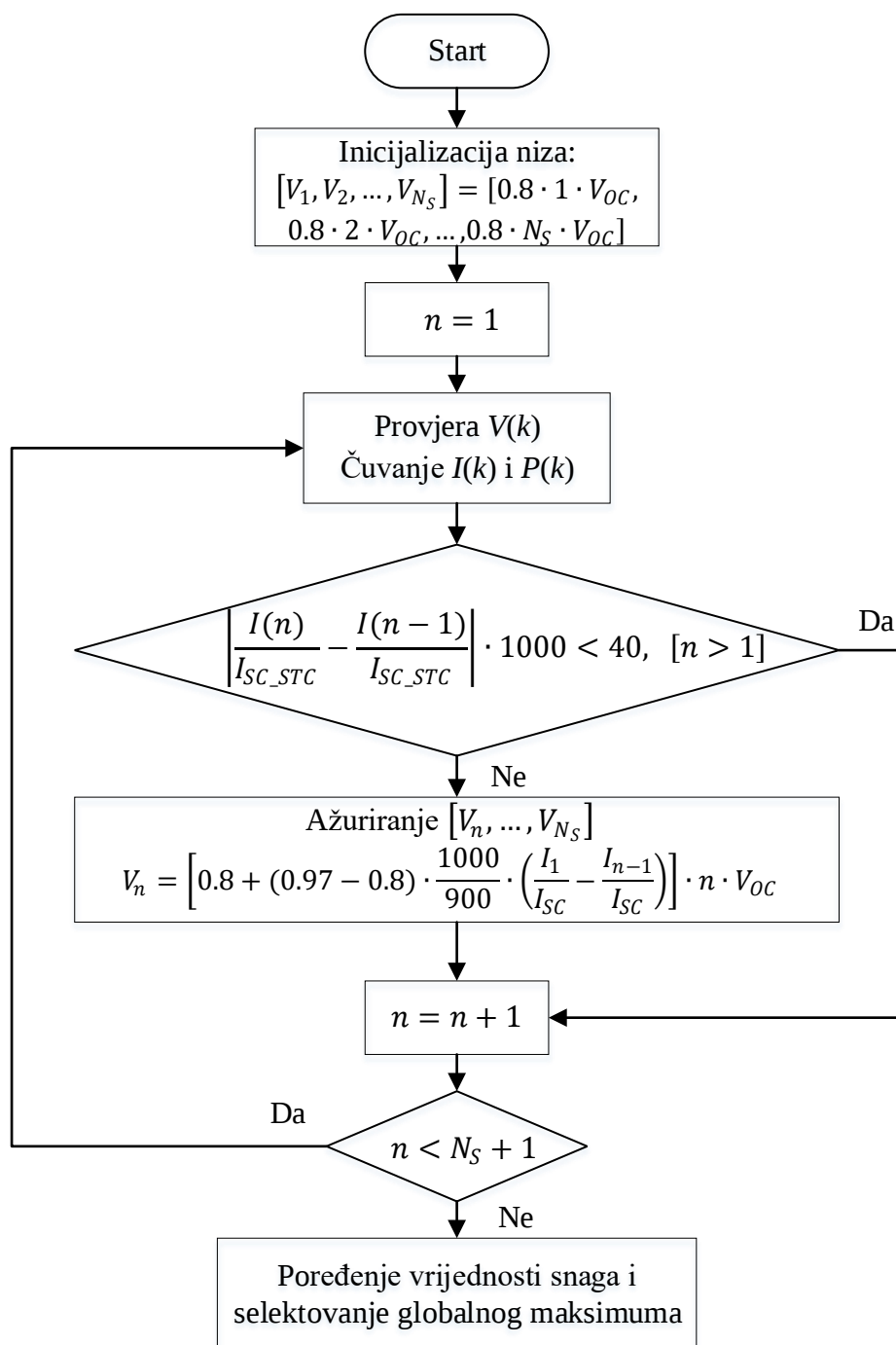
$$V_n = \left[0.8 + (0.97 - 0.8) \cdot \frac{1000}{900} \cdot \left(\frac{I_1 - I_{n-1}}{I_{KS_st}} \right) \right] \cdot n \cdot V_{PH}, \quad (3.11)$$

gdje su V_n , I_1 , I_{n-1} , I_{KS_st} , n , V_{PH} napon lokalnog maksimuma, struja u tački kratkog spoja, struja u prethodnoj iteraciji, struja pri standardnim uslovima, broj modula, napon praznog hoda jednog modula, respektivno.

Princip traženja tačke globalnog maksimuma je sljedeći:

- 1) Definirati niz čiji su elementi $i \cdot V_{PH}$, $i = 1, \dots, n$. Dužina novog niza biće jednaka broju redno vezanih modula N_S .
- 2) Izvršiti komparaciju vrijednosti iradijacije u prethodne dvije iteracije. Ako je uslov djelimične zasjenčenosti zadovoljen, novi lokalni maksimum se nalazi u blizini i dolazi do ažuriranja njegovog napona. U suprotnom, uzima se sljedeći element iz niza definisanog pod 1) i ispituje se za iste uslove. Procedura traje dok se svaki član novodefinisanog niza ispita.
- 3) Na kraju preostaje da se lokalni maksimumi uporede i da se od njih proglasi globalni maksimum.

Kada se odredi aproksimativna pozicija globalnog maksimuma tada dolazi do aktivacije metode za smanjivanje oscilacija oko tačke maksimalne snage, koja je prikazana u sljedećem potpoglavlju.



Slika 3.4. Šema mehanizma za traženje tačke maksimalne snage

3.2.3. Smanjenje oscilacija oko tačke maksimalne snage

Treći dio algoritma predstavlja modifikovani P&O metod sa promjenljivim korakom koji je predložen u prethodnoj glavi. Kako je opisano, promjenljivi korak se sastoji iz dva člana. Prvi član uzima određenu procentualnu vrijednost promjene napona iz prethodnih iteracija. Konstanta korišćena u prvom članu je poznata pod nazivom faktor zaboravljanja. Drugi član uključuje promjene snage i napona u prethodne dvije iteracije. U stacionarnom

stanju pomenute promjene postaju manje, što doprinosi smanjivanju vrijednosti promjenljivog koraka. Na kraju, ovaj metod dovodi do pronalaska stvarnog maksimuma s jakim malim oscilacijama oko istog.

U cilju postizanja brže konvergencije, odnosno bržeg dolaska u tačku maksimalne snage, algoritmu je dodat i uslov kojim se vrši provjera da li je došlo do nagle promjene solarne iradijacije. Uslov uzima u obzir vrijednosti struje u posljednja dva koraka i na osnovu njih vrši provjeru da li je došlo do nagle promjene. Kada je nagla promjena registrovana, promjenljivi korak se predefiniše na njegovu maksimalnu vrijednost. Takođe, maksimalna vrijednost je definisana da bi se osigurala stabilnost cijelog sistema.

Na kraju, potrebno je naglasiti da predloženi algoritam predstavlja rješenje za oba slučaja u kojem konvencionalne metode pokazuju svoje nedostatke: pojava nagle promjene solarne iradijacije i pojava djelimične zasjenčenosti.

Glava 4.

REZULTATI SIMULACIJA

4.1. Komparativna analiza predloženog algoritma u slučaju nagle promjene solarne iradijacije sa postojećim algoritmima

Predloženi algoritam je upoređen sa modifikacijama P&O i IC algoritama prikazanih u radovima [28] i [68], respektivno. Komparacija algoritama je izvršena posmatranjem stepena efikasnosti algoritama ponaosob. Efikasnost algoritama je računata po formuli:

$$\eta = \int \frac{P(t)dt}{P_{MPP}(t)dt} = \int \frac{V(t)I(t)dt}{V_{MPP}(t)I_{MPP}(t)dt}, \quad (4.1)$$

gdje P predstavlja snagu na izlazu PV panela, dok P_{MPP} predstavlja teorijsku, maksimalnu vrijednost snage na izlazu iz panela. U ovoj analizi, poređenje algoritama je izvršeno kada dođe do nagle promjene u solarnoj iradijaciji, a pri konstantnoj temperaturi od 25 °C. Na ulazu PV panela doveden je pravougaoni signal, kojim je simulirano ponašanje iradijacije, koja je svoju vrijednost mijenjala od 400 W/m² do 800 W/m² i obrnuto.

U radu, pored predloženog algoritma, simulirani su konvencionalni P&O, kao i njegova modifikacija predložena u radu [28]. Modifikovani algoritam, opisan u tom radu, smanjuje oscilacije, omogućava algoritmu da brzo dođe u blizini MPP. Takođe, u poređenje su uključeni konvencionalni IC algoritam i njegovo poboljšanje opisano u radu [68]. U radu [68] IC je baziran na promjeni struje, dok je ovdje izvršeno prepodešavanje napona, kako bi se moglo izvršiti adekvatno poređenje algoritama.

Solarni panel korišten u ovoj analizi je proizvod kompanije „Kyocera“ i njegove karakteristike je moguće vidjeti u tabeli 4.1.

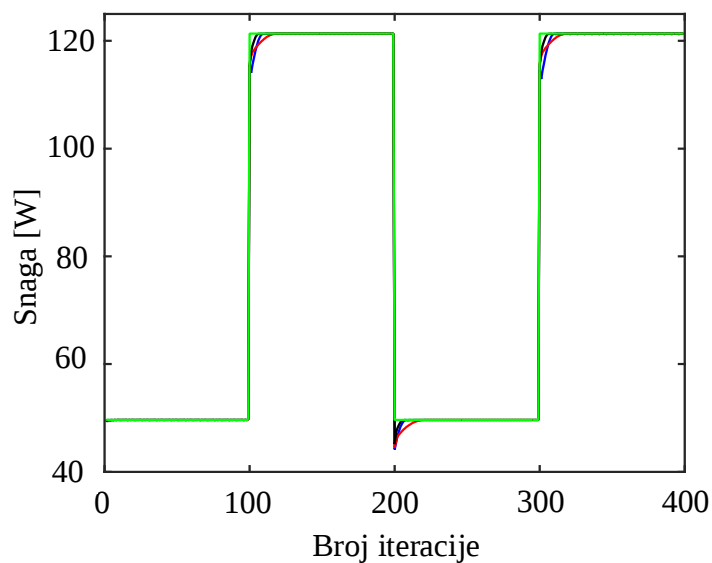
Kod predloženog algoritma, faktora zaboravljanja β i konstanta γ su određene eksperimentalnim putem. Vrijednosti β i γ , pri kojima algoritam radi optimalno, su 0.6 i 0.15, respektivno, [58].

Na slici 4.1. grafički je prikazano poređenje navedenih algoritama, dok u tabeli 2 moguće je vidjeti njihove stepene iskorišćenja. Na osnovu stepena efikasnosti se može zaključiti da je najbolje rezultate ostvario predloženi algoritam.

Tabela 4.1. Kyocera KC200GT solarni panel [69]

Parametri	Oznaka	Vrijednost
Struja kratkog spoja	I_{KS}	8.21 A
Napon praznog hoda	V_{PH}	32.9 V
Struja u MPP	I_{MPP}	7.61 A
Napon u MPP	V_{MPP}	26.3 V
Maksimalna snaga	P_{MAX}	200 W
V_{PH} temperaturni koef.	K_V	$-1.23 \cdot 10^{-1} V/^{\circ}C$
I_{KS} temperaturni koef.	K_I	$3.18 \cdot 10^{-3} A/^{\circ}C$
Broj redno vezanih ćelija u modulu	N_S	54
Broj paralelno vezanih ćelija u modulu	N_P	1

— modIC — modP&O — Predloženi — MPP



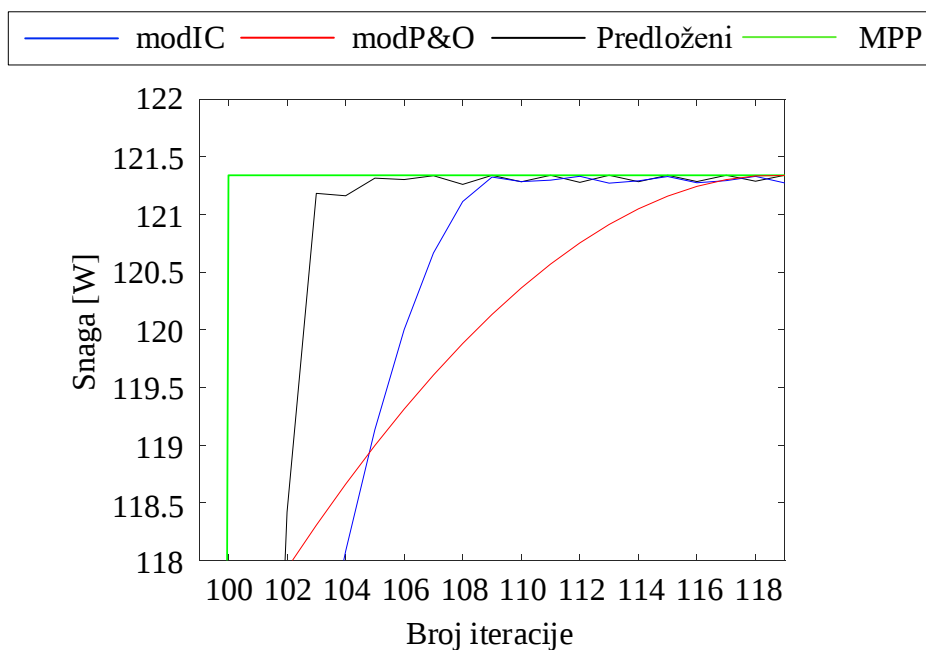
Slika 4.1. Izlazna snaga analiziranih metoda

Tabela 4.2. Efikasnost prikazanih algoritama

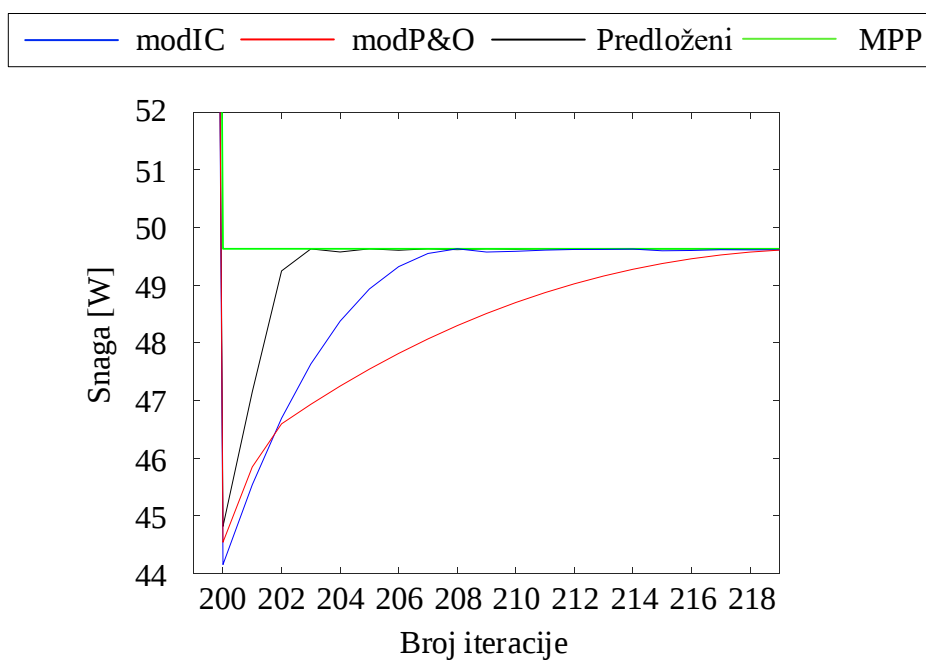
Algoritam	η [%]
P&O	99.28
IC	99.28
modP&O [5]	99.73
modIC [19]	99.72
Predloženi	99.89

Slike 4.2. i 4.3. prikazuju sposobnost algoritama da se priviknu novonastalim promjenama. Na slici 4.2. vidljivo je da prilikom naglog povećanja solarne iradijacije predloženi algoritam je već nakon 3 iteracije doveo radnu tačku u blizini tačke maksimalne snage dok modifikovanim IC i P&O algoritimima je potrebno 8, odnosno, 15 iteracija. Takođe, i u slučaju naglog smanjenja solarne iradijacije, predloženi algoritam se brže

adaptira novoj situaciji. I u drugom slučaju za pronalazak tačke maksimalne snage predloženom algoritmu su potrebne 3 iteracije, dok algoritmima, sa kojima je izvršena komparacija, je potrebno 7, odnosno, 17 iteracija. Navedeni slučaj je grafički prikazan na slici 4.3.

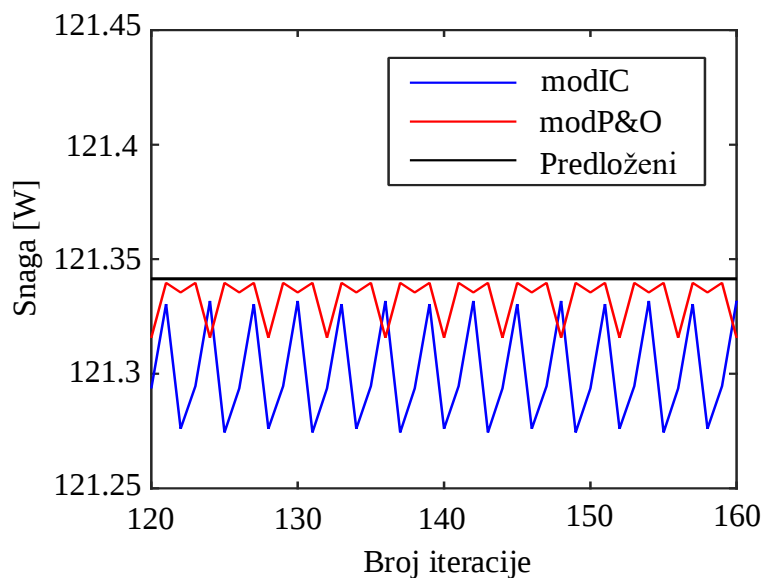


Slika 4.2. Izlazna snaga usljed naglo povećanja solarne iradijacije

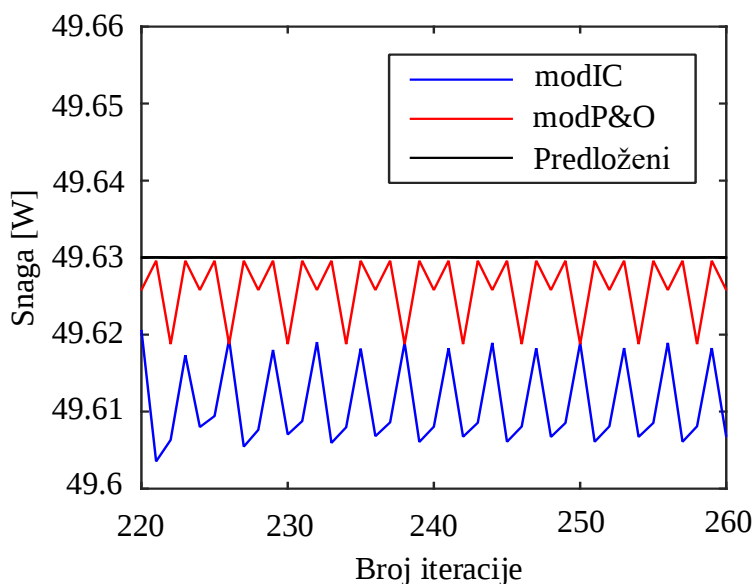


Slika 4.3. Izlazna snaga usljed naglog smanjenja solarne iradijacije

Prednosti predloženog algoritma su prikazane i na slici 4.4. Na slici 4.4. a) i b) su prikazana stacionarna stanja pri solarnim iradijacijama od 800 W/m^2 i 400 W/m^2 . U oba slučaja je vidljivo da su oscilacije predloženog algoritma oko MPP najmanje. U stacionarnom stanju predloženi algoritam radnu tačku dovodi do skoro potpunog poklapanja sa teorijskom MPP.

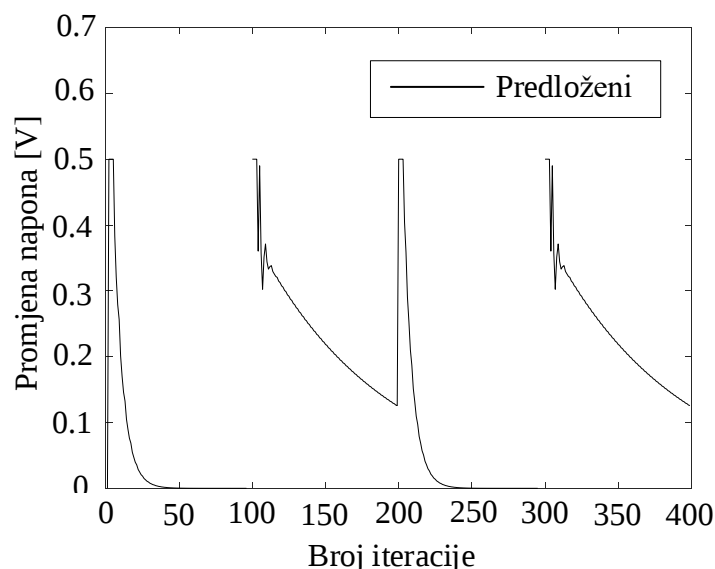


(a) $S = 800 \text{ W/m}^2$, $P_{\text{MPP}} = 121.34 \text{ W}$



(b) $S = 400 \text{ W/m}^2$, $P_{\text{MPP}} = 49.63 \text{ W}$

Slika 4.4. Izlazna snaga u stacionarnim stanjima



Slika 4.5. Grafički prikaz promjenljivog koraka predloženog algoritma

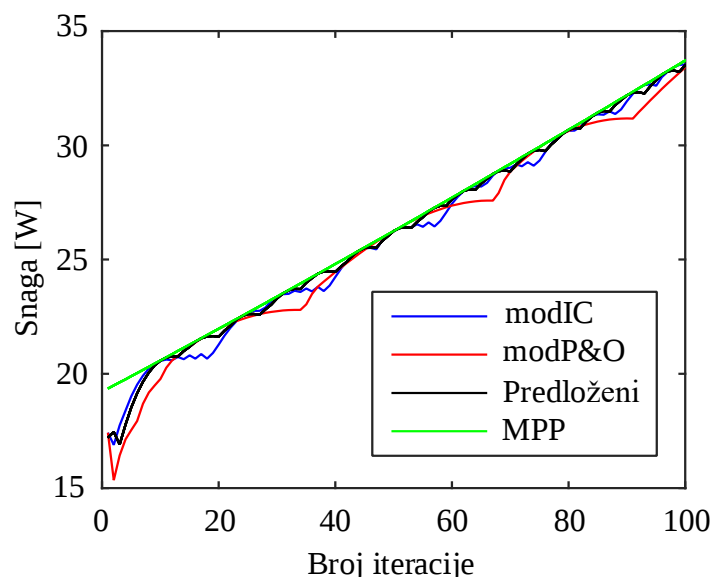
Na slici 4.5. su prikazane promjene promjenljivog koraka predloženog algoritma. Vidljivo je da pri iteraciji broj 100, slučaj naglog povećanja solarne iradijacije, i pri iteraciji broj 200, slučaj naglog smanjenja solarne iradijacije, promjenljivi korak dobija maksimalnu moguću vrijednost, odnosno, algoritam teži da što prije dođe u novu poziciju maksimalne snage. Maksimalni promjenljivi korak je definisan na vrijednost 0.5 kako bi se očuvala stabilnost sistema. U narednim iteracijama se vrijednost promjenljivog koraka smanjuje, kako se algoritam približava MPP-u, što doprinosi daljem smanjenju oscilacija oko MPP-a.

Takođe, algoritmi su testirani i u slučaju konstantnog porasta iradijacije od $1 \text{ W/m}^2/\text{s}$. Konstant rast iradijacije je simuliran pomoću rampa funkcije. Ista vrijednost za faktor zaboravljanja je korišćena kao i prilikom prvog eksperimenta, dok je konstanta γ eksperimentalno definisana na vrijednost 0.6. I u ovom eksperimentu, predloženi algoritam je postigao najbolje rezultate, tj. najbrže je konvergirao ka MPP. Sa slike 4.6. je vidljivo da modifikovanom algoritmu treba određeno vrijeme da se prilagodi izloženim promjenama. U tabeli 3. prikazana je efikasnost algoritama u predstavljenom slučaju. Treba zapaziti da predloženi algoritam i u ovom slučaju postiže najbolju efikasnost, $\eta = 99.70\%$.

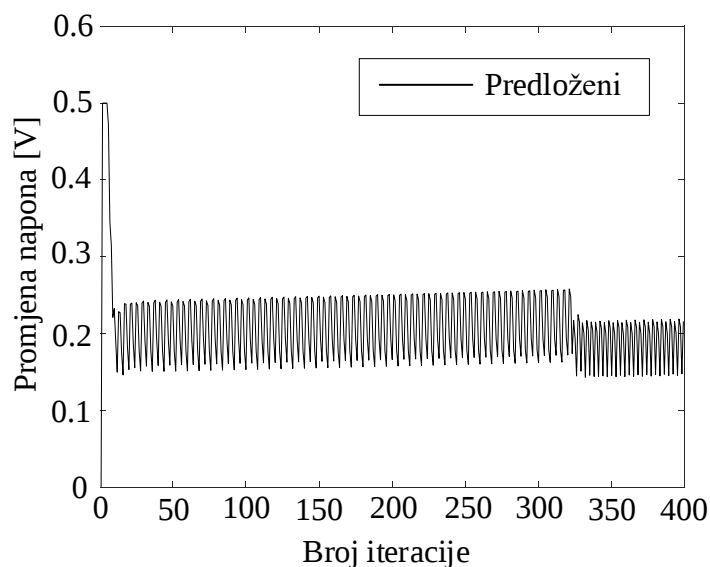
Tabela 4.3. Efikasnost algoritama u drugom eksperimentu

Algoritam	modIC	modP&O	Predloženi
$\eta[\%]$	99.58	99.22	99.70

Na slici 4.7. je grafički prikazano ponašanje promjenljivog koraka predloženog algoritma. U ovom primjeru je vidljivo da su promjene promjenljivog koraka konstantne zbog konstantne promjene solarne iradijacije za istu vrijednost.



Slika 4.6. Izlazna snaga prilikom konstantne promjene solarnog ozračenja



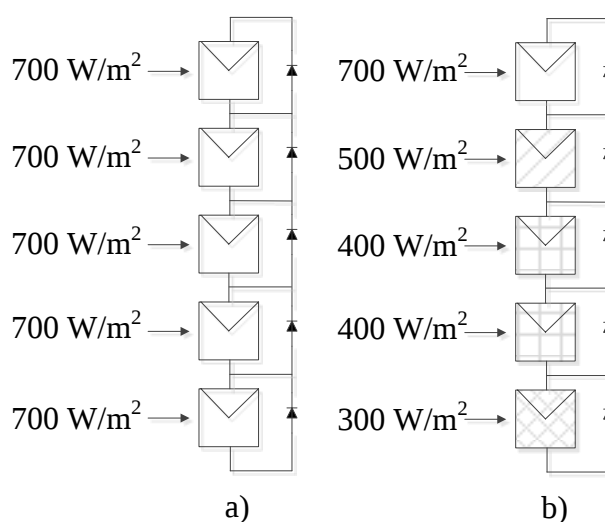
Slika 4.7. Grafički prikaz predloženog algoritma u drugom eksperimentu

4.2. Komparativna analiza predloženog algoritma u slučaju djelimičnog zasjenčenja PV panela sa postojećim algoritmima

Algoritam predložen u prethodnoj glavi (poglavlje 3.2.), [65], je upoređen sa rješenjem predloženim u radu [70] (PS-P&O). Algoritmi su testirani u dvije različite situacije i njihove performanse su upoređenje uzimajući u obzir definiciju teorijske efikasnosti predstavljenu u prethodnom potpoglavlju.

U oba eksperimenta korišćeno je 5 solarnih modula. Svaki modul pojedinačno se sastoji iz 18 solarnih ćelija koje su povezane redno unutar modula. Za solarnu ćeliju je korišćena osnovna konfiguracija koja je definisana u MATLAB/Simulink softveru.

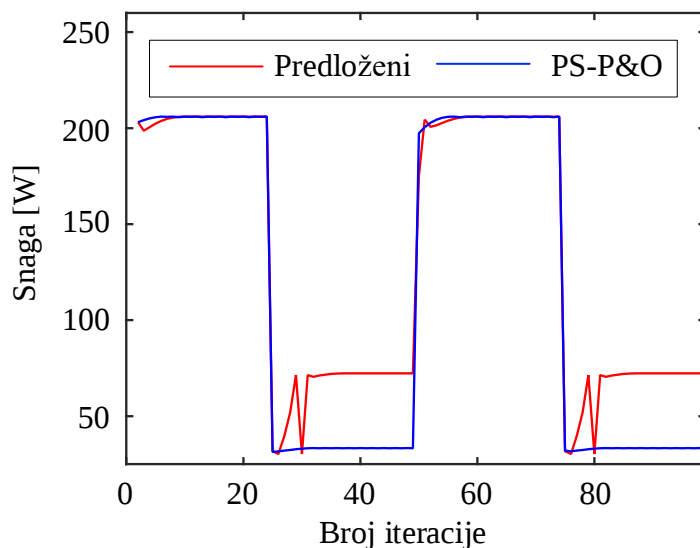
U prvom eksperimentu početna solarna iradijacija je iznosila 700 W/m^2 . U cilju simulacije pojave djelimične zasjenčenosti cijelog sistema, moduli su registrovali četiri različite vrijednosti ozračenja. Jedan modul je ostao izložen istoj vrijednosti od 700 W/m^2 , drugi modul je bio izložen iradijaciji od 500 W/m^2 , dok su dva modula primala solarnu iradijaciju od 400 W/m^2 . Posljednji modul je registrovao vrijednost od 300 W/m^2 . Promjena ozračenja iz uniformnog do pojave djelimičnog zasjenčenja je prikazan na slici 4.8.



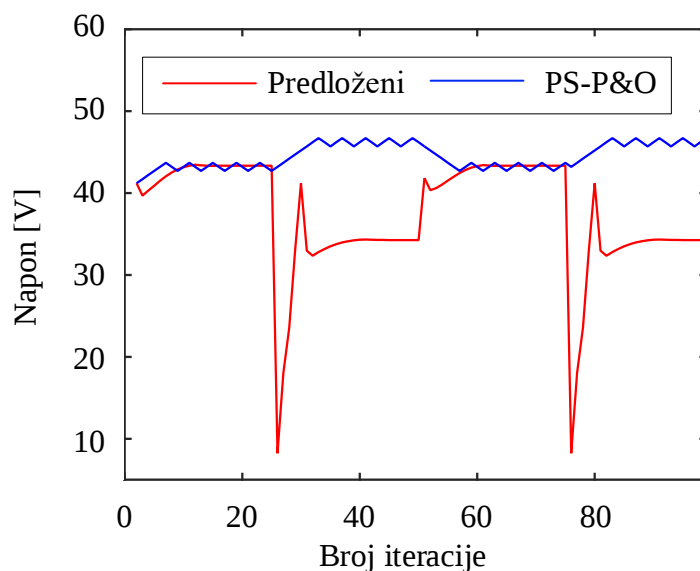
Slika 4.8. Redna veza PV modula u slučaju: a) uniformne solarne iradijacije; b) djelimičnog zasjenčenja

Simulink šema predloženog algoritma prikazana je na slici 4.9. Promjena solarne iradijacije je simulirana korišćenjem pravougaone funkcije implementirane u MATLAB-u.

Rezultati eksperimenta su prikazani u tabeli 4, kao i grafički na slici 4.10. Iz dobijenih podataka vidljivo je da predloženi algoritam postiže najbolje rezultate. Na slici 4.11. je vidljivo da je predloženom algoritmu potrebno 5 iteracija da pronađe globalni maksimum, što je jednako broju modula. Ovaj eksperiment pokazuje manu PS-P&O algoritma. Mana PS-P&O algoritma je da prilikom pojave djelimične zasjenčenosti, ukoliko je više modula izloženo istom ozračenju ne može pronaći globalni maksimum, što pokazuje da pretpostavka da se lokalni maksimumi nalaze na $0.8 \cdot V_{PH}$ nije tačna za posmatrani slučaj.



Slika 4.10. *Izlazna snaga u prvom eksperimentu*



Slika 4.11. *Napon u prvom eksperimentu*

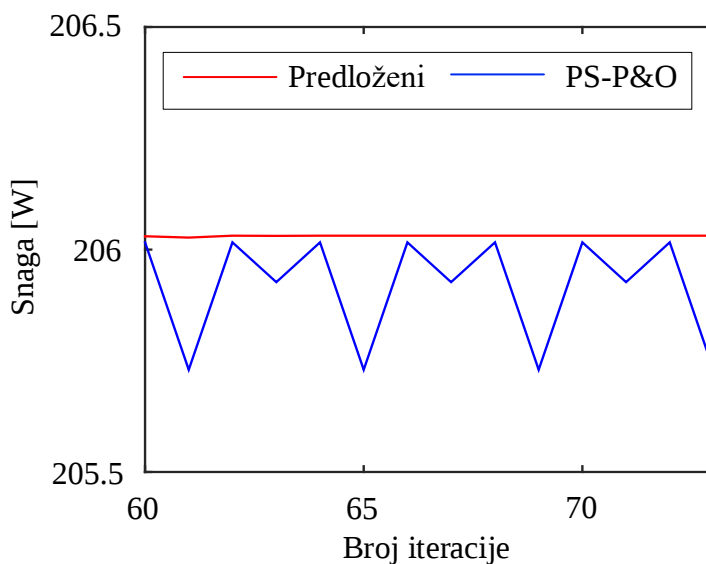
Tabela 4.4. *Efikasnost algoritama u prvom eksperimentu*

Algoritam	PS-P&O	Predloženi
$\eta[\%]$	93.59	98.21

Kada se odredi aproksimativna pozicija globalnog maksimuma, modifikovani P&O počinje sa radom u cilju dostizanja maksimuma. Na slici 4.12. je prikazano stacionarno stanje prilikom djelimične zasjenčenosti. U stacionarnom stanju predloženi algoritam se poklapa sa tačkom maksimalne snage, dok konvncionalni P&O osciluje oko nje. U tabeli 5 je prikazana efikasnost algoritama za posmatrani period.

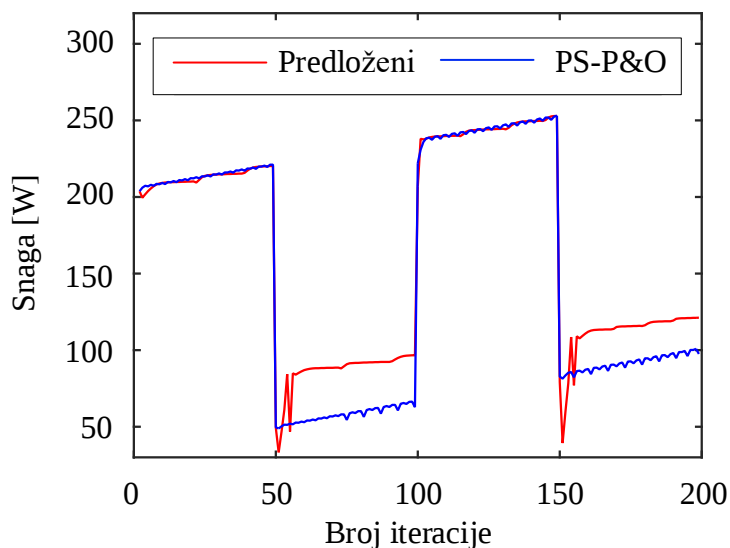
Tabela 4.5. Efikasnost algoritama u stacionarnom stanju

Algoritam	P&O	Predloženi
$\eta[\%]$	99.87	100.00



Slika 4.12. Izlazna snaga u stacionarnom stanju

U drugom eksperimentu su algoritmi testirani prilikom pojave djelimičnog zasjenčenja sa istovremenim porastom solarne iradijacije za $1 \text{ W/m}^2/\text{s}$. Na slici 4.13. i tabeli 6 je vidljivo da se predloženi metod brže prilagođava novoj situaciji, dok referentni metod ne može da odredi poziciju globalnog maksimuma. Kao i u prvom eksperimentu, predloženom algoritmu je potrebno 5 iteracija da odredi aproksimativnu poziciju globalnog maksimuma.



Slika 4.13. Izlazna snaga u drugom eksperimentu

Tabela 4.6. *Efikasnost algoritama u drugom eksperimentu*

<i>Algoritam</i>	modP&O	Predloženi
$\eta[\%]$	90.54	96.40

ZAKLJUČAK

U radu je prezentovana modifikacija P&O algoritma bazirana na promjenljivom koraku, čiji je cilj postizanje bržeg praćenja tačke maksimalne snage i smanjenje oscilacija u stacionarnom stanju. Promjenljivi korak se mijenja u zavisnosti od prethodne vrijednosti koraka, kao i od odnosa promjena snage i napona u toku dvije iteracije. Simulacijama je pokazano da predloženi algoritam pokazuje bolje rezultate u svim simuliranim scenarijima, kako u odnosu na konvencionalni P&O algoritam, tako i u odnosu na njegove modifikacije, dostupne u literaturi. Prednost predloženog rješenja je naročito izražena u stacionarnom stanju, u kojem su oscilacije oko tačke maksimalne snage značajno smanjene.

U slučaju djelimične zasjenčenosti solarnog panela, na P-V krivoj panela se pojavljuje više lokalnih maksimuma. U ovom scenariju P&O algoritam i njegove modifikacije ne mogu da prate tačku maksimalne snage, uslijed nemogućnosti razlikovanja lokalnog i globalnog maksimuma. U radu je prezentovan algoritam koji na jednostavne načine detektuje pojavu djelimične zasjenčenosti panela, pronalazi globalni maksimum na P-V krivoj i smanjuje oscilacije u stacionarnom stanju. Rezultati simulacija pokazuju da predloženi metod ima bolje performanse u odnosu na razmatrane algoritme, pogotovo u stacionarnom stanju.

Predmet daljeg istraživanja će biti praktična implementacija predloženih algoritama, i komparacija rezultata postignutih u realnim uslovima sa rezultatima iz simulacija. Step en iskorištenja čopera, u kojem se implementira MPPT algoritam, u realnim uslovima iznosi ispod 90%. Dodatna istraživanja će biti posvećenja iznalaženju načina povećanja efikasnost čopera, što bi doprinijelo povećanju efikasnosti kompletnog PV sistema. Pored konvencionalnih metoda, koje su u ovom radu opisane, postoje i soft computing metode. Buduća istraživanja će se, takođe, bazirati na primjeni i pokušaju optimizacije soft computing metoda kod PV sistema.

LITERATURA

- [1] S. White, *Solar photovoltaic basics: a study guide for the NABCEP entry level exam*. London ; New York: Routledge, 2015.
- [2] “A fundamental look at energy reserves for the planet,” *ResearchGate*. [Online]. Available:
https://www.researchgate.net/publication/237440187_A_fundamental_look_at_energy_reserves_for_the_planet. [Accessed: 09-Aug-2018].
- [3] Canadian Electronic Library (Firm), *Renewables 2017: Global Status Report*. 2017.
- [4] “WEResources_Solar_2016.pdf.” [Online]. Available:
https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2017/03/WEResources_Solar_2016.pdf. [Accessed: 09-Aug-2018].
- [5] M. R. Patel, *Wind and solar power systems: design, analysis, and operation*, 2nd ed. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2006.
- [6] M. Pagliaro, G. Palmisano, and R. Ciriminna, *Flexible solar cells*. Weinheim [Germany]: Wiley-VCH, 2008.
- [7] H. Habberlin, *Photovoltaics: system design and practice*. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2012.
- [8] “PVEducation.” [Online]. Available: <https://www.pveducation.org/>. [Accessed: 05-Aug-2018].
- [9] “Lecture Videos & Slides | Fundamentals of Photovoltaics | Mechanical Engineering | MIT OpenCourseWare.” [Online]. Available: <https://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-627-fundamentals-of-photovoltaics-fall-2013/lecture-videos-slides/>. [Accessed: 05-Aug-2018].
- [10] “History of Solar Cells: A Technology Evolving,” Solar Power Authority, 13-Jul-2016. [Online]. Available: <https://www.solarpowerauthority.com/a-history-of-solar-cells/>. [Accessed: 05-Aug-2018].
- [11] “History of Solar Power,” IER, 18-Feb-2016. [Online]. Available: <https://instituteeforenergyresearch.org/analysis/history-of-solar-power/>. [Accessed: 05-Aug-2018].
- [12] “Solar Power World takes a look at the long history of the solar PV industry,” Solar Power World, 04-Jan-2018. [Online]. Available: <https://www.solarpowerworldonline.com/2018/01/long-history-solar-pv/>. [Accessed: 05-Aug-2018].

- [13] J. H. Leck, Theory of semiconductor junction devices: a textbook for electrical and electronic engineers. Burlington: Elsevier Science, 2013.
- [14] "p-n Junctions," in Physics of Semiconductor Devices, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2006, pp. 77–133.
- [15] G. W. Neudeck, The PN junction diode, 2nd ed. Reading, Mass: Addison-Wesley, 1989.
- [16] D. A. Sproul, "Understanding the p-n Junction." [Online]. Available: http://www2.pv.unsw.edu.au/nsite-files/pdfs/UNSW_Understanding_the_p-n_Junction.pdf.
- [17] A. L. Fahrenbruch and R. H. Bube, Fundamentals of solar cells: photovoltaic solar energy conversion. New York: Academic Press, 1983.
- [18] A. McEvoy, T. Markvart, and L. Castañer, Solar cells: materials, manufacture and operation. Amsterdam: Elsevier, 2013.
- [19] G. M. Masters, Renewable and efficient electric power systems. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2004.
- [20] M. F. Nayan and S. M. S. Ullah, "Modelling of solar cell characteristics considering the effect of electrical and environmental parameters," 2015, pp. 1–6.
- [21] I. K. Argyros, Convergence and applications of Newton-type iterations. New York; London: Springer, 2011.
- [22] A. Galántai, "The theory of Newton's method," J. Comput. Appl. Math., vol. 124, no. 1–2, pp. 25–44, Dec. 2000.
- [23] V. Durković, M. Čalasan, and S. Mujović, "Polazne i radne karakteristike jednosmjernog motora napajanog iz solarih panela," presented at the XVII naučno-stručni skup INFORMACIONE TEHNOLOGIJE.
- [24] I. M. Babić, "Modelovanje uticaja vremenskog profila solarnog zračenja na efekte rada fotonaponskih sistema u elektroenergetskom sistemu," Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, 2016.
- [25] "SOLARNI GENERATORI KAO SAMOSTALNI IZVORI ELEKTRIČNE ENERGIJE," ResearchGate. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/314399732_SOLARNI_GENERATORI_KAO_SAMOSTALNI_IZVORI_ELEKTRICNE_ENERGIJE. [Accessed: 05-Aug-2018].
- [26] D. Vulin, M. Štefok, and D. Pelin, "Overview of the Algorithms for Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic Systems," . do, p. 8.
- [27] C. P. Roy, D. Vijaybhaskar, and T. Maity, "Modelling of fuzzy logic controller for variable-step MPPT in photovoltaic system," 2013, pp. 341–346.

- [28] J. Ahmed and Z. Salam, "A Modified P&O Maximum Power Point Tracking Method With Reduced Steady-State Oscillation and Improved Tracking Efficiency," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 7, no. 4, pp. 1506–1515, Oct. 2016.
- [29] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 20, no. 4, pp. 963–973, Jul. 2005.
- [30] N. Femia, D. Granozio, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "Predictive & Adaptive MPPT Perturb and Observe Method," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 43, no. 3, pp. 934–950, Jul. 2007.
- [31] F. Paz and M. Ordonez, "Zero Oscillation and Irradiance Slope Tracking for Photovoltaic MPPT," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 11, pp. 6138–6147, Nov. 2014.
- [32] Q. Mei, M. Shan, L. Liu, and J. M. Guerrero, "A Novel Improved Variable Step-Size Incremental-Resistance MPPT Method for PV Systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 6, pp. 2427–2434, Jun. 2011.
- [33] Yeong-Chau Kuo, Tsorng-Juu Liang, and Jiann-Fuh Chen, "Novel maximum-power-point-tracking controller for photovoltaic energy conversion system," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 48, no. 3, pp. 594–601, Jun. 2001.
- [34] M. A. S. Masoum, H. Dehbonei, and E. F. Fuchs, "Theoretical and experimental analyses of photovoltaic systems with voltage and current-based maximum power-point tracking," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 17, no. 4, pp. 514–522, Dec. 2002.
- [35] N. Mutoh, T. Matuo, K. Okada, and M. Sakai, "Prediction-data-based maximum-power-point-tracking method for photovoltaic power generation systems," 2002, pp. 1489–1494.
- [36] M. Bodur and M. Ermis, "Maximum power point tracking for low power photovoltaic solar panels," 1994, pp. 758–761.
- [37] B. N. Alajmi, K. H. Ahmed, S. J. Finney, and B. W. Williams, "A Maximum Power Point Tracking Technique for Partially Shaded Photovoltaic Systems in Microgrids," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 4, pp. 1596–1606, Apr. 2013.
- [38] K. Punitha, D. Devaraj, and S. Sakthivel, "Artificial neural network based modified incremental conductance algorithm for maximum power point tracking in photovoltaic system under partial shading conditions," *Energy*, vol. 62, pp. 330–340, Dec. 2013.
- [39] M. Seyedmahmoudian et al., "Simulation and Hardware Implementation of New Maximum Power Point Tracking Technique for Partially Shaded PV System Using Hybrid DEPSO Method," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 6, no. 3, pp. 850–862, Jul. 2015.
- [40] H. Renaudineau et al., "A PSO-Based Global MPPT Technique for Distributed PV Power Generation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 2, pp. 1047–1058, Feb. 2015.

- [41] J. Ahmed and Z. Salam, "A Maximum Power Point Tracking (MPPT) for PV system using Cuckoo Search with partial shading capability," *Appl. Energy*, vol. 119, pp. 118–130, Apr. 2014.
- [42] J. Ahmed and Z. Salam, "A critical evaluation on maximum power point tracking methods for partial shading in PV systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 47, pp. 933–953, Jul. 2015.
- [43] K. Ishaque and Z. Salam, "A review of maximum power point tracking techniques of PV system for uniform insolation and partial shading condition," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 19, pp. 475–488, Mar. 2013.
- [44] T. Eswar and P. L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, Jun. 2007.
- [45] B. Subudhi and R. Pradhan, "A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Power Systems," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 4, no. 1, pp. 89–98, Jan. 2013.
- [46] U. Patel, D. Sahu, and D. Tirkey, "Maximum Power Point Tracking Using Perturb & Observe Algorithm and Compare With another Algorithm," 2013. [Online]. Available: http://ijdacr.com/uploads/papers/DhaneshwariSahu_paper.pdf.
- [47] J. J. Nedumgatt, K. B. Jayakrishnan, S. Umashankar, D. Vijayakumar, and D. P. Kothari, "Perturb and observe MPPT algorithm for solar PV systems-modeling and simulation," 2011, pp. 1–6.
- [48] M. Killi and S. Samanta, "Modified Perturb and Observe MPPT Algorithm for Drift Avoidance in Photovoltaic Systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 9, pp. 5549–5559, Sep. 2015.
- [49] R. I. Putri, S. Wibowo, and M. Rifa'i, "Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Using Incremental Conductance Method," *Energy Procedia*, vol. 68, pp. 22–30, Apr. 2015.
- [50] Bratt J., "Grid connected PV inverters: modeling and simulation," Master teza, Univerzitet u San Diegu, 2011.
- [51] P. Chen, "An improved maximum power point tracking algorithm using fuzzy logic controller for photovoltaic applications," Master teza, California State Univerzity, 2015.
- [52] Y. Yang and F. P. Zhao, "Adaptive Perturb and Observe MPPT Technique for Grid-Connected Photovoltaic Inverters," *Procedia Eng.*, vol. 23, pp. 468–473, 2011.
- [53] Weidong Xiao and W. G. Dunford, "A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems," 2004, pp. 1957–1963.

- [54] F. Zhang, K. Thanapalan, A. Procter, S. Carr, and J. Maddy, "Adaptive Hybrid Maximum Power Point Tracking Method for a Photovoltaic System," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 28, no. 2, pp. 353–360, Jun. 2013.
- [55] S. K. Kollimalla and M. K. Mishra, "Novel adaptive P&O MPPT algorithm for photovoltaic system considering sudden changes in weather condition," 2013, pp. 653–658.
- [56] S. K. Kollimalla and M. K. Mishra, "Variable Perturbation Size Adaptive P&O MPPT Algorithm for Sudden Changes in Irradiance," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 3, pp. 718–728, Jul. 2014.
- [57] S. K. Kollimalla and M. K. Mishra, "A Novel Adaptive P&O MPPT Algorithm Considering Sudden Changes in the Irradiance," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 29, no. 3, pp. 602–610, Sep. 2014.
- [58] A. Kapić, Ž. Zečević, M. Radulović, and B. Krstajić, "A Variable Step Size Perturb and Observe Algorithm for Maximum Power Point Tracking," in 2017 22nd International Scientific-Professional Conference on Information Technology (IT).
- [59] N. Femia, G. Lisi, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "Distributed maximum power point tracking of photovoltaic arrays: Novel approach and system analysis," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 7, pp. 2610–2621, Jul. 2008.
- [60] K. Kobayashi, I. Takano, and Y. Sawada, "A study on a two stage maximum power point tracking control of a photovoltaic system under partially shaded insolation conditions," in 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting (IEEE Cat. No.03CH37491), 2003, vol. 4, p. 2617 Vol. 4.
- [61] M. Miyatake, T. Inada, I. Hiratsuka, H. Zhao, H. Otsuka, and M. Nakano, "Control characteristics of a fibonacci-search-based maximum power point tracker when a photovoltaic array is partially shaded," in The 4th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2004. IPEMC 2004., 2004, vol. 2, pp. 816–821 Vol.2.
- [62] S. M. R. Kazmi, H. Goto, O. Ichinokura, and H. J. Guo, "An improved and very efficient MPPT controller for PV systems subjected to rapidly varying atmospheric conditions and partial shading," in 2009 Australasian Universities Power Engineering Conference, 2009, pp. 1–6.
- [63] K. Sundareswaran, V. Vigneshkumar, P. Sankar, S. P. Simon, P. Srinivasa Rao Nayak, and S. Palani, "Development of an Improved P&O Algorithm Assisted Through a Colony of Foraging Ants for MPPT in PV System," *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 12, no. 1, pp. 187–200, Feb. 2016.
- [64] J. Ahmed and Z. Salam, "An Accurate Method for MPPT to Detect the Partial Shading Occurrence in a PV System," *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 13, no. 5, pp. 2151–2161, Oct. 2017.
- [65] A. Kapić, Z. Zečević, and B. Krstajić, "An efficient MPPT algorithm for PV modules under partial shading and sudden change in irradiance," 2018, pp. 1–4.

- [66] J. Ahmed and Z. Salam, "An Improved Method to Predict the Position of Maximum Power Point During Partial Shading for PV Arrays," *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 11, no. 6, pp. 1378–1387, Dec. 2015.
- [67] J. Ahmed and Z. Salam, "An Enhanced Adaptive P O MPPT for Fast and Efficient Tracking Under Varying Environmental Conditions," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 9, no. 3, pp. 1487–1496, Jul. 2018.
- [68] Fangrui Liu, Shanxu Duan, Fei Liu, Bangyin Liu, and Yong Kang, "A Variable Step Size INC MPPT Method for PV Systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 7, pp. 2622–2628, Jul. 2008.
- [69] T. Tobadono-cho, "■ KYOCERA Corporation Headquarters." [Online]. Available: <https://www.kyocerasolar.com/dealers/product-center/archives/spec-sheets/KC200GT.pdf>.
- [70] H. Patel and V. Agarwal, "Maximum Power Point Tracking Scheme for PV Systems Operating Under Partially Shaded Conditions," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 4, pp. 1689–1698, Apr. 2008.

PRILOG

U nastavku je dat kod koji je korišten za pozivanje predložene metode u cilju simulacija, čiji su rezultati izloženi radu.

```
clc
clear all

T = 25;
[Rs,Rp]=otpornosti(); % funkcija za proračun redne (Rs) i paralelne (Rp) otpornosti
solarne ćelije
Voc = 32.9; % napon praznog hoda solarnog panela
Iscn = struja(T,1000,0,Rs,Rp); % funkcija za proračun struje solarnog panela
dmax=0.5; % maksimalna vrijednost promjenljivog koraka
dV = dmax; % početna vrijednost promjenljivog koraka
t = 1:1:399; % broj iteracija
S = 600-200*sqrt(2*pi*t/200); % posmatrana solarna iradijacija
%S=300+t;
Vnv(1) = 20; %20; % početna vrijednost napona
V = Vnv(1);
In(1) = struja(T,S(1),Vnv(1)+0.1,Rs,Rp); % početna vrijednost struje
P(1)= V*In; % početna vrijednost snage
V_niz = [Vnv];
P_niz = [P];
I_niz = [In];
[Pmpp, Impp, Vmpp] = MPP(T,S(1)); % funkcija za proračun maksimalne moguće snage
panela
Pmpp_niz = [Pmpp];
V(2) = V(1)+0.1; % nova vrijednost napona
dP(2)=0.1;
for k = 2:length(t)
    In(k) = struja(T,S(k),V(k),Rs,Rp);
```

```

P(k)= V(k)*In(k);
dP(k) = P(k)-P(k-1);
DV(k)=V(k)-V(k-1);
V_niz = [V_niz V(k)];
I_niz = [I_niz In(k)];
l1=0.7; %0.6; % vrijednost prvog koeficijenta
l2=0.56; %0.6; %0.15; % vrijednost drugog koeficijenta
dV=l1*dV+l2*abs(dP(k))/abs(DV(k)); % proračun promjenljivog koraka
if In(k)-In(k-1)>0.1*Iscn || In(k-1)-In(k)>0.1*Iscn % provjera da li je došlo do nagle
promjene solarne iradijacije
    dV = 1;
end
if dP(k)>0
    if V(k)>V(k-1)
        if In(k)>In(k-1)
            V(k+1) = V(k)-dV;
        else
            V(k+1) = V(k)+dV;
        end
    else
        V(k+1) = V(k)-dV;
    end
elseif dP(k)<0
    if V(k)>V(k-1)
        V(k+1) = V(k)-dV;
    else
        V(k+1) = V(k)+dV;
    end
else
    V(k+1)=V(k);
end

if (dP(k)>0 & dP(k-1)>0) || (dP(k)<0 & dP(k-1)<0)

```

```
dV=dV+0.005;
end
if dV>dmax dV=dmax;
end
korak(k)=dV;
l=1;
V(k+1) = l*V(k+1)+(1-l)*V(k);
if S(k)~=S(k-1)
    [Pmpp, Impp, Vmpp] = MPP(T,S(k));
    Pmpp_niz = [Pmpp_niz Pmpp];
else
    Pmpp_niz = [Pmpp_niz Pmpp_niz(end)];
end
P_niz = [P_niz P(k)];
end

figure(1)
plot(t,S,'r')
axis([0 500 300 900])

figure(2)
plot(t,P_niz,'k','lineWidth',0.1)
hold on
plot(Pmpp_niz,'g','lineWidth',1)
%axis([99 119 118 122])
ylabel('Power [W]','FontSize',12,'FontName','Times New Roman','FontWeight','normal');
hold on

figure(3)
plot(t,V_niz,'k')
title('Voltage [V]')
hold on
```

```
figure(4)
plot(t,I_niz,'k')
title('Current [A]')
hold on

figure(5)
sum(abs(P_niz(1:end)))/sum(abs(Pmpp_niz(1:end)))
plot(t,korak,'k')
axis([0 400 0 0.7])
```