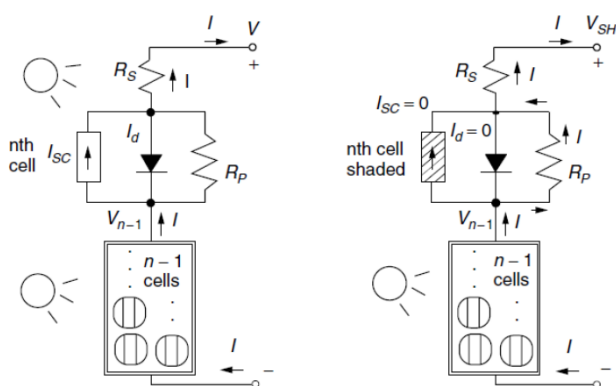


**Vežba 1:****Snimanje I-U i P-U karakteristike fotonaponskog sistema u idealnim uslovima i uslovima zasenčenja****1. Teorijski uvod**

Pri proračunima proizvodnje fotonaponskog sistema važno je analizirati uticaj zasenčenja fotonaponskih ćelija koje se može desiti u realnim uslovima eksploatacije. Zasenčenje podrazumeva smanjenu iradijaciju koja dospeva do pojedinih ćelija u okviru fotonaponskih modula. Ovaj efekat za posledicu ima pad efikasnost fotonaponske konverzije, pojavu neželjenih padova napona, kao i dodatno lokalno zagrevanje fotonaponskih ćelija čime se formiraju tople tačke unutar modula.

Efekat zasenčenja će biti opisan na primeru zasenčenja jedne realne ćelije unutar modula. Na Sl. 1 je prikazan modul sa n redno vezanih PV ćelija, pri čemu je jedna od ćelija izdvojena i prikazana svojom ekvivalentnom zamenskom šemom. Sve ćelije na slici levo su podjednako osvetljene, tako da su struje strujnog izvora svake ćelije međusobno jednake. Na slici desno izdvojena ćelija je prekrivena (potpuno zasenčena) i iradijacija koja pada na nju je $0 \frac{W}{m^2}$. Strujni izvor u modelu ove ćelije ne generiše struju, pa predstavlja prekid u nizu n redno vezanih izvora. Jedini put zatvaranja struje koju generišu ćelije koje nisu zasenčene je preko otpora R_p , jer je dioda negativno polarisana (blokirana).

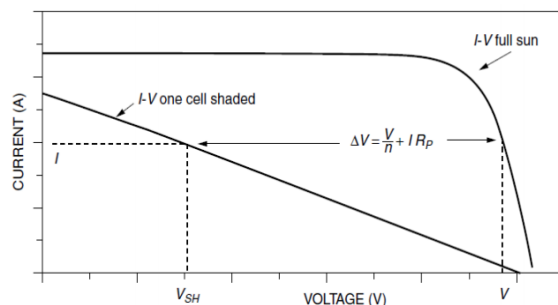


Slika 1. Fotonaponski modul sa n -redno vezanih ćelija kada su ćelije sve osvetljene i kada je n -ta ćelija zasenčena

Usled pada napona na otočnoj otpornosti zasenčene ćelije doći će do pada napona na priključcima modula, pa samim tim i do pada snage koju modul predaje potrošaču. Napon na priključcima modula kada je jedna ćelija zasenčena (V_{SH}) je manji od napona kada su sve ćelije izložene istoj iradijaciji (V) za pad napona na otočnom otporu zasenčene ćelije:

$$V_{SH} = V_{n-1} - I(R_p + R_s) = \left(\frac{n-1}{n}\right)V - I(R_p + R_s)$$

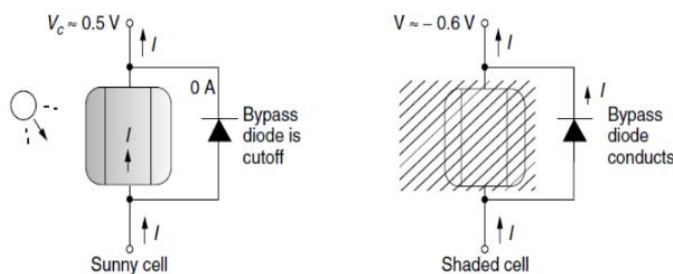
Na Sl. 2 je prikazan uticaj potpunog zasenčenja jedne od n redno vezanih ćelija na I-U karakteristiku PV modula:



Slika 2: Uticaj zasenčenja jedne od n ćelija na I-U karakteristiku fotonaponskog modula

Zaključak prethodne analize je da svako i malo zasenčenje modula uzrokuje drastičan pad efikasnosti modula. Uzrok takvog pada je inverzna polarizacija p-n spoja u fotonaponskoj ćeliji, tako da se struja zatvara kroz unutrašnji otpor ćelije. Zasenčena ćelija se u ovakvim uslovima ponaša kao potrošač. Na njoj se javlja neželjeni pad napona i relativno velika snaga disipacije koja stvara tople tačke i degradira samu ćeliju.

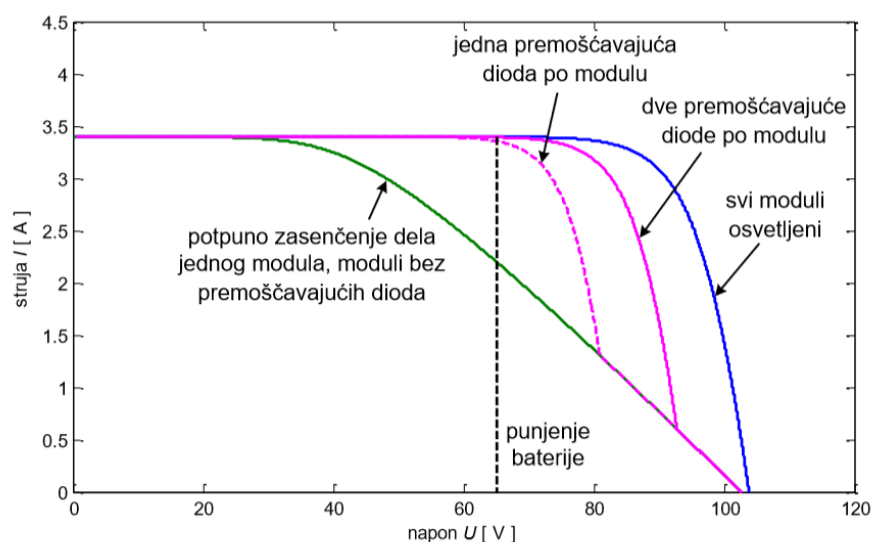
Jedan od efikasnih načina za premošćavanje problema zasenčenja jeste postavljanje eksternih dioda za premošćavanje (*bypass diode*). Na Sl. 3 je prikazan princip funkcionisanja diode za premošćavanje na primeru jedne od ćelija koja je izdvojena iz modula. Tehnički gledano, paralelno svakoj od redno vezanih fotonaponskih ćelija moguće je postaviti premošćavajuću diodu. Pošto je napon na fotonaponskoj ćeliji u normalnim uslovima rada oko 0.6 V, premošćavajuća dioda u normalnim uslovima rada će biti inverzno polarisana, tako da ona ne provodi struju (Sl. 3 levo). Kada se fotonaponska ćelija zasenči, stvara se pad napona na unutrašnjoj otpornosti ćelije (suprotnog polariteta u odnosu na radni napon ćelije), i čim pad napona dostigne prag provođenja premošćavajuće diode, ona će predstavljati malu otpornost i struja će proteći kroz nju (Sl. 3 desno). Na ovaj način struja koju generišu ostale ćelije u rednoj vezi je na mestu zasenčene ćelije dobila novi efikasan kanal za njeno premošćenje.



Sl. 3: Šematski prikaz PV ćelije sa paralelno postavljenom bypass diodom



Postavljanje premošćavajućih dioda paralelno svakoj od redno vezanih fotonaponskih ćelija u modulu nije ekonomično i praktično. Za fotonaponske module sa 60 ćelija uobičajeno je da se koriste dve diode za premošćavanje, tako da se 30 ćelija premošćuje jednom diodom. Iz tog razloga, korist od dioda za premošćavanje nije toliko značajna ako se radi o jednom modulu, već o modulima koji se koriste za formiranje panela. Uloga *bypass* dioda je premošćavanje modula u slučaju zasenčenja, ali i u slučaju kvara, čime modul automatski biva premošćen i u električnom smislu izolovan iz sistema. Na Sl. 4. je prikazan uticaj delimičnog zasenčenja jednog modula na I-U karakteristiku fotonaponskog panela, sa i bez dioda za premošćavanje fotonaponskih modula. Na slici su prikazane I-U karakteristike panela pri osvetljenim modulima i pri zasenčenju jednog modula kada se ne koriste premošćavajuće diode, kada se koristi jedna premošćavajuća dioda po modulu i kada se koriste dve premošćavajuće diode po modulu.



Slika 4: Uticaj zasenčenja na strujno-naponsku karakteristiku fotonaponskog panela sastavljenog od pet modula, sa i bez dioda za premošćavanje

2. Cilj vežbe, šema veza i korišćena merna aparatura

Cilj ove laboratorijske vežbe je snimanje eksploatacionih karakteristika dva identična fotonaponska stringa, pri čemu je jedan string ravnomerno izložen sunčevoj iradijaciji, dok se kod drugog stringa analiziraju efekti zasenčenja pojedinih ćelija u okviru jednog modula.

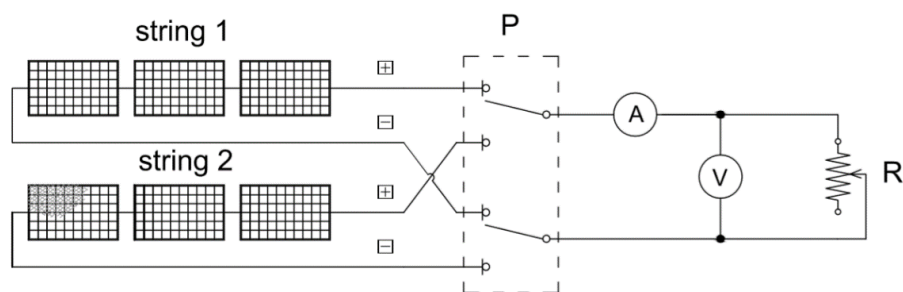
Zasenčenje se simulira postavljanjem neprozirnog materijala preko dela modula, čime se sprečava dospevanje sunčevog zračenja do određenog broja fotonaponskih ćelija, kao što je prikazano na Sl. 5.



Slika 5: Fotografija fotonaponskog panela sa materijalom kojim se simulira potpuno zasenčenje

Slika 5. Fotonaponski panel sa neprozirnim materijalom kojim se simulira potpuno zasenčenje dela modula.

Fotonaponski stringovi su direktno poverazani na čisto rezistivni potrošač sa mogućnošću promene opterećenja, kako bi se mogao snimiti veći broj radnih tačaka. Merna šema po kojoj će se obavljati eksperiment, data je na Sl. 5:



Slika 6: Merna šema za snimanje eksploatacionih karakteristika PV stringova

U eksperimentu će se koristiti sledeća merna oprema:

- fotonaponski modul *First Solar ZDNY-235P60* sa tehničkim podacima datim u Tabeli 1,
- fotonaponski string instalisane snage 0.7 kWp sastavljen od 3 redno vezana modula, ravnomerno izložen sunčevoj iradijaciji,
- fotonaponski string instalisane snage 0.7 kWp sastavljen od 3 redno vezana modula, sa potpunim zasenčenjem nekoliko ćelija unutar jednog modula,
- Preklopnik P za prebacivanje merne šeme na priključke stringa koji se ispituje,
- Digitalni ampermetar A za merenje jednosmerne struje PV stringa,
- Digitalni voltmetar V za merenje jednosmernog napona na izlazu PV stringa
- Otpornik promenljive otpornosti R koji služi za podešavanje radne tačke PV stringa

Tabela 1: Tehnički podaci za solarni modul First Solar ZDNY-235P60

Model	ZDNY-235P60
Max. Power (Pmax)	235Wp
Optimum Operating Voltage (Vm)	29.78V
Optimum Operating Current (Im)	7.90A
Open-circuit Voltage (Voc)	37.45V
Short-circuit Current (Isc)	8.35A
Cell Efficiency	16.1%
Module Efficiency	14.4%
Solar Cell	Poly-crystalline 156x156mm
Output Tolerance (Pmax)	0~+3%
Number of cells	60
Module Dimension, mm	1650x992x45
Weight	22.5kg
Max. System Voltage	1000V(TUV)/600V(UL)
Max. Series Fuse Rating	15A
Temperature cycling range	-40 ~ 85°C
NOTC	47°C
Temperature coefficients of Isc	+0.06%/°C
Temperature coefficients of Voc	-0.35%/°C
Temperature coefficients of Pmax	-0.4%/°C
Load Capacity	276pcs/20'GP /644pcs/40'HQ



3. Postupak pri radu i rezultati

Da bi se efikasno i sa zadovoljavajućom tačnošću snimile I-U i P-U karakteristike fotonaponskih stringova, merenje je potrebno obavljati po vedrom danu i to tokom onog perioda dana kada senke okolnih objekata ne padaju na module postavljene u dvorištu fakulteta. Za ispitivanje karaktersitika nezasećenog stringa, preklopnik P je potrebno postaviti u gornji položaj, a zasećenog u donji.

Snimanje karakteristika vrši se istovremeno za oba stringa tako što se za podešenu otpornost u kolu izmeri radna tačka jednog, a zatim pomeranjem preklopnika P radna tačka drugog stringa. Prvo je potrebno izmeriti napone stringova kada su oni u praznom hodu. Zatim se menja otpornost otpornika R od najveće do najmanje vrednosti i za svaku tačku sa digitalnih mernih instrumenata očitavaju se vrednosti napona i struje (zabeležiti približno 20 tačaka). Težiti da se promena otpornosti vrši tako da se što detaljnije snimi koleno I-U karakteristike. Na kraju, spajanjem provodnika pozitivnog i negativnog polariteta na krajevima stringa, simulirati ogled kratkog spoja. Dobijene rezultate zabeležiti u narednoj tabeli.

String1	I[A]																		
	U[V]																		
	P[W]																		
String2	I[A]																		
	U[V]																		
	P[W]																		

Zadaci:

1. Na osnovu dobijenih rezultata i primenom *Curve Fitting Tool* modula u okviru Matlaba skicirati i analizirati I-U i P-U karakteristike za oba slučaja.
2. Odrediti tačke maksimalne snage (Maximum Power Point) za string 1 i string 2. Izračunati procentualni pad proizvodnje usled zasenčenja.

String1	I _{MPP} [A]	
	U _{MPP} [V]	
	P _{MPP} [W]	
String2	I _{MPP} [A]	
	U _{MPP} [V]	
	P _{MPP} [W]	

3. Na osnovu parametara modula datih u tabeli 1 i dobijenih eksperimentalnih rezultata, proceniti iradijaciju na panel u trenutku obavljanja eksperimenta.

_____ → $I_c =$ _____