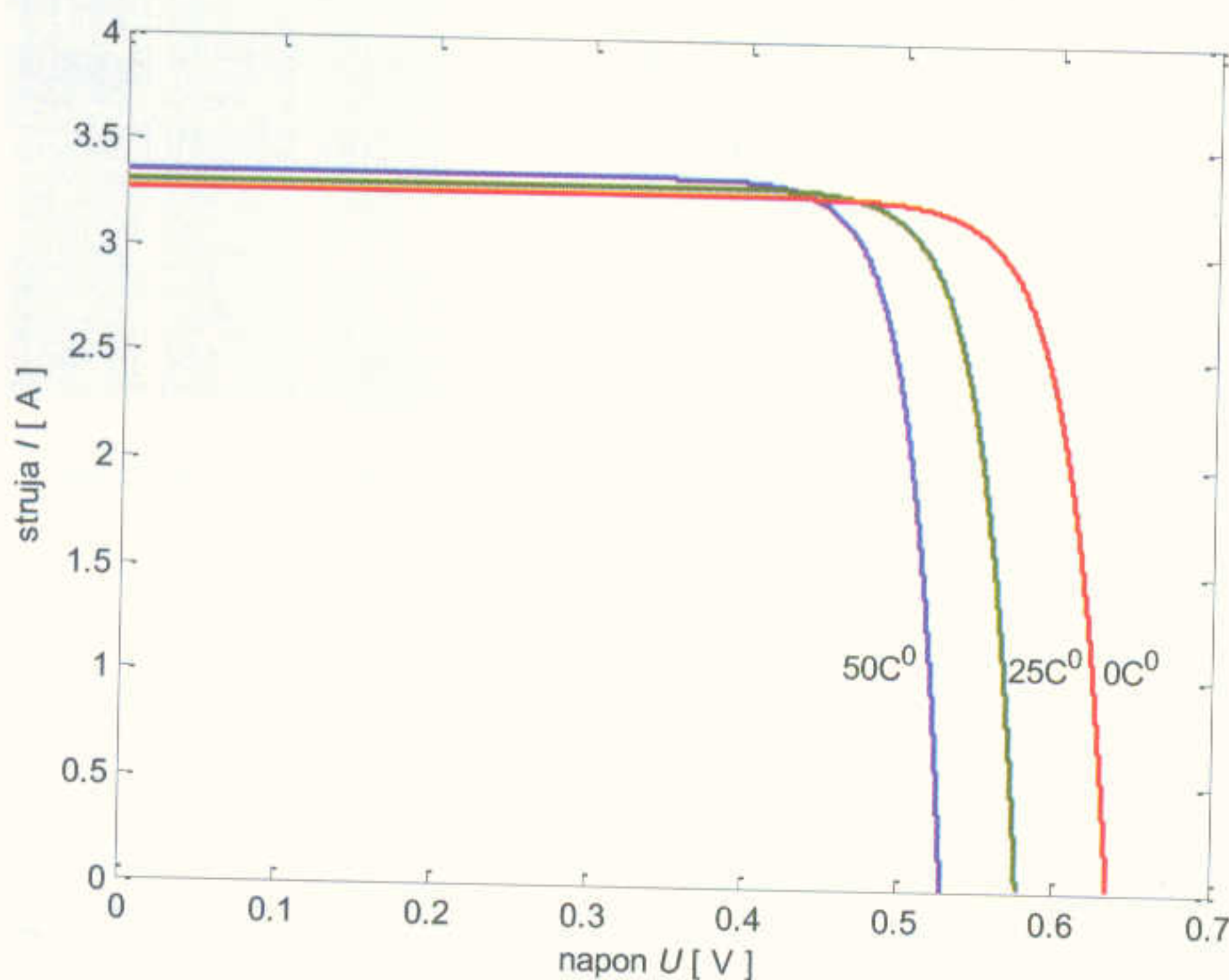


Napon otvorenog kola fotonaponske ćelije u funkciji temperature je:

$$U_{OK} = \frac{kT}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{KS}}{c_0 T^3 e^{-\frac{E_g}{kT}}} + 1 \right) \quad (5.21)$$

Prethodna zavisnost se u opsegu realnih promena temperature fotonaponske ćelije može opisati linearnom opadajućom funkcijom.



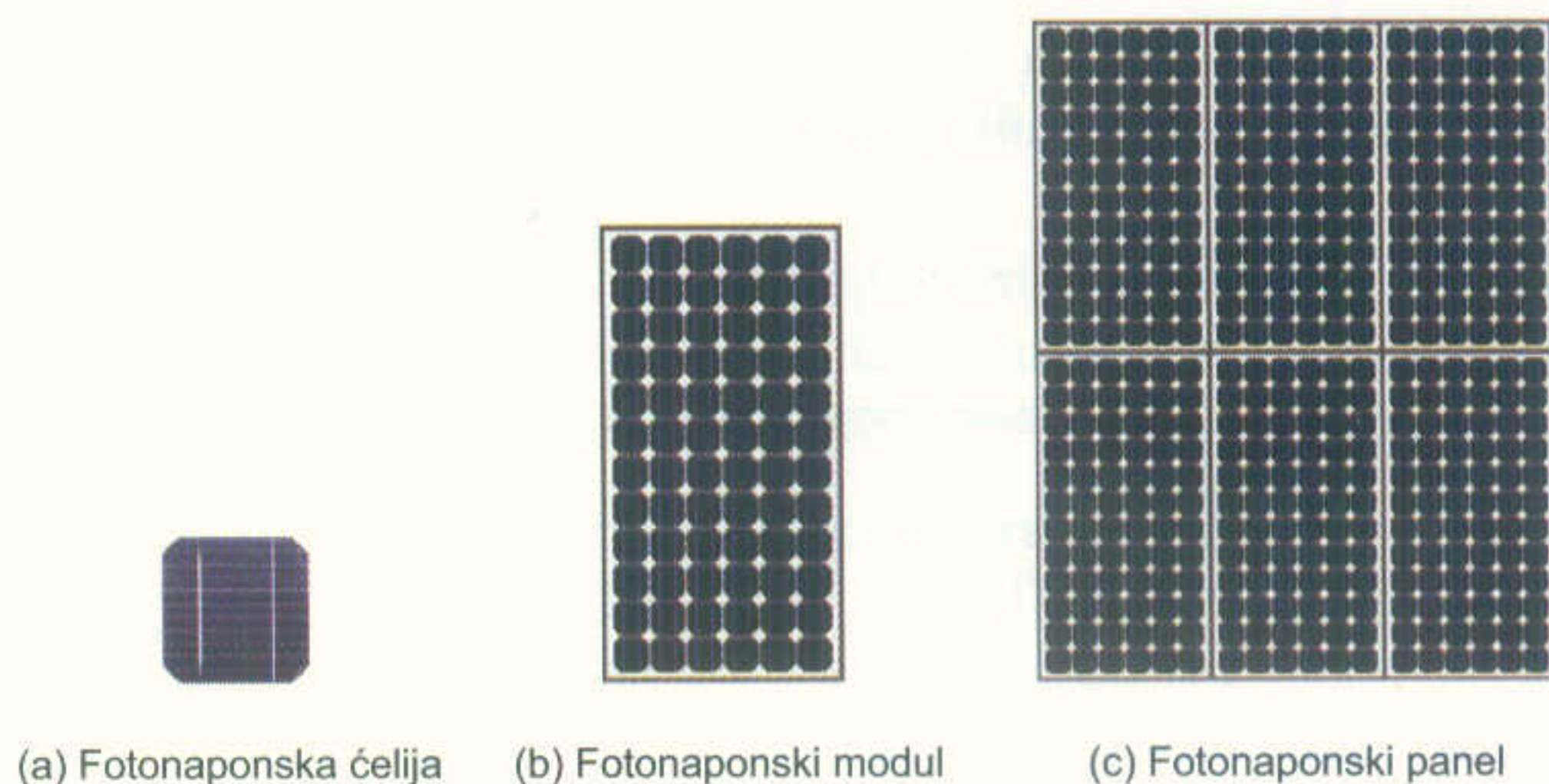
Slika 5.33. Uticaj temperature na strujno-naponsku karakteristiku fotonaponske ćelije

5.3 Fotonaponski moduli i paneli

Pošto jedna osvetljena silicijumska fotonaponska ćelija generiše napon otvorenog kola čija je vrednost oko 0,6 V, retko se koristi samo jedna ćelija za dobijanje električne energije. Umesto toga, više ćelija se redno vezuje i spaja u blok koji se naziva fotonapononski modul. Pri tome, kroz sve fotonaponske ćelije u modulu protiče ista struja. Tipičan fotonaponski modul koji se koristi za napajanje malih izolovanih potrošača sadrži 36 redno vezanih ćelija i obično se takav modul koristi za napajanje potrošača pri naponu od 12 V, iako je takav modul sposoban da generiše i napon koji je veći od 12 V. Postoje i fotonaponski moduli sa 33 redno vezanih ćelija i takvi moduli se koriste kod jednostavnih punjača akumulatorskih baterija od 12 V. Za primenu u distributivnim mrežama i izgradnju velikih solarnih elektrana danas se na tržištu uglavnom nude fotonaponski moduli sa dve paralelne grane sa po 60 ili 72 redno vezane solarne ćelije u svakoj od grana. Napon na priključcima ovih solarnih modula (kada su izloženi solarnom zračenju) je oko 36 V, odnosno 43 V.

Fotonaponski moduli se mogu vezati na red da bi se povećao napon i mogu se vezati paralelno da bi se povećala struja. Rednim i paralelnim vezivanjem fotonaponskih

modula dobija se fotonaponski panel (*array*). Dakle, fotonaponski moduli omogućavaju modularnost sistema, odnosno optimalnu kombinaciju rednih i paralelnih veza da bi se dobio željeni napon i struja na priključcima panela, za šta je u sistemima naizmenične struje neophodan transformator. Na slici 5.34 su prikazani fotonaponska ćelija, modul i panel.



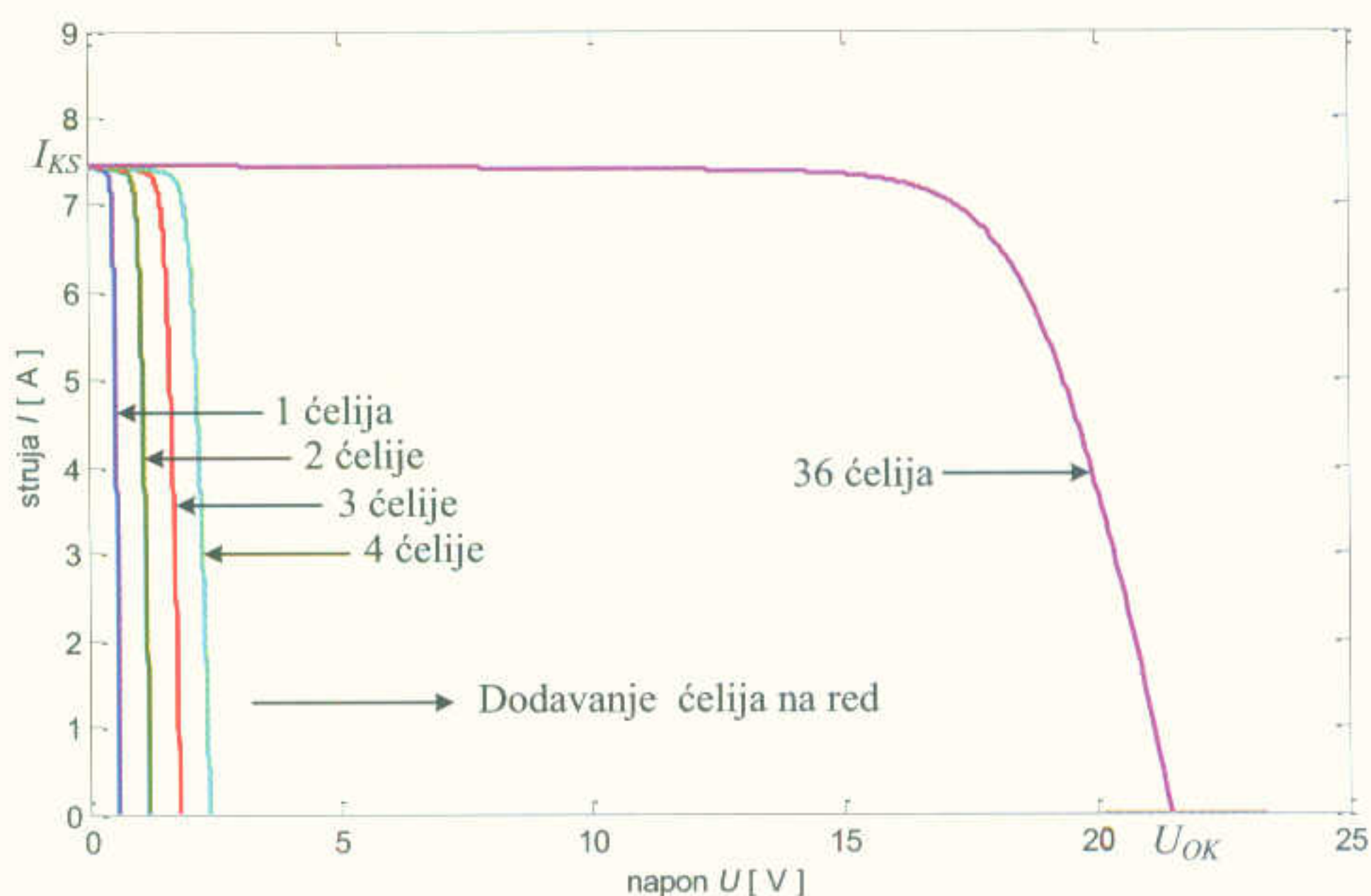
Slika 5.34. Fotonaponska ćelija, modul i panel

5.3.1 Fotonaponski moduli

Fotonaponske ćelije su vezane na red u modulu, tako da sve proizvode identičnu struju, a naponi im se sabiraju. Napon fotonaponskog modula se dobija množenjem napona jedne ćelije prema izrazu (5.10) sa brojem ćelija n :

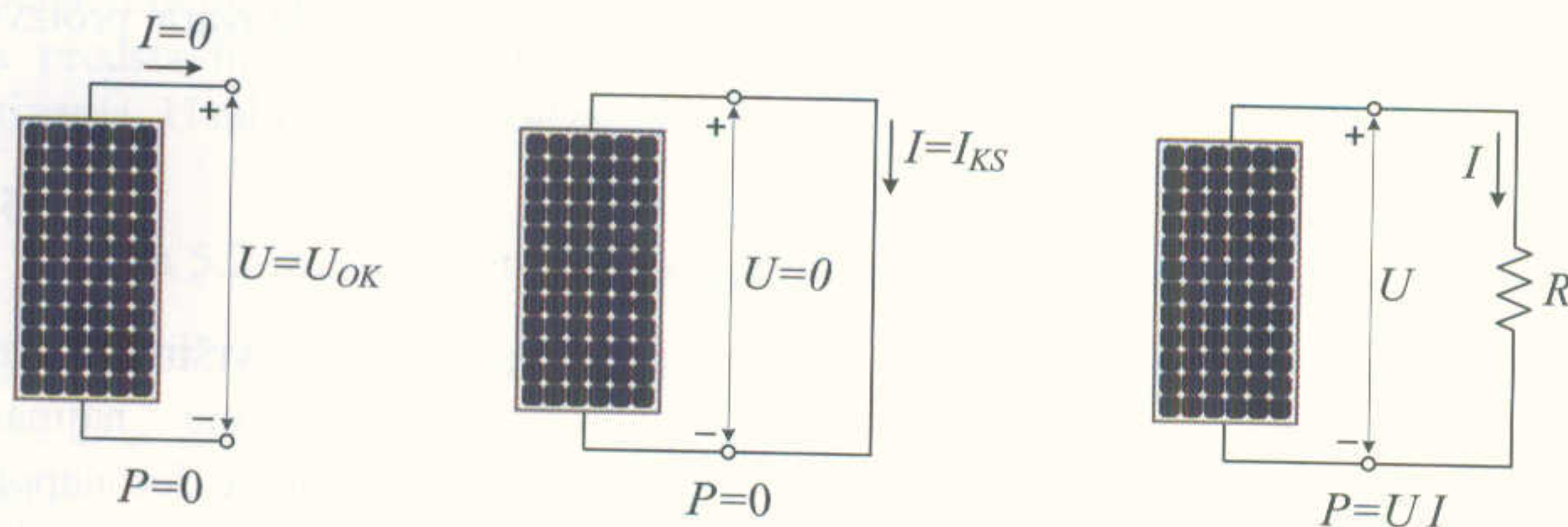
$$U = n (U_d - R_s I) \quad (5.22)$$

Strujno-naponska karakteristika fotonaponskog modula se dobija sabiranjem napona na karakteristikama ćelija pri istim strujama, kao što je prikazano na slici 5.35.



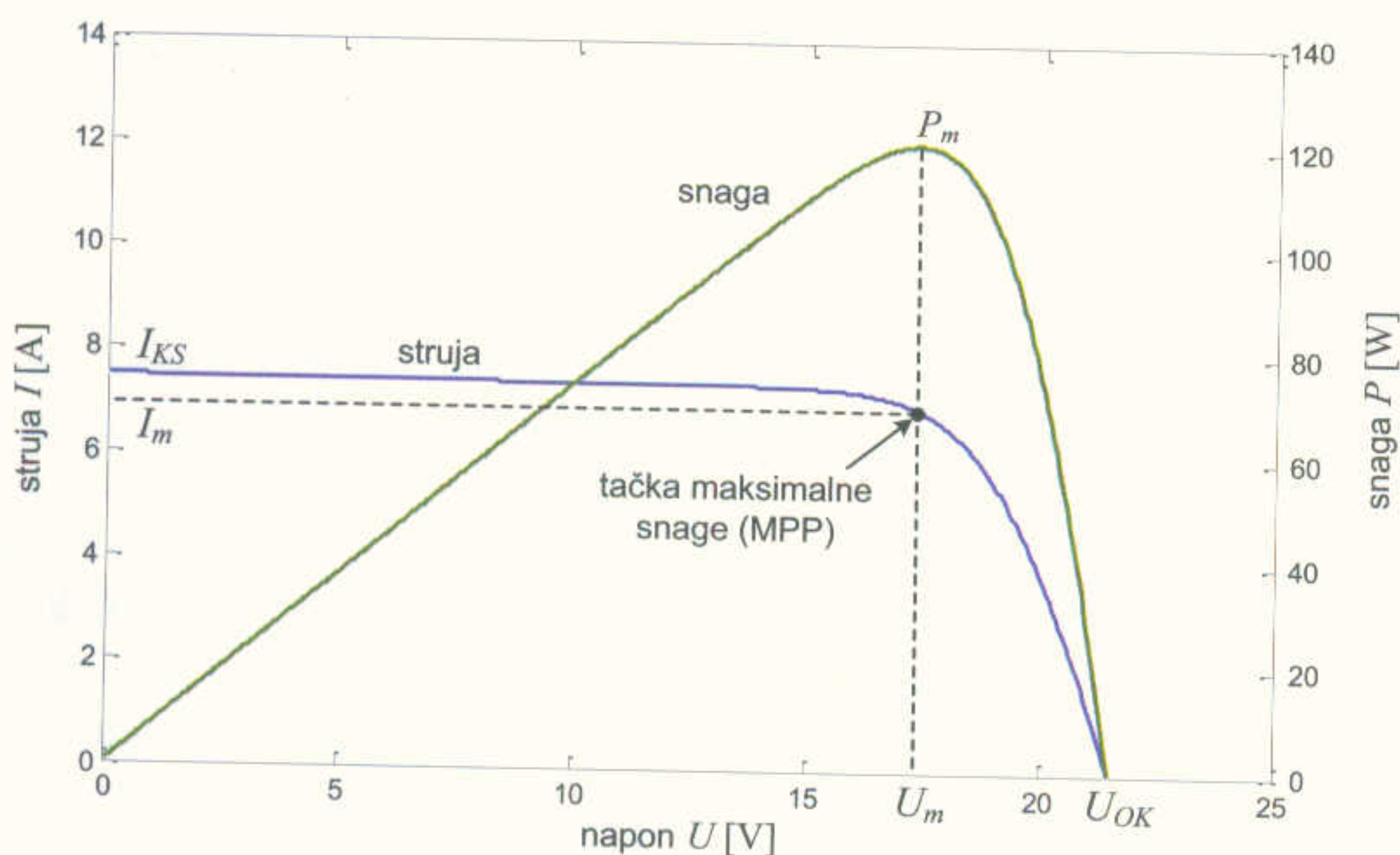
Slika 5.35. Strujno-naponska karakteristika fotonaponskog modula

Slično kao kod fotonaponske ćelije, i kod fotonaponskog modula se mogu razmatrati režimi kratkog spoja i otvorenog kola. Na slici 5.36 su prikazana ova dva karakteristična radna režima, kao i režim rada kada fotonaponski modul napaja potrošač. U režimu kratkog spoja izlazna struja modula je jednaka struji kratkog spoja I_{KS} , a izlazni napon modula je jednak nuli. U režimu otvorenog kola modul generiše napon otvorenog kola U_{OK} , a struja modula je jednaka nuli. S obzirom da je snaga proizvod napona i struje, u ova dva karakteristična radna režima izlazna snaga modula je jednaka nuli. Kada je potrošač priključen na fotonaponski modul, pri nekom naponu i struji isporučuje se snaga potrošaču. Da bi se utvrdilo kolika je snaga koju modul isporučuje potrošaču, neophodno je razmatrati strujno-naponsku karakteristiku modula, kao i strujno-naponsku karakteristiku potrošača.



Slika 5.36. Snaga fotonaponskog modula pri karakterističnim režimima rada

Na slici 5.37 prikazana je strujno-naponska karakteristika modula i označene su osnovne veličine: napon otvorenog kola U_{OK} , struja kratkog spoja I_{KS} , kao i napon U_m i struja I_m pri kojima je definisana tačka maksimalne snage. Na slici 5.37 je takođe prikazana karakteristika snage fotonaponskog modula, dobijena kao proizvod napona i struje modula. Na krajevima strujno-naponske karakteristike snaga je jednaka nuli jer su ili napon ili struja jednaki nuli u tim tačkama.



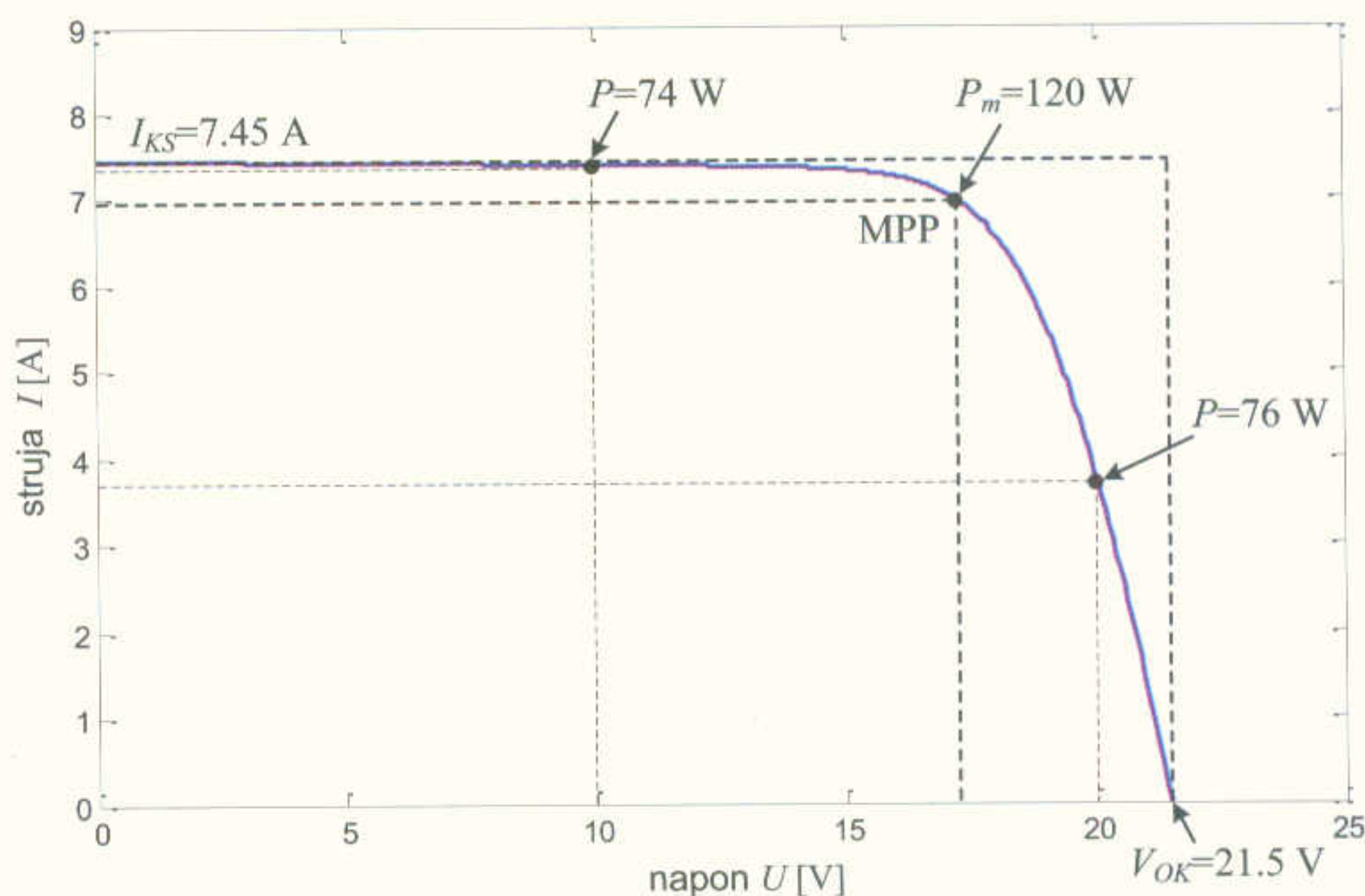
Slika 5.37. U - I karakteristika i karakteristika snage fotonaponskog modula

Tačka maksimalne snage (MPP - *Maximum Power Point*) je tačka u kolenu strujno-naponske karakteristike pri kojoj je proizvod napona i struje maksimalan. Napon i struja pri maksimalnoj snazi se najčešće označavaju kao U_m i I_m i ove veličine predstavljaju naznačeni napon i naznačenu struju fotonaponskog modula (*rated voltage* i *rated current*), pri standardnim uslovima (STC).

Drugi način da se odredi lokacija tačke maksimalne snage jeste da se nađe najveći mogući pravougaonik koji može da se smesti ispod strujno-naponske krive. Kao što je prikazano na slici 5.38, stranice pravougaonika odgovaraju struji i naponu, tako da je površina pravougaonika jednaka snazi. Postoji još jedna veličina koja se često koristi za karakterizaciju performansi modula, a to je faktor popunjenosti (*FF* - *Fill Factor*). Faktor popunjenosti je odnos maksimalne snage i snage koja odgovara proizvodu napona praznog hoda U_{OK} i struje kratkog spoja I_{KS} :

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{OK} \cdot I_{KS}} \quad (5.23)$$

Na osnovu slike 5.38, faktor popunjenosti predstavlja odnos površine najvećeg pravougaonika ispod strujne-naponske karakteristike i površine najmanjeg pravougaonika iznad strujno-naponske karakteristike. Za komercijalne fotonaponske module sa ćelijama od kristalnog silicijuma faktor popunjenosti ima tipičnu vrednosti od oko 77% a za module sa tankoslojnim amorfnim silicijumom faktor popunjenosti je nešto niži, oko 75%.



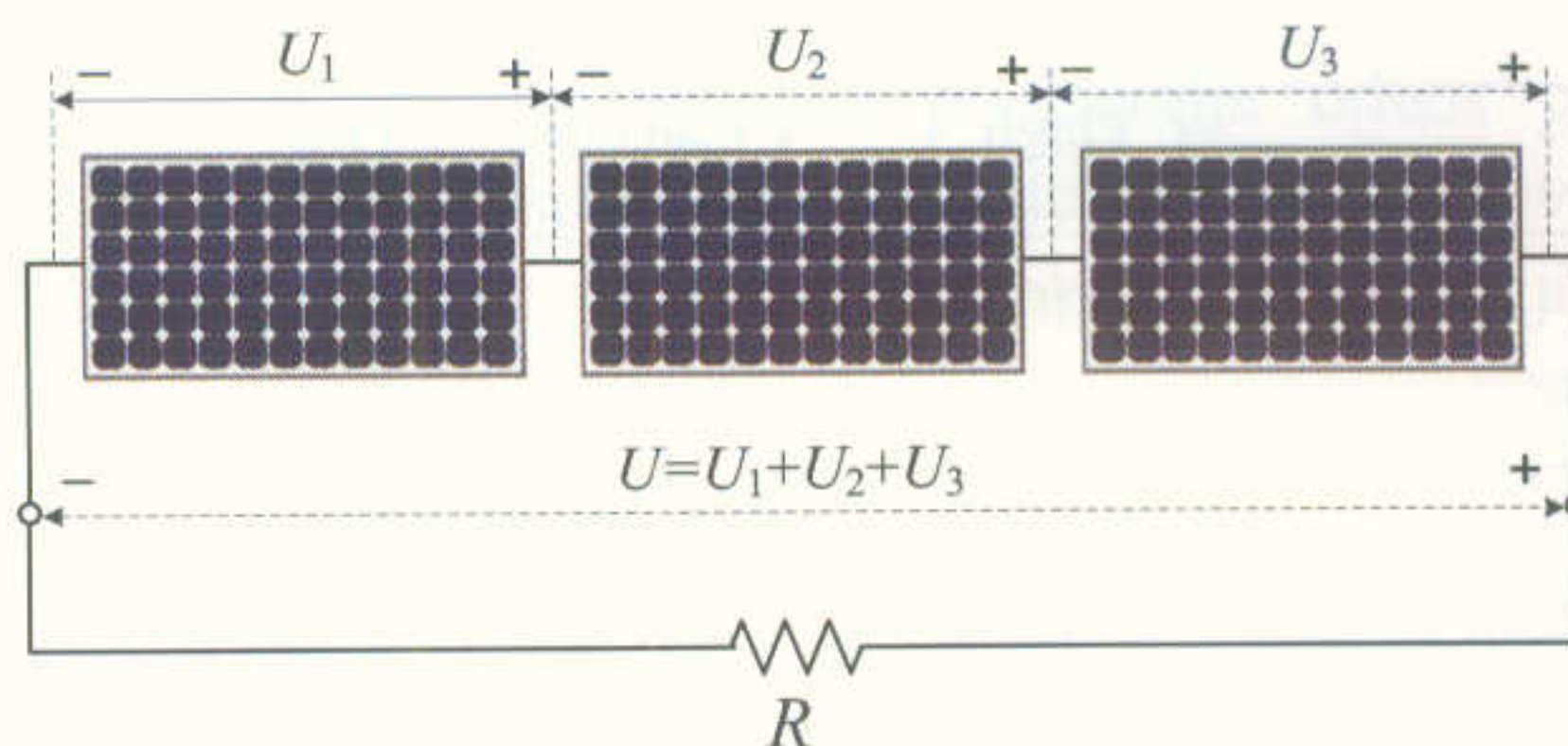
Slika 5.38. Optimalna radna tačka fotonaponskog modula (MPP) na I - U karakteristici

Pošto se strujno-naponska karakteristika fotonaponskog modula menja sa promenom iradijancije i temperature, ustanovljeni su standardni uslovi ispitivanja (STC - *Standard Test Conditions*) da bi se izvršilo poređenje fotonaponskih modula. Standardni uslovi ispitivanja podrazumevaju solarnu iradijansu od 1 kW/m^2 (jedno

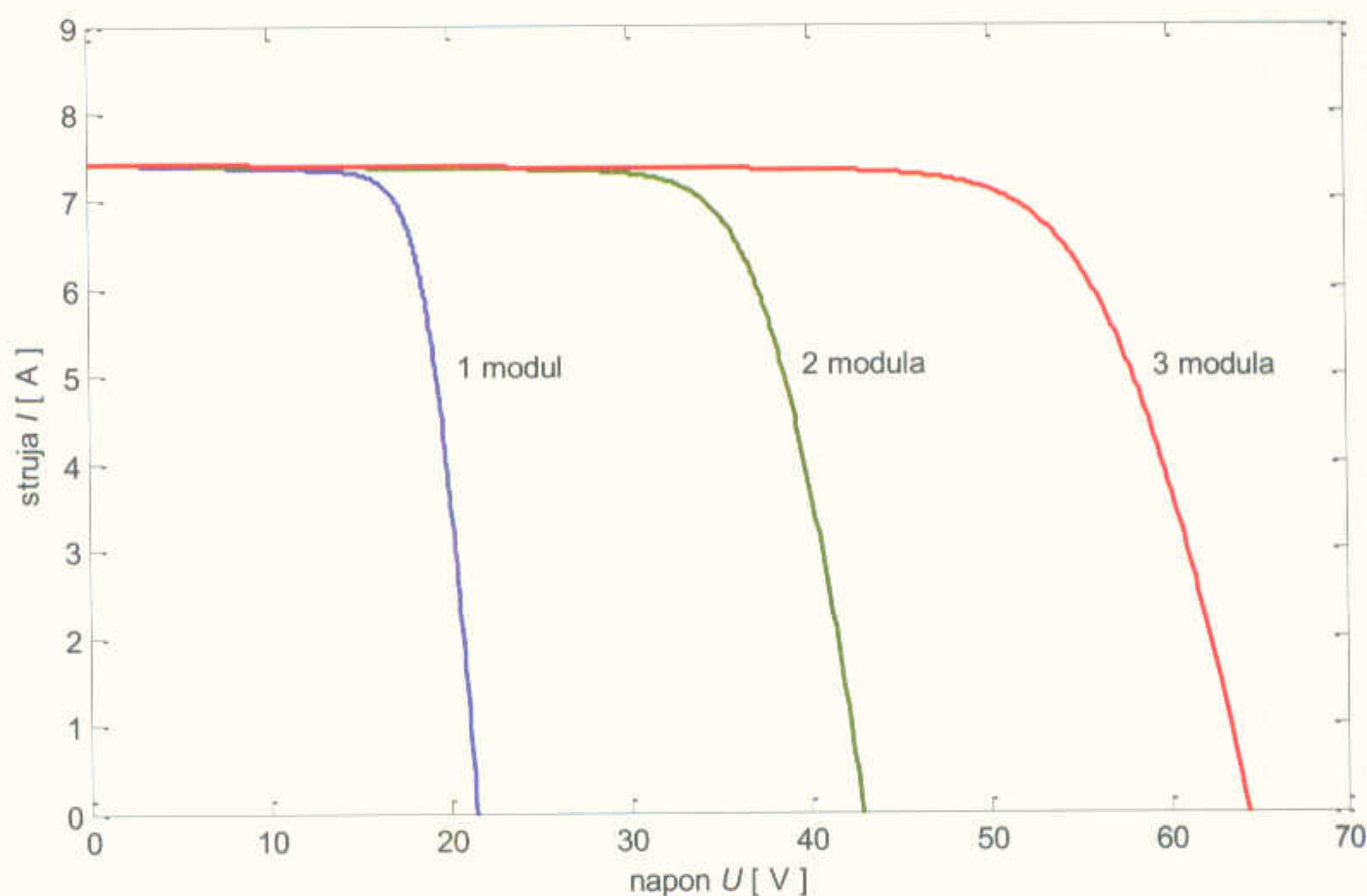
poluprovodničkog sloja. Proizvođači pokušavaju da osvoje tehnologije koje će omogućavati bolji kvalitet proizvoda u pogledu stabilnosti performansi u toku eksploatacionog veka. Današnje tehnologije izrade omogućavaju životni vek komercijalnih silicijumskih modula od oko 25 godina, pri čemu njihova efikasnost linearno opada tokom životnog veka sa gradijentom 0,8-1% godišnje. Dakle, solarni modul na kraju svog životnog veka imaju oko 20% manju efikasnost od deklarisanе vrednosti koju imaju neposredno nakon instalacije.

5.3.2 Fotonaponski paneli

Fotonaponski paneli su sačinjeni od rednih i paralelnih veza modula da bi se dobila veća izlazna snaga. Paneli koji su sačinjeni od redno vezanih modula imaju istu struju kroz sve module (struju koja je jednaka struji jednog modula), a napon panela je jednak zbiru napona pojedinih modula za tu struju. Redna veza tri modula je prikazana na slici 5.39, a strujno-naponska karakteristika panela sastavljenog iz redne veze modula je prikazana na slici 5.40.

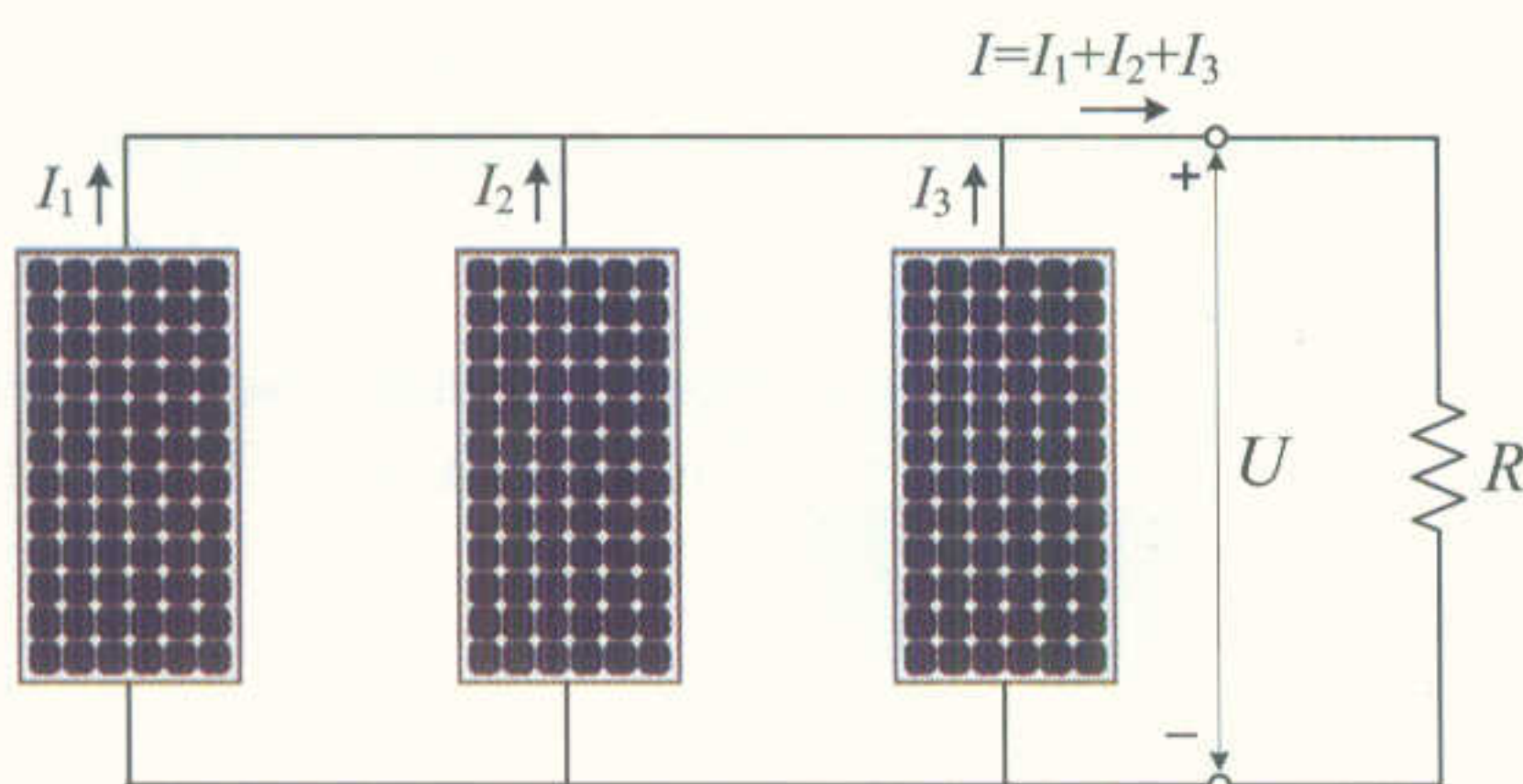


Slika 5.39. Redna veza modula

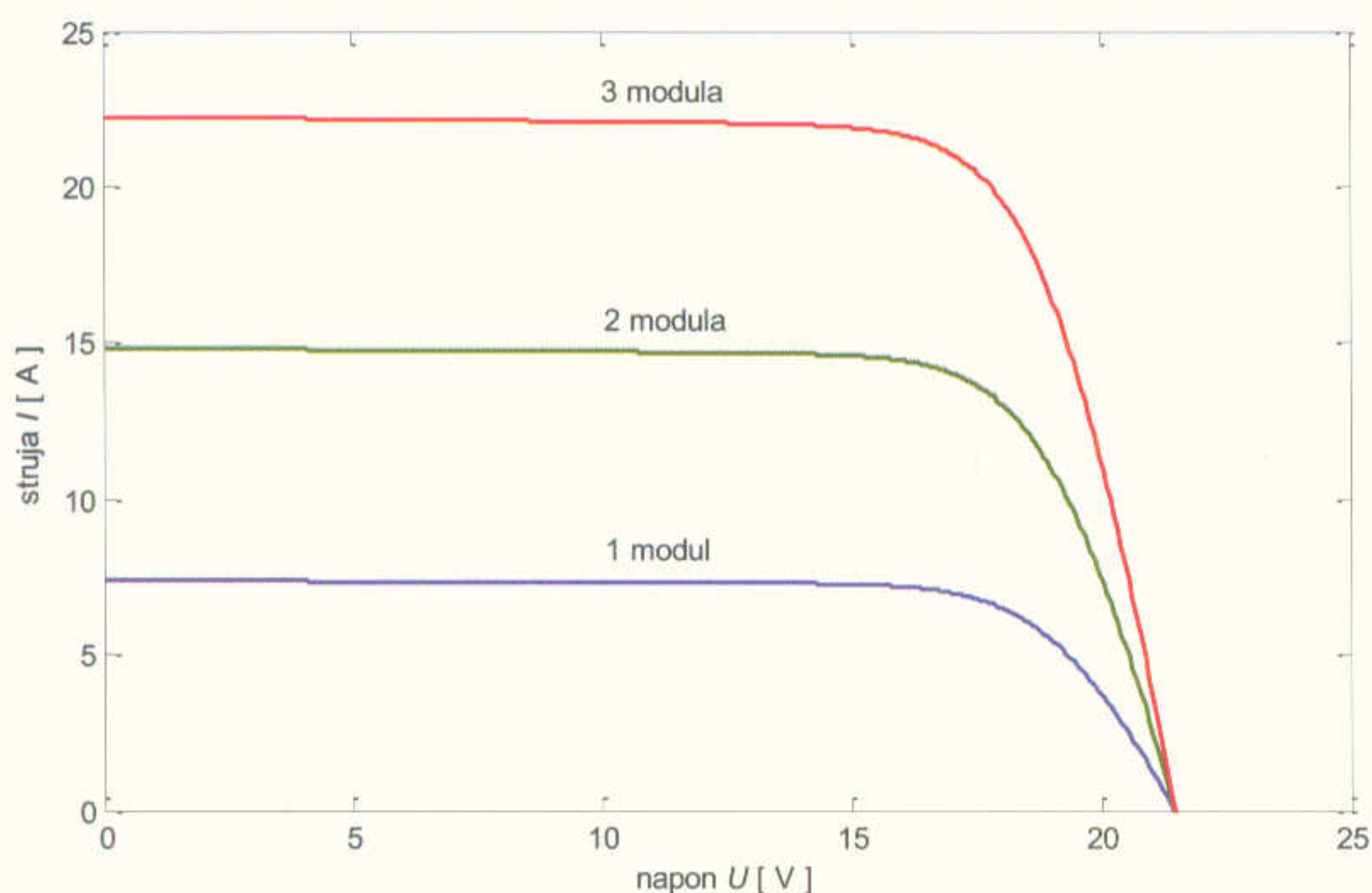


Slika 5.40. Strujno-naponska karakteristika panela sastavljenog iz redne veze modula

Panely sačinjeni od paralelno vezanih modula imaju isti napon na svim modulima, a struja panela je jednaka zbiru struja pojedinih modula na tom naponu. Paralelna veza modula je prikazana na slici 5.41, a strujno-naponska karakteristika panela sastavljenog iz redne veze modula je prikazana na slici 5.42.



Slika 5.41. Paralelna veza modula

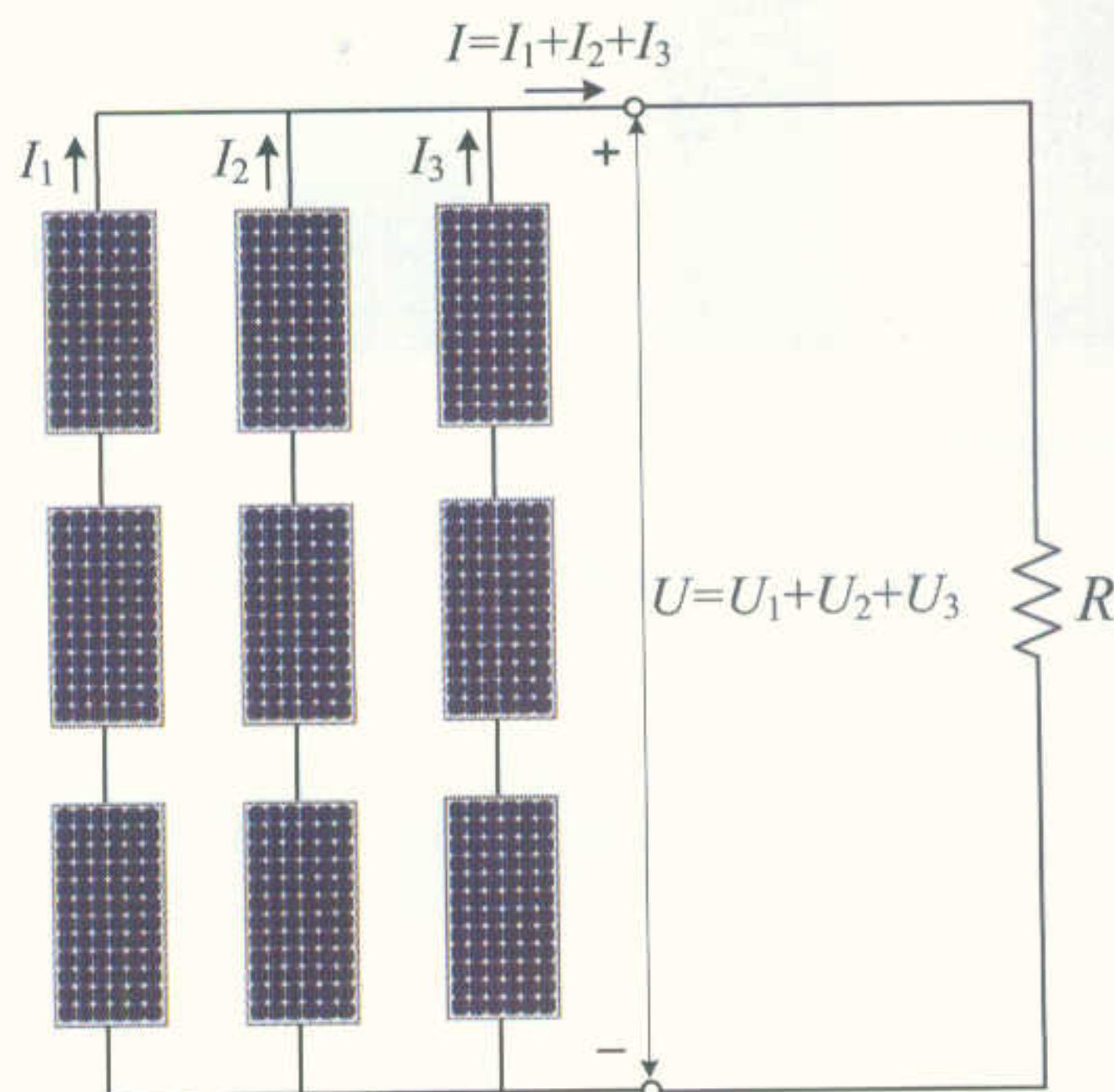


Slika 5.42. Strujno-naponska karakteristika panela sastavljenog iz paralelne veze modula

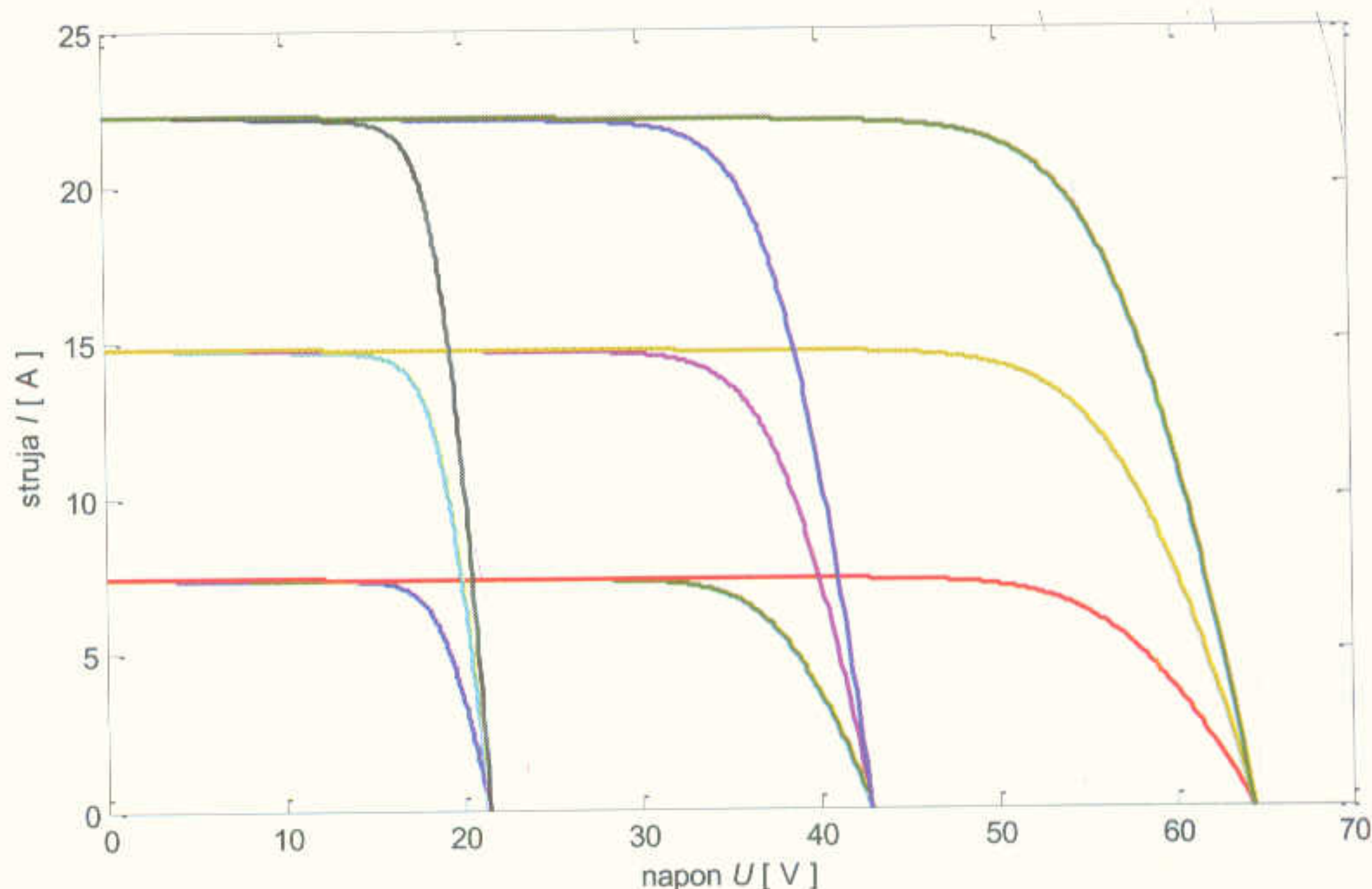
Kada se zahteva velika snaga, paneli se sastoje od kombinacije rednih i paralelnih veza modula. Strujno-naponske karakteristike takvih panela se dobijaju sabiranjem strujno-naponskih karakteristika pojedinih modula. Za redno vezane module, strujno-naponske karakteristike se sabiraju duž naponske ose, a za paralelno vezane module strujno-naponske karakteristike se sabiraju duž ose za struju.

Postoje dva načina da se sastave paneli sačinjeni od redno-paralelnih veza modula. Prvi način je da se moduli najpre povežu na red, a onda se redno vezani moduli

povezuju paralelno. Na taj način se dobijaju paralelne grane sa redno vezanim modulima. Drugi način je da se moduli najpre povežu u paralelu, a zatim se takve grupe vezuju na red. Prvi način povezivanja je bolji, tako da se on češće primenjuje. Naime, ako se iz nekog razloga ceo jedan red isključi, panel i dalje može da nastavi da radi sa istim naponom i smanjenom strujom. Na slici 5.43 je prikazan najčešće primenjivani način povezivanja modula (paralelne grane sa redno vezanim modulima), a strujno-naponska karakteristika takvog panela je prikazana na slici 5.44.



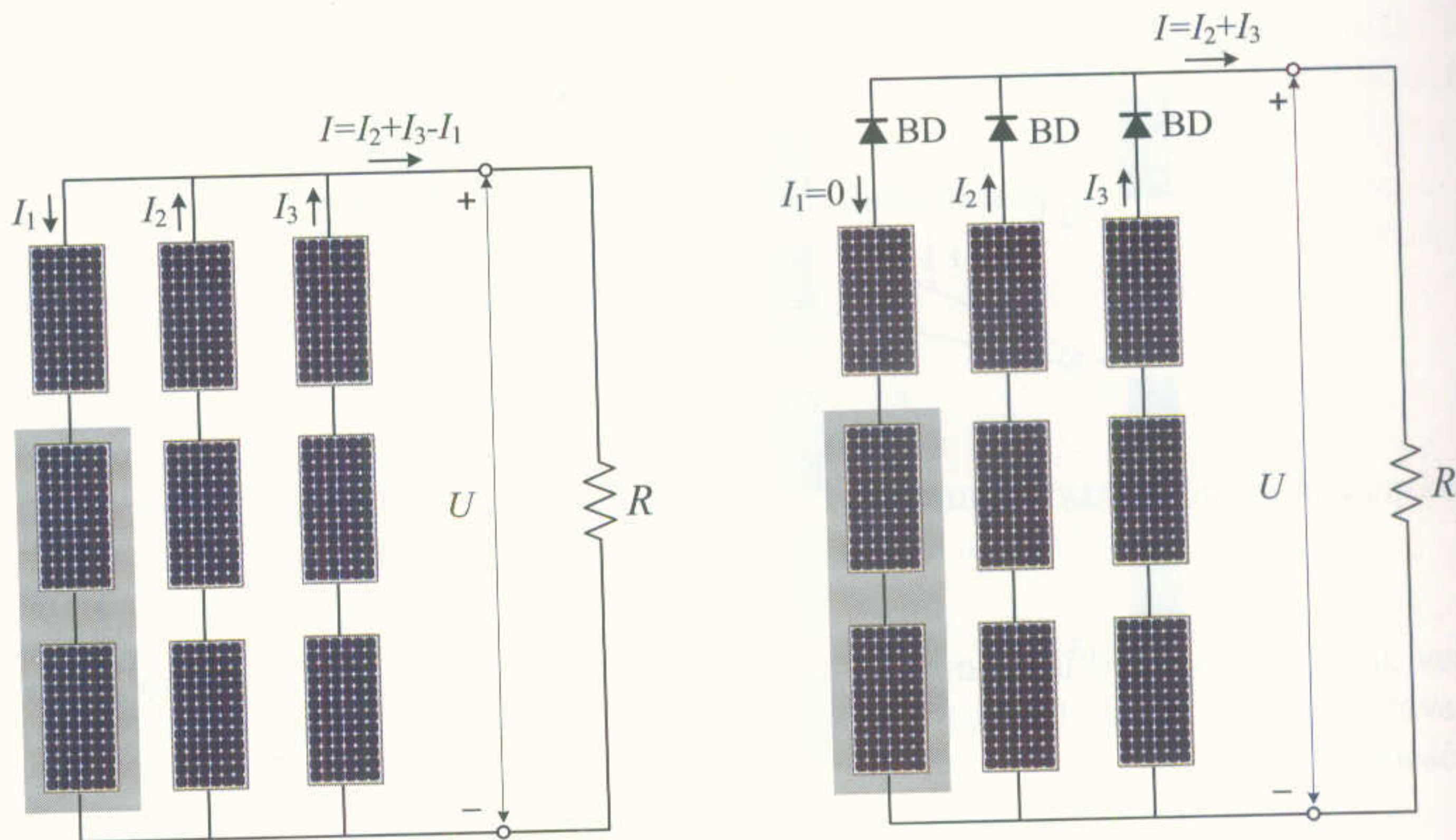
Slika 5.43. Povezivanje fotonaponskih modula u panel



Slika 5.44. Strujno-naponska karakteristika panela od tri paralelne grane sa po tri modula u svakoj od grana

5.4.3 Dioda za zaštitu od inverzne struje ("blokirajuće diode")

Kao što je ranije rečeno, fotonaponski paneli se formiraju od redno i paralelno vezanih modula. Kod paralelne veze modula neophodno je koristiti uređaje za zaštitu od inverzne struje kroz nizove (stringove) modula. U tu svrhu mogu da se koriste diode. Njihova funkcionalna uloga je prikazana na slici 5.53.



Slika 5.53. Raspodela struja u panelu sa i bez blokirajućih dioda u paralelnim granama

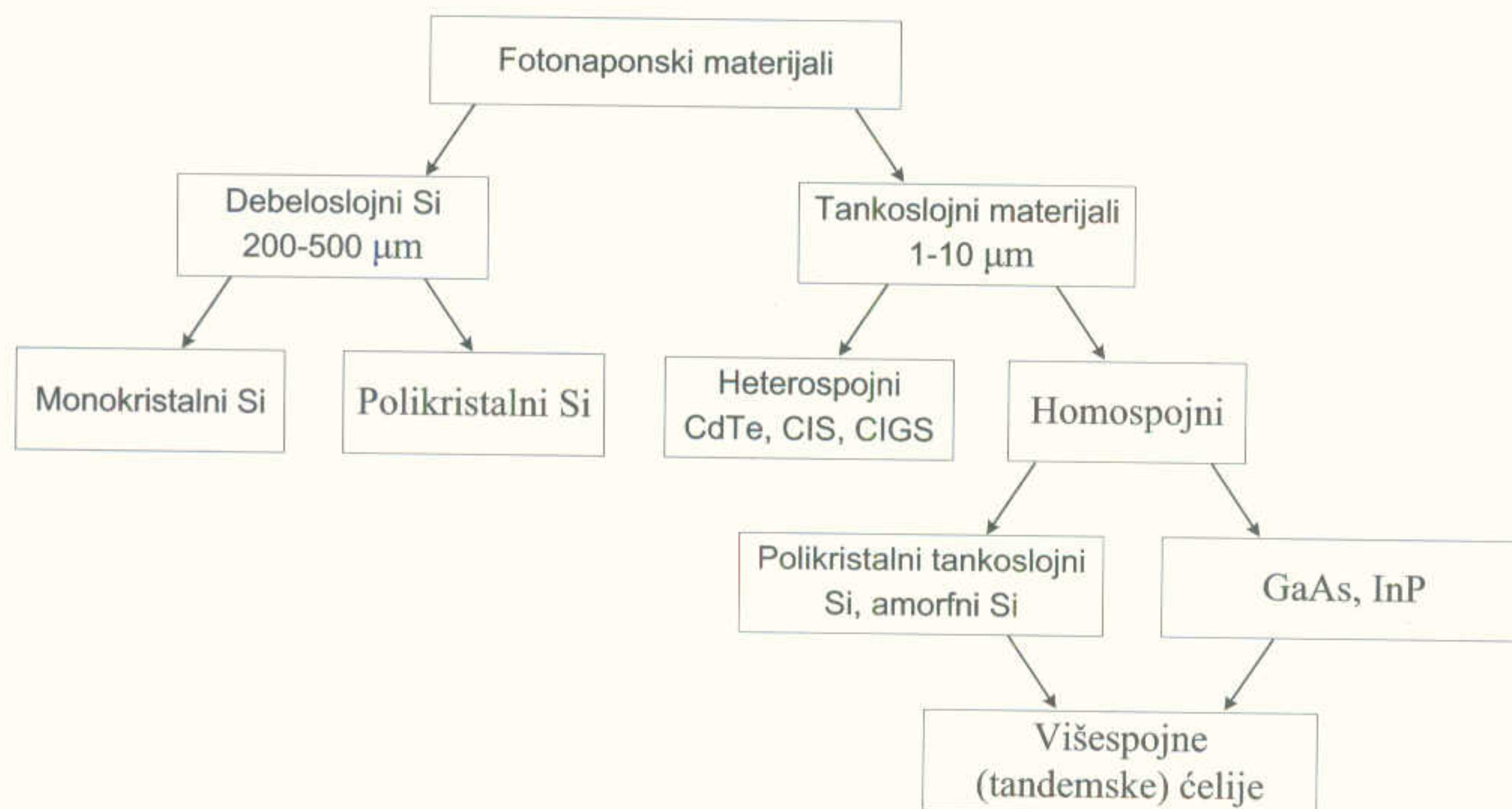
U slučaju zasenčenja većeg dela panela (ili oštećenja nekoliko modula) kojeg čine redno vezani moduli, struja koju generišu moduli ostalih rednih veza bi se delom zatvarala kroz zasenčeni deo panela, a delom kroz opterećenje. Dioda za zaštitu od inverzne struje sprečavaju uspostavljanje struje u suprotnom smeru kroz module i na taj način održavaju efikasnost panela i u uslovima delimičnog zasenčenja ili oštećenja. U normalnom radnom režimu diode za zaštitu od inverzne struje su polarisane u direktnom smeru i nesmetano provode struju. Treba imati u vidu da se na njima javljaju izvesni gubici snage koji su srazmerni struji koju provode i naponu direktne polarizacije dioda. Zbog toga se izbegava korišćenje dioda za zaštitu od inverzne struje, osim u sistemima gde zaštita bazirana na osiguračima ne može biti adekvatno odabrana.

5.5 Tipovi fotonaponskih materijala

Osnovna podela fotonaponskih ćelija se vrši na osnovu debljine poluprovodnog materijala. Konvencionalne fotonaponske ćelije od kristalnog silicijuma imaju relativno veliku debljinu koja iznosi 200-500 μm . Ćelije izrađene od kristalnog

silicijuma imaju visoku efikasnost, dobru pouzdanost i dug životni vek, ali su i relativno skupe. Drugi pristup u izradi fotonaponskih ćelija se zasniva na tankim filmovima poluprovodnika, debljine 1-10 μm . Fotonaponske ćelije izrađene u vidu tankih filmova zahtevaju znatno manje poluprovodnog materijala i jednostavnije su za izradu, tako da su jeftinije od klasičnih debeloslojnih fotonaponskih ćelija. Osnovni nedostaci fotonaponskih ćelija izrađenih u vidu tankih filmova je njihova mala efikasnost konverzije energije sunčevog zračenja u električnu energiju i nešto kraći životni vek. Iako su karakteristike ovih ćelija poboljšane tokom vremena, njihov udeo na tržištu fotonaponskih ćelija je relativno mali, a poslednjih godina njihov udeo je pao ispod 5% zbog izgradnje velikog broja fotonaponskih elektrana sa modulima od kristalnog silicijuma. Oblast primene fotonaponskih ćelija izrađenih u vidu tankih filmova su uglavnom džepni kalkulatori, ručni satovi i drugi elektronski potrošači. Fotonaponske ćelije se razlikuju i po tome da li su za poluprovodnike n i p tipa korišćeni isti ili različiti materijali. Ako je p - n spoj formiran od istog poluprovodničkog materijala (na primer, od monokristalnog silicijuma) onda se takav spoj naziva homospoj (*homojunction*). Homospojne fotonaponske ćelije su i ćelije od galijum-arsenida (GaAs) i indijum-fosfida (InP) jer se isto jedinjenje (GaAs ili InP) dopira u cilju dobijanja poluprovodnika p i n tipa. U slučaju kada se koriste različiti poluprovodnički materijali u p - n spoju, onda se takav spoj naziva heterospoj (*heterojunction*). Na primer, jedna perspektivna heterospojna kombinacija koristi kadmijum-sulfid CdS kao poluprovodnik n -tipa i bakar-indijum-diselenid CuInS₂ (CIS) kao poluprovodnik p -tipa. Takođe postoje i višespojne (*multijunction*) fotonaponske ćelije (takozvane tandemske ili kaskadne ćelije) sa više p - n spojeva koji su izrađeni sa ciljem da svaki p - n spoj apsorbuje određeni deo sunčevog spektra.

Na slici 5.54 su prikazani osnovni tipovi fotonaponskih materijala.

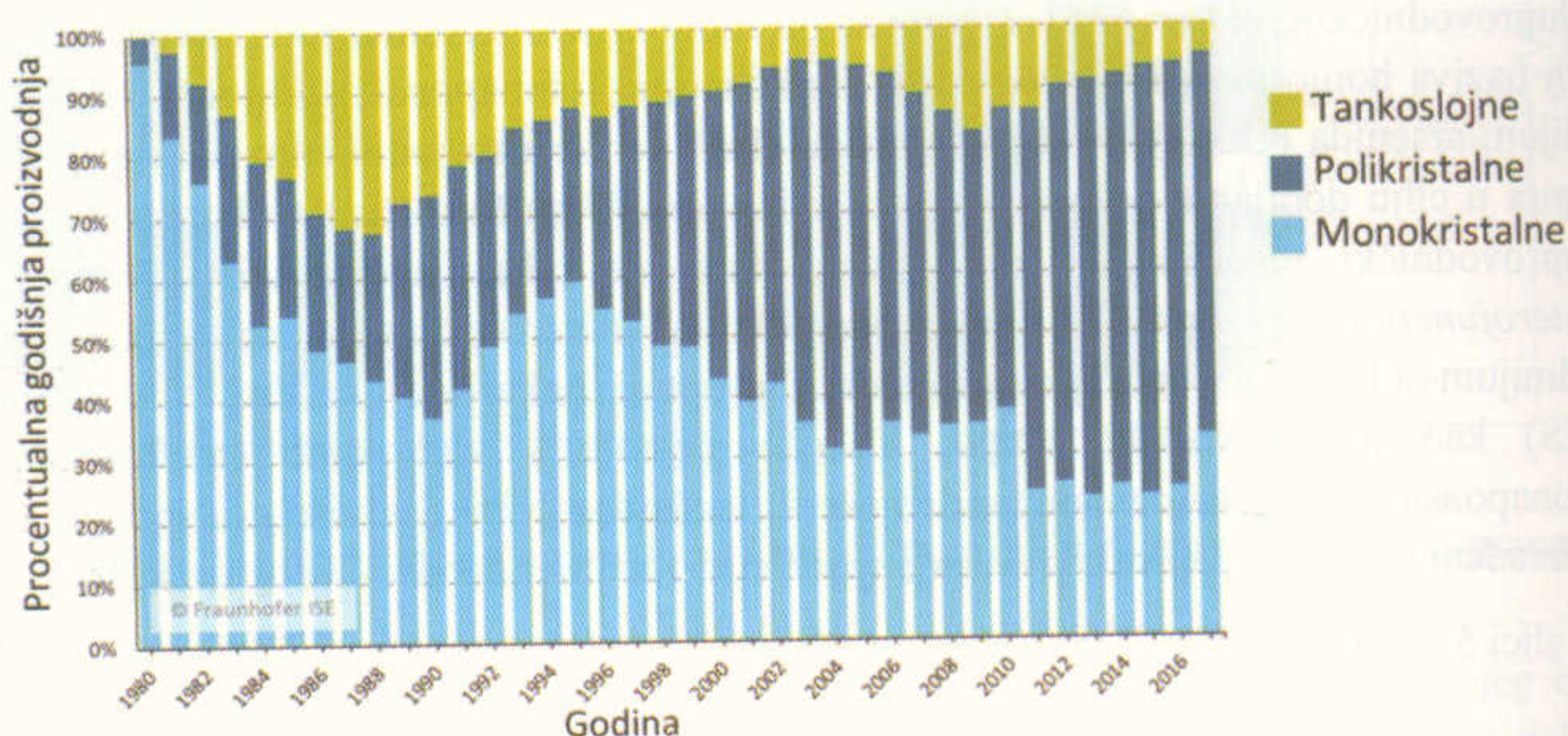


Slika 5.54. Osnovni tipovi fotonaponskih materijala

Na osnovu slike 5.54, mogu se izdvojiti osnovne grupe fotonaponskih materijala:

- debeloslojni materijali od monokristalnog i polikristalnog silicijuma (mono-Si, poly-Si)
- tankoslojni heterospojni polikristalni materijali (CdTe, CIS-CuInSe₂)
- tankoslojni homospojni polikristalni i amorfni silicijum (poly-Si, a-Si)
- tankoslojni homospojni monokristalni materijali (GaAs, InP)
- tankoslojne višespojne ćelije – kombinacije raznih materijala

Na slici 5.55 prikazan je trend u proizvodnji fotonaponskih modula različitih tehnologija. U toku 2017. godine u svetu je proizvedeno 97,5 GW fotonaponskih modula, od čega je 60,8 GW polikristalnih silicijumskim modula, 32,2 GW monokristalnih silicijumskih i svega 4,5 GW modula tankoslojnim solarnim ćelijama.

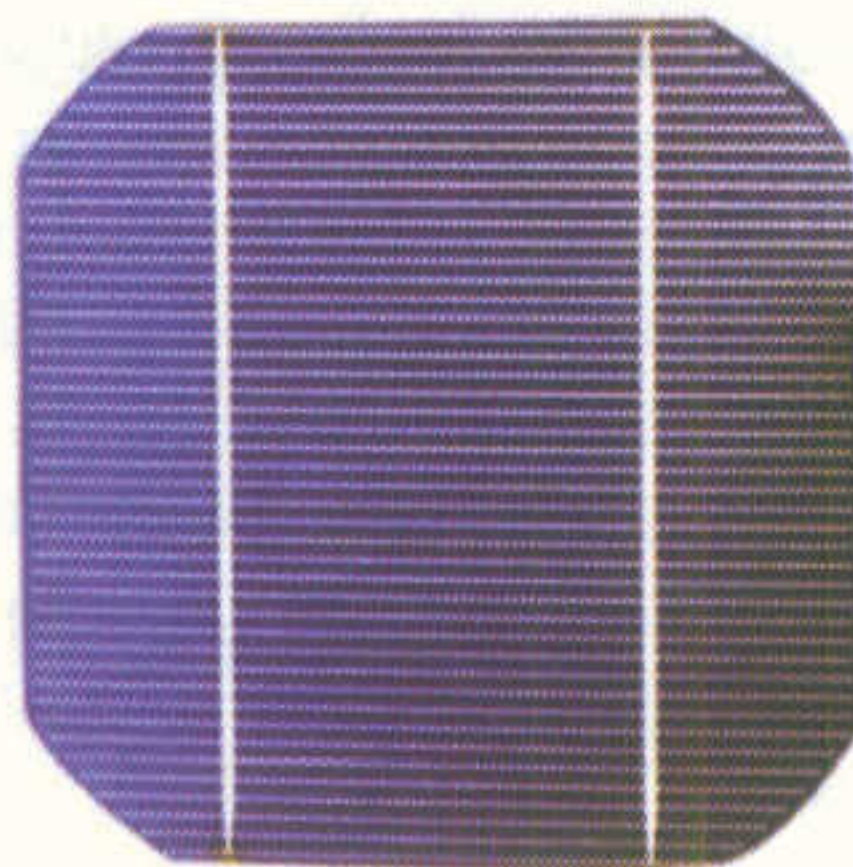


Slika 5.55 trend u proizvodnji fotonaponskih modula različitih tehnologija
(izvor: *Fraunhofer ISE*)

5.5.1 Monokristalni silicijum

Monokristalni materijali imaju u sebi velike kristale koji sadrže malo strukturnih defekata. Fotonaponske ćelije izrađene od monokristalnog silicijuma imaju homospojnu strukturu, što znači da se sastoje od istog materijala koji je modifikovan tako da je na jednoj strani ćelije p sloj, a na drugoj n sloj silicijumskog poluprovodnika. Unutar ćelije $p-n$ spoj je lociran tako da se maksimum sunčevih zraka apsorbira blizu spoja, kako bi stvoreni elektroni i šupljine bili zahvaćeni i razdvojeni poljem prostornog tovara. Debljina aktivne površine ovih ćelija iznosi 200 do 400 μm . Tipične dimenzije fotonaponske ćelije od kristalnog silicijuma su 150 mm $\times$ 150 mm. Prednost solarnih ćelija od monokristalnog silicijuma je relativno visoka efikasnost. Nedostatak je visoka cena zbog kompleksnog procesa proizvodnje. Najpouzdanije

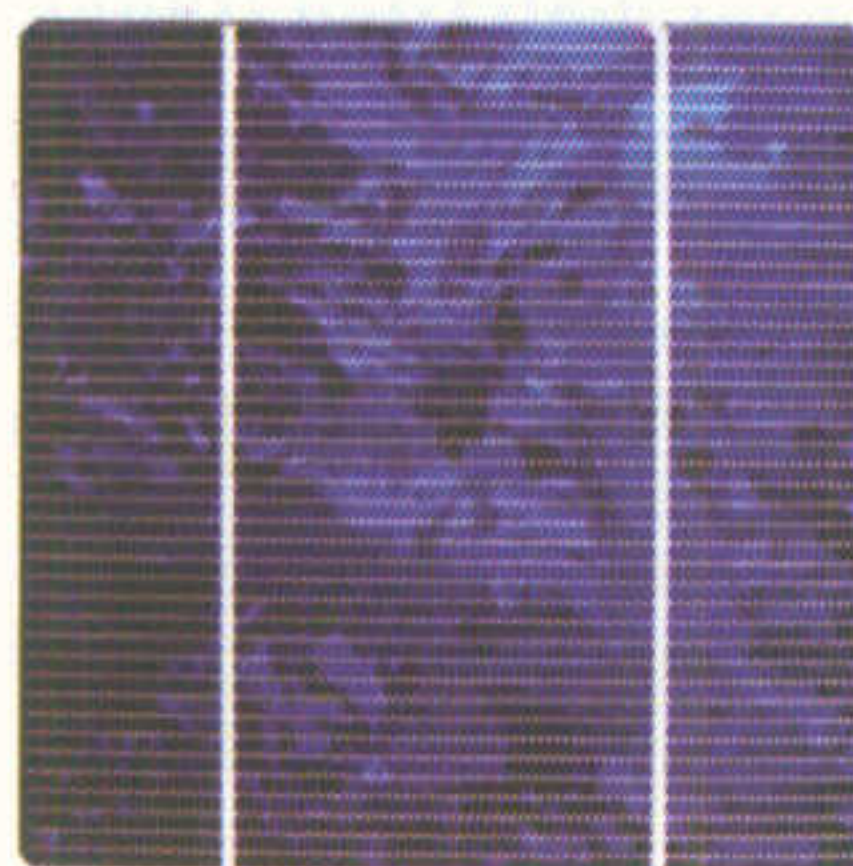
metode za proizvodnju monokristalnog silicijuma su *Czochralski* (CZ), *Float-zone* (FZ) i *Ribbon growth* tehnologija. Na slici 5.56 je prikazana fotonaponska ćelija od monokristalnog silicijuma.



Slika 5.56. Fotonaponska ćelija od monokristalnog silicijuma

5.5.2 Polikristalni silicijum

Kao i kod ćelija od monokristalnog silicijuma, fotonaponske ćelije izrađene od polikristalnog silicijuma imaju homospojnu strukturu. Za razliku od monokristalnog silicijuma, polikristalni silicijum je građen od više malih kristala ili kristalnih zrna. Granice između tih kristala predstavljaju tranzitne oblasti između malih monokristala i uzrokuju smanjenje efikasnosti ovakvih ćelija. Polikristalni silicijum je moguće proizvesti na više načina. Najzastupljenija metoda je izlivanje tečnog silicijuma u četvrtasti kalup i njegovo hlađenje. Proizvodnja polikristalnog silicijuma je jeftinija od proizvodnje monokristalnog, međutim, polikristalni silicijum ima manju efikasnost. Na slici 5.57 je prikazana fotonaponska ćelija od polikristalnog silicijuma.



Slika 5.57. Fotonaponska ćelija od polikristalnog silicijuma

5.5.3 Amorfni silicijum

Atomi unutar amorfnih materijala imaju malu uređenost i ne formiraju kristalnu strukturu u kojoj svaki atom gradi veze sa susedna četiri atoma. Zbog toga u amorfnim

materijalima postoji loša povezanost atoma i veliki broj veza koje nisu popunjene elektronima. Ove veze predstavljaju strukturne defekte u kojima dolazi do rekombinacije elektrona i šupljina. To rezultuje malim stepenom efikasnosti materijala. Međutim, uočeno je da se defekti mogu delimično ukloniti ako se u amorfni silicijum ugradi mala količina vodonika. Posledica takvog tretiranja amornog silicijuma je kombinovanje atoma vodonika sa atomima silicijuma koji nisu vezani sa drugim atomima silicijuma, tako da elektroni mogu nesmetano putovati kroz materijal. Danas se amorfni silicijum koristi u uređajima koji koriste sunčevu energiju kao izvor napajanja i imaju male energetske zahteve (kalkulatori, ručni satovi i slični uređaji). Amorfni silicijum efikasnije upija sunčevo zračenje od monokristalnog silicijuma i upravo to svojstvo amornog silicijuma bi moglo sniziti cenu fotonaponske tehnologije. Druge prednosti amornog silicijuma su te što može biti položen na jeftine podloge kao što su staklo, metal ili plastika, što ga čini idealnim za izradu tankih filmova i za integrisanje u sastavne delove uređaja i objekta. Na slici 5.58 je prikazan fotonaponski modul od amornog silicijuma.



Slika 5.58. Fotonaponski modul od amornog silicijuma

5.5.4 Tankoslojni fotonaponski materijali (tanki filmovi)

Termin tankoslojni, tačnije tanki film, odnosi se na tehnologiju polaganja filma, pošto se tankoslojne fotonaponske ćelije polažu u izrazito tankim, uzastopnim slojevima atoma, molekula ili jona. Fotonaponske ćelije izrađene od tankog filma imaju izvesne prednosti u odnosu na ćelije izrađene klasičnim metodama:

- pri izradi tankoslojnih ćelija koristi se znatno manje materijala pošto je debljina takvih ćelija od 1 μm do 10 μm dok su klasične Si ćelije debljine od 100 μm do 300 μm ,
- tankoslojne ćelije se proizvode automatizovanim procesima i mogu se polagati na jeftine podloge (staklo, nerđajući čelik, plastika i sl.),
- ćelijama izrađenim tehnologijom tankog filma nije potrebna metalna mreža za gornji kontakt (kao kod ćelija od kristalnog silicijuma), već koriste tanki sloj transparentnog materijala,
- tankoslojne ćelije se mogu polagati na fleksibilne podloge, tako da mogu formirati fleksibilne module.

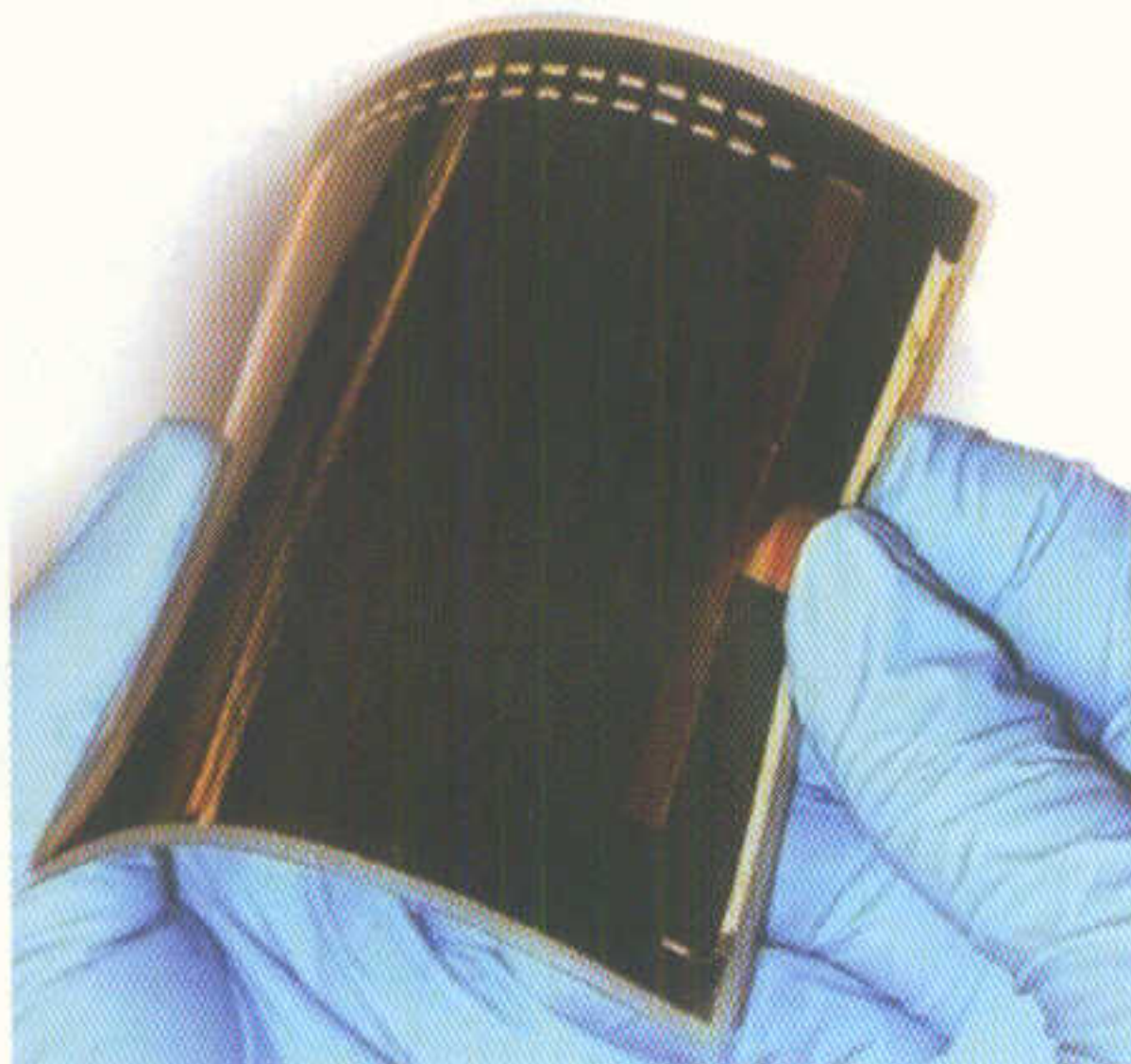
Tipična polikristalna ćelija izrađena u vidu tankog filma ima jako tanak gornji sloj n -tipa koji se naziva prozor. Uloga prozora je da propusti sunčevo zračenje i fokusira ga na spoj sa apsorbujućim slojem p -tipa tako da mora imati širok energetske procep (2.8 eV i više). Donji (apsorbujući) sloj mora imati odgovarajući energetske procep kako bi se postigla maksimalna efikasnost konverzije.

Za izradu fotonaponskih ćelija od tankoslojnih polikristalnih materijala koriste se polikristalni ili amorfni silicijum (homospojna struktura) ili se koriste dva različita poluprovodna materijala (heterospojna struktura), kao što sto kadmijum-telurid (CdTe) i bakar-indijum- diselenid (CIS).

Kadmijum telurid (CdTe) ima energetske barijeru od 1,44 eV, što je jako blizu idealnoj vrednosti koja iznosi oko 1,4 eV (na osnovu slike 5.10). Fotonaponske ćelije u obliku tankog filma sa poluprovodnikom n -tipa od kadmijum-sulfida (CdS) i poluprovodnikom p -tipa od kadmijum-telurida (CdTe) imaju efikasnost od 17% u laboratorijskim uslovima i efikasnost od 12% u komercijalnim modulima. Ove ćelije imaju manju efikasnost u odnosu na ćelije od kristalnog silicijuma, ali su jeftinije zbog manje količine zahtevanog materijala pri izradi tankih filmova. Loša strana korišćenja kadmijuma za izradu fotonaponskih ćelija je ta što je kadmijum toksičan i kancerogen, tako da se moraju preduzeti posebne mere sigurnosti pri izradi ovih ćelija.

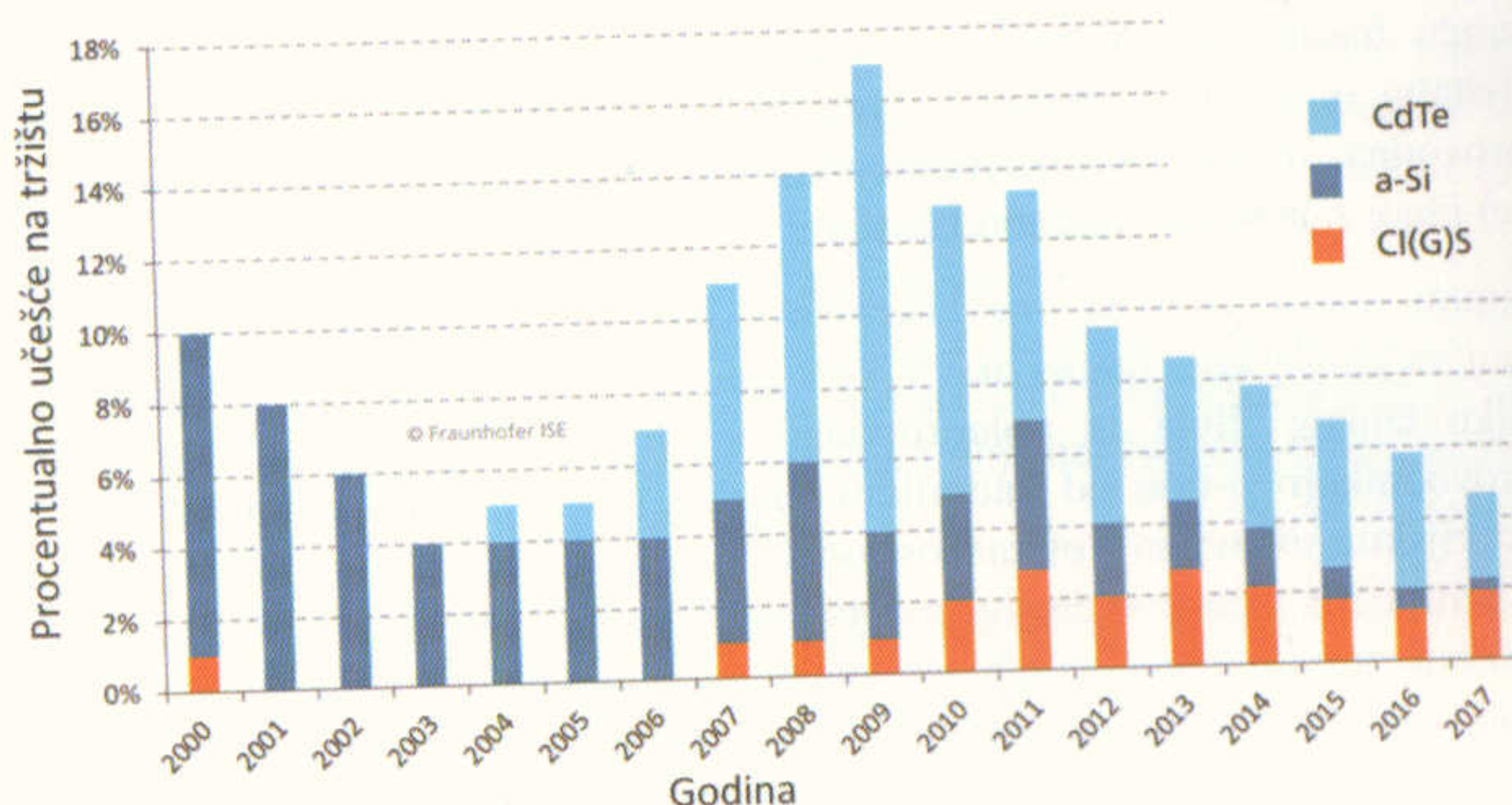
Bakar-indijum-diselenid (CuInS_2 ili CIS) ima energetske procep od 1,0 eV, što je značajno manje od optimalne vrednosti. Kada se upotrebi galijum umesto indijuma, dobija se jedinjenje koje ima energetske procep od 1,7 eV, što je veće od optimalne vrednosti od 1,4 eV. Međutim postoji mogućnost da se izvrši delimična zamena indijuma galijumom u cilju približavanja idealnoj vrednosti energetske barijere. Dobijeni materijal se naziva bakar-indijum-galijum-diselenid i označava se sa CIGS. Njegova efikasnost u laboratorijskim uslovima iznosi 20%, a u komercijalnim modulima 14%. Kod fotonaponskih ćelija CIGS se koristi kao poluprovnik p -tipa, a kao poluprovnik n -tipa se koristi tanak sloj kadmijum sulfida (CdS).

Na slici 5.59 je prikazana fotonaponska ćelija od tankoslojnog materijala.



Slika 5.59. Fotonaponska ćelija od tankoslojnog materijala

Na slici 5.60 prikazan je trend u proizvodnji fotonaponskih modula od različitih tankoslojnih materijala. U početku razvoja ovih tehnologija dominirale su ćelije od amornog silicijuma, da bi se kasnije počele razvijati tehnologije bazirane na CdTe i CIS koje danas gotovo u potpunosti potiskuju primenu amornog silicijuma. Ipak, amorfni silicijum potencijalno ima mogućnost primene kod višespojnih ćelija.



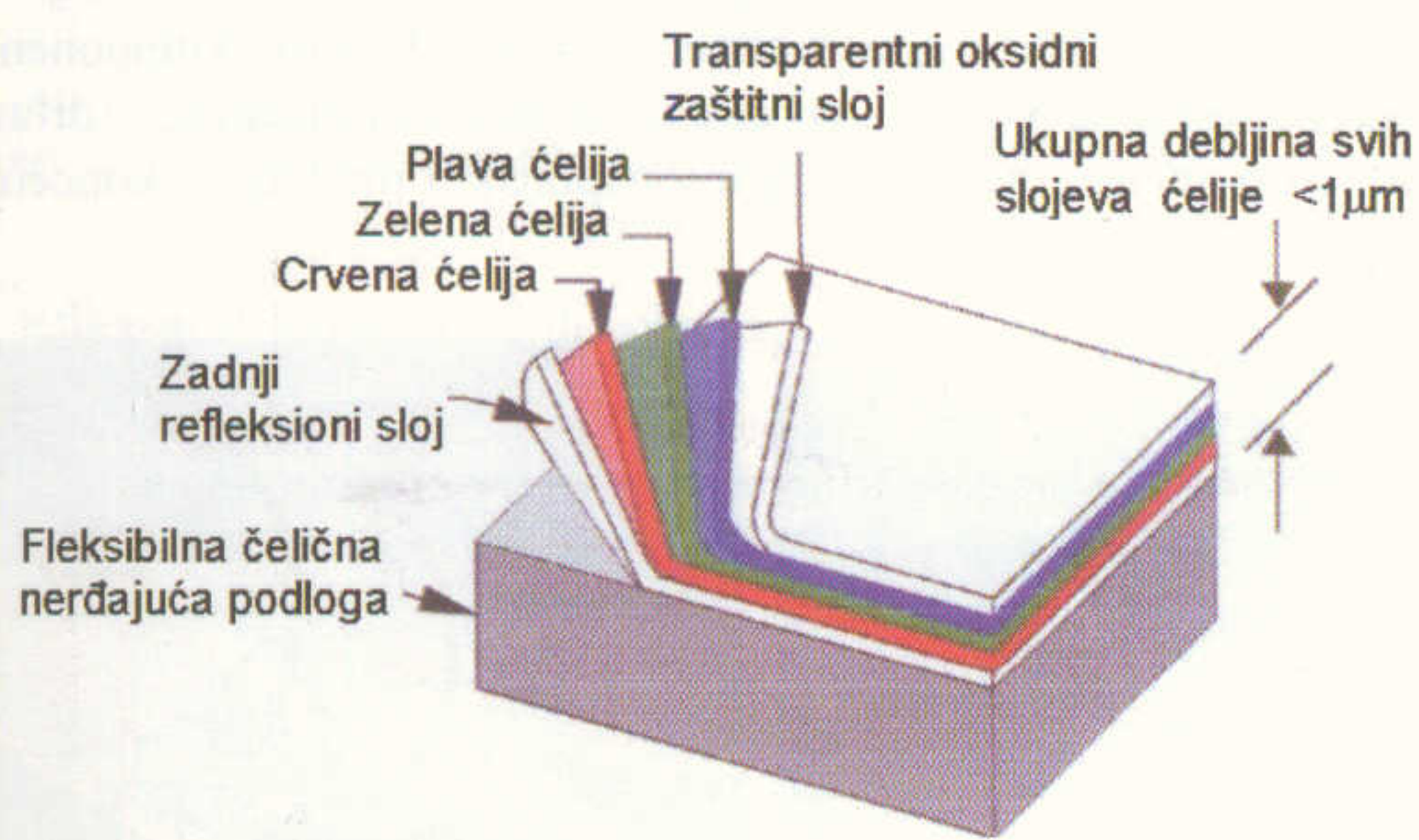
Slika 5.60. Trend u razvoju različitih tehnologija tankoslojnih fotonaponskih ćelija (izvor: *Fraunhofer ISE*)

5.5.5 Tankoslojne monokristalne fotonaponske ćelije i višespojne strukture

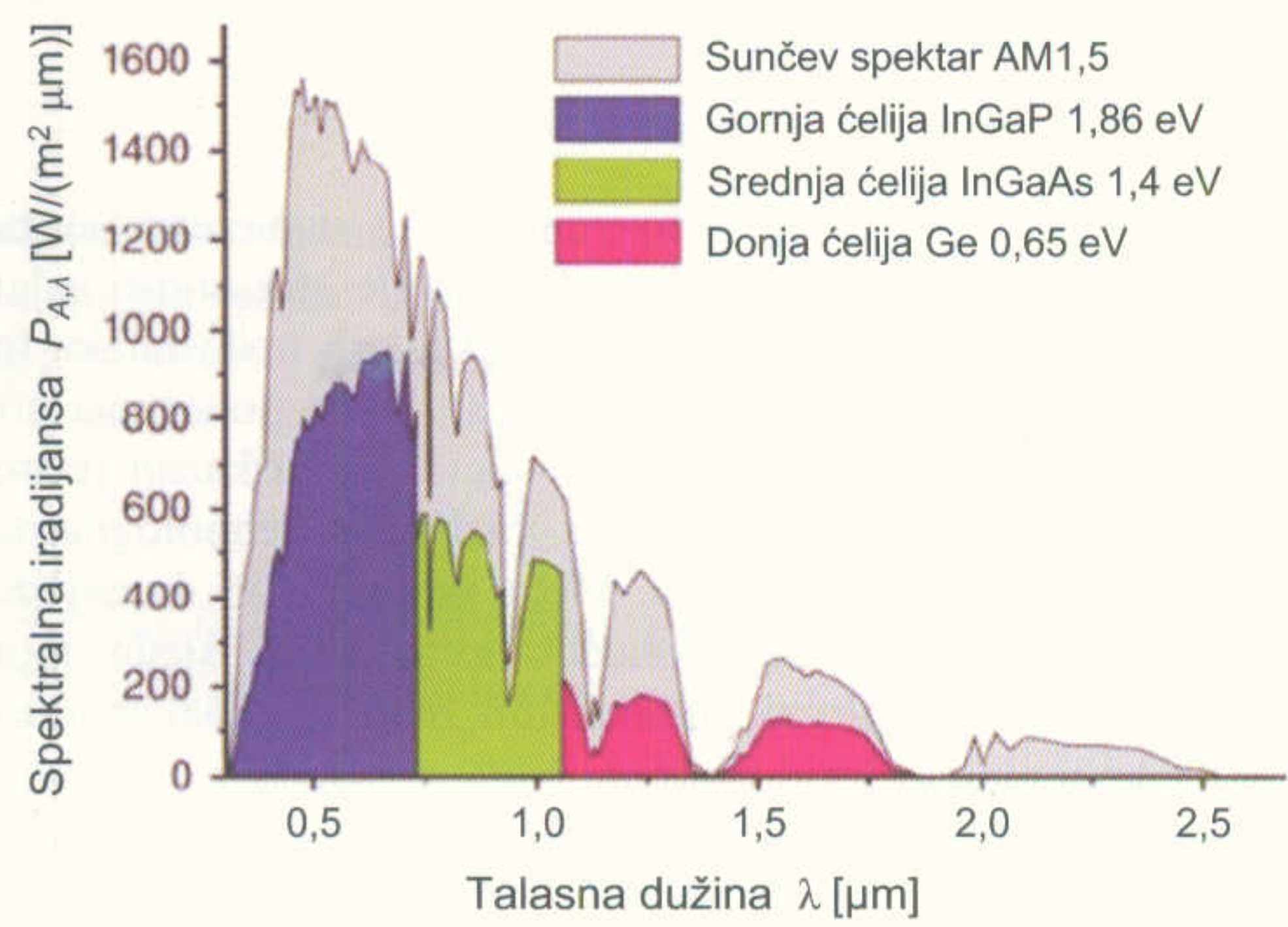
Galijum-arsenid (GaAs) se koristi za izradu tankoslojnih monokristalnih fotonaponskih ćelija, kao i višespojnih (tandemskih) ćelija. Od istog jedinjenja galijum-arsenida dopiranjem se izrađuju poluprovodnici p i n tipa. Energetska barijera galijum-arsenida iznosi 1,43 eV i jako je bliska optimalnoj vrednosti od 1,4 eV. Zbog toga, ćelije izrađene od galijum-arsenida imaju visoku efikasnost (29% bez koncentratora i 39% sa koncentratorima sunčevog zračenja). Za razliku od silicijuma, efikasnost galijum-arsenida ne zavisi od temperature i zbog toga je galijum-arsenid pogodan za korišćenje sa koncentratorima sunčevog zračenja. Pri tome, količina korišćenog galijum-arsenida može biti značajno manja, što je pogodno zbog visoke cene galijuma i njegove relativno male zastupljenosti u Zemljinoj kori.

Višespojnom strukturom postiže se visoka efikasnost fotonaponske ćelije s obzirom da se obuhvata veći deo solarnog spektra. U tipičnoj višespojnoj strukturi ćelije sa različitim energetske procepi su poslagane jedna na drugu na takav način da sunčeva svetlost prvo pada na materijal sa najvećim energetske procepi (na tzv. plavu ćeliju). Ovaj materijal apsorbuje visokoenergetski deo sunčevog spektra. Fotoni koji nisu apsorbirani u prvom materijalu prenose se na drugi materijal (tzv. zelenu ćeliju) koji apsorbuje srednji deo spektra. Poslednji materijal ima najmanju energetske barijeru i on apsorbuje fotone najmanje energije (tzv. crvena ćelija). Ovakav raspored

solarnih ćelija na prvi pogled nije logičan, međutim u prirodi elektromagnetskih, pa čak i mehaničkih talasa, je da talasi sa najvećom energijom (najvećom frekvencijom) imaju najmanju prodornost, dok talasi sa najmanjom energijom najviše prodiru u materiju. Iz tog razloga je prvi sloj kod višeslojnih ćelija zadužen da apsorbuje visokofrekventno solarno zračenje. Na slici 5.61 je prikazana fotonaponska ćelija sa višespojnom strukturom, pri čemu je za plavu ćeliju korišćen indijum-galijum-fosfid (InGaP), za zelenu ćeliju je korišćen indijum-galijum-arsenid (InGaAs), a kao crvena ćelija je korišćen germanijum. Delovi spektra koje apsorbuju ovi materijali su prikazani na slici 5.62.



Slika 5.61. Fotonaponska ćelija sa višespojnom strukturom (tandemska ćelija)



Slika 5.62. Fotonaponski materijali koji apsorbuju određene delove sunčevog spektra

5.5.6 Fotonaponski moduli sa koncentratorima

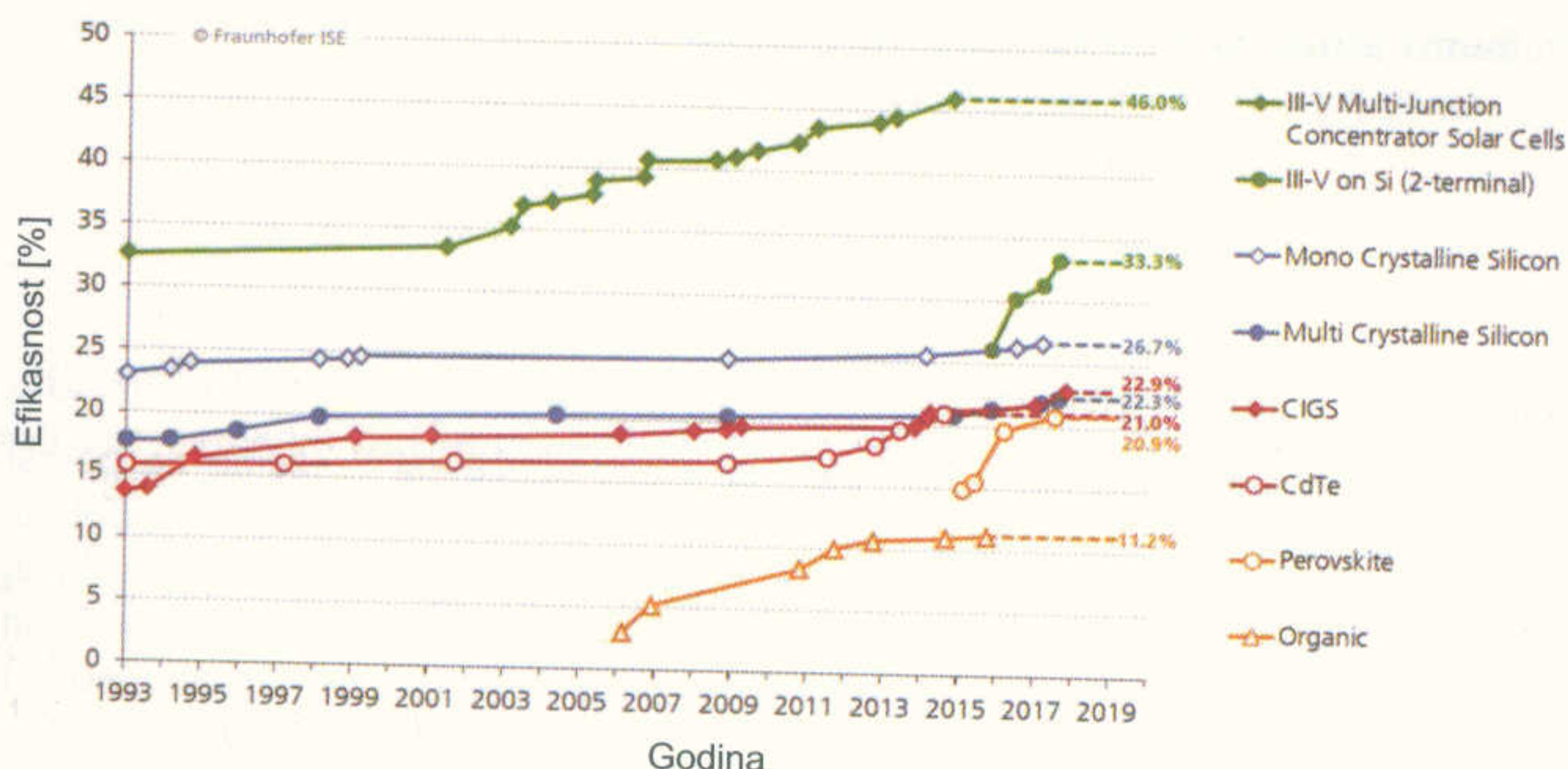
Ovakvi sistemi imaju sočiva ili ogledala kojima se povećava iradijansa na fotonaponski modul. S obzirom da je snaga fotonaponskog modula direktno srazmerna iradijansi, povećenjam iradijanse na fotonaponske materijale srazmerno se povećava snaga. Takođe, pošto poluprovodnici čine 40-50% cene fotonaponskog sistema korišćenjem koncentratora može se ista snaga modula postići uz smanjenje količine poluprovodničkog materijala u modulu. Nedostatak fotonaponskih modula sa koncentratorima je što zahtevaju upotrebu sistema za praćenje sunca visoke preciznosti i utrošak energije na okretanje panela prema suncu. Svako pomeranje žižne tačke fotonaponskog materijala ima za posledicu drastično smanjenje efikasnosti. Takođe, s obzirom da se kod ovakvih sistema koristi direktna komponenta sunčevog zračenja, ovakvi sistemi su pogodni za regione sa malom oblačnošću (difuzno zračenje je bez efekta kod ovih sistema). Primeri fotonaponskih modula sa koncentratorima su prikazani na slici 5.63.



Slika 5.63. Fotonaponski moduli sa koncentratorima

5.5.7 Efikasnost fotonaponskih ćelija

Tehnologije solarnih ćelija se intenzivno razvijaju i usmerene su na povećanje efikasnosti i smanjenju troškova proizvodnje. Povećanje efikasnosti solarnih ćelija od velikog značaja jer se njome umanjuje jedan od bitnih nedostataka fotonaponskih sistema koji zahtevaju zauzimanje velikih površina. Trend povećanja efikasnosti je dalje izražen gotovo kod svih tehnologija. Na slici 5.64 prikazan je trend promene efikasnosti fotonaponskih ćelija baziranih na različitim tehnologijama. Podaci se odnose na laboratorijske uslove ispitivanja. Može se zaključiti da najveću efikasnost imaju višespojne strukture sa i bez koncentratora, zatim slede monokristalni polikristalni silicijum, pa tankoslojni polikristalni materijali bakar-indijum-galijum-diselenid (CIGS) i kadmijum-telurid (CdTe). Nove tehnologije fotonaponskih ćelija (*perovskite* i *organic*) su još uvek u fazi razvoja ali sa izraženim trendom povećanja efikasnosti, naročito perovskitne solarne ćelije.



Slika 5.64. Efikasnost fotonaponskih ćelija u laboratorijskim uslovima (izvor: NREL)

Efikasnosti komercijalnih fotonaponskih modula su značajno manje od efikasnosti modula u laboratorijskim uslovima ispitivanja. Dva su bitna razloga za to, pre svega komercijalne tehnologije i materijali nemaju laboratorijsku preciznost i čistoću, a drugi razlog leži u činjenici da je modul sastavljen od više redno vezanih fotonaponskih ćelija koje nemaju identične karakteristike. Usled međusobnog odstupanja karakteristika solarnih ćelija u rednoj vezi dolazi do smanjenja efektivne efikasnosti modula.

5.6 Primeri

Primer 5.1

Odrediti maksimalnu talasnu dužinu fotona da bi on imao dovoljno energije da izazove fotonaponski efekat u materijalu od silicijuma. Kolika je frekvencija fotona koja odgovara toj talasnoj dužini? Energetska barijera atoma silicijuma iznosi 1,12 eV, gde je $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

Rešenje:

Da bi foton izazvao fotonaponski efekat, energija fotona E_γ mora biti veća ili jednaka energetske barijeri E_g atoma silicijuma:

$$E_\gamma \geq E_g$$

Na osnovu (5.1), talasna dužina fotona mora biti:

$$\lambda \leq \frac{hc}{E_g} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{1,12 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}} = 1,11 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 1,11 \mu\text{m}$$

6. Fotonaponski sistemi

Fotonaponski sistem predstavlja integrisan skup fotonaponskih modula i drugih komponenti koji primarnu solarnu energiju direktno pretvara u električnu energiju i predaje je potrošaču ili elektroenergetskom sistemu. Osnovni elementi fotonaponskog sistema su fotonaponski moduli koji pretvaraju energiju sunčevog zračenja u električnu energiju pri jednosmernom naponu. Kod fotonaponskih sistema koji su povezani na elektroenergetsku mrežu ili koji se koriste za napajanje potrošača naizmenične struje, neophodni su invertori za pretvaranje jednosmerne u naizmeničnu struju. Fotonaponski sistemi mogu imati i akumulatorske baterije za skladištenje energije i kontrolere punjenja baterija. Za pouzdano funkcionisanje sistema neophodna je i prateća oprema koju čine rasklopni i zaštitni uređaji, provodnici i konektori, uređaji za nadzor i upravljanje, kao i elementi za montažu.

6.1 Vrste fotonaponskih sistema

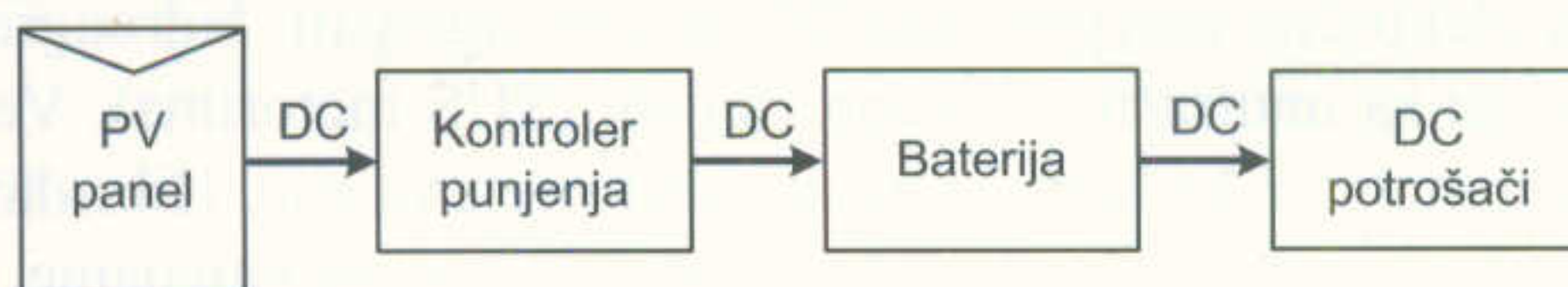
U zavisnosti od načina rada fotonaponski sistem može biti povezan na distributivnu mrežu ili može raditi kao autonomni sistem koji napaja potrošače koji nisu priključeni na distributivnu mrežu. Kao poseban vid fotonaponskih sistema mogu se navesti i hibridni sistemi kod kojih pored fotonaponskog sistema postoji još neki izvor električne energije.

6.1.1 Autonomni (samostalni) fotonaponski sistemi

Autonomni fotonaponski sistemi se koriste za napajanje potrošača koji nisu priključeni na distributivnu mrežu. Kod ovakvih sistema su najčešće potrebne akumulatorske baterije koje se koriste za skladištenje energije tokom perioda sa viškovima proizvedene energije kako bi se ona koristila tokom noći ili u razdobljima sa nedovoljnim intenzitetom sunčevog zračenja. Autonomni sistemi su pogodni za obezbeđivanje potrebnih količina električne energije za udaljene potrošače koji se nalaze u ruralnim sredinama, vikend naseljima, kamp kućicama, čamcima i jedrilicama, kao i za napajanje raznih vrsta uređaja za signalizaciju i upozorenja, za rasvetu, telekomunikacione repetitore, sisteme nadgledanja, sisteme za navodnjavanje, itd.

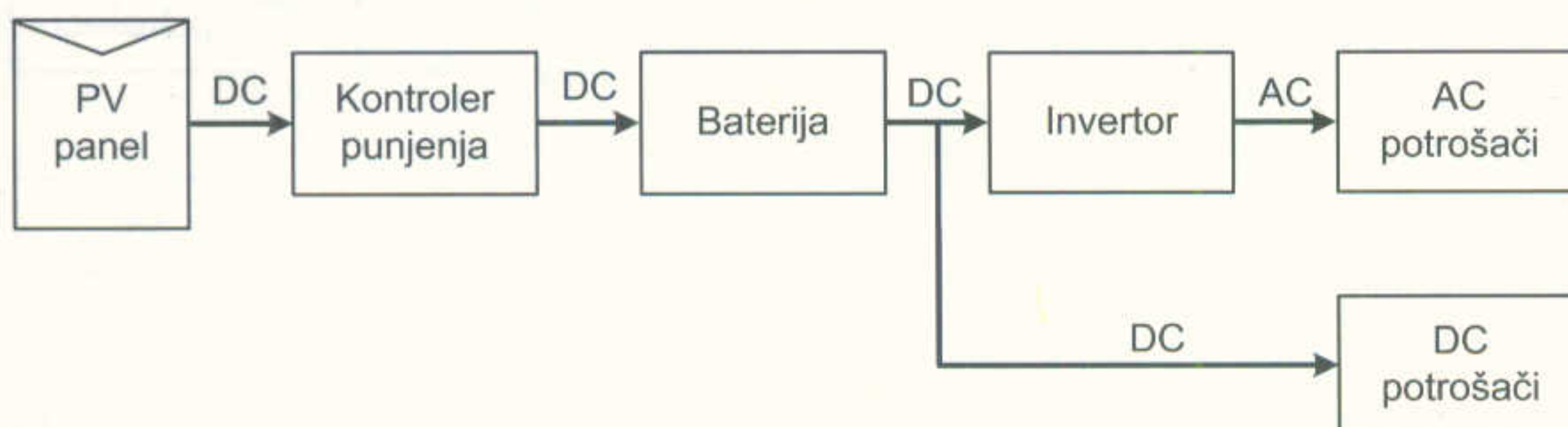
Na slici 6.1 je prikazan blok-dijagram autonomnog fotonaponskog sistema jednosmerne struje. Fotonaponski panel puni akumulator u toku dana, akumulator obezbeđuje električnu energiju potrošačima po potrebi, a kontroler punjenja podešava i reguliše proces punjenja baterija. Sistem obično sadrži i merne instrumente za monitoring sistema, kao i osigurače i prekidače za zaštitu u slučaju kvara. Najjednostavniji autonomni fotonaponski sistemi koji se koriste za pumpanje vode mogu da budu bez akumulatorskih baterija, što značajno smanjuje cenu sistema. U slučaju kada se ispumpana voda akumulira u rezervoaru koji se nalazi na određenoj

visinskoj koti iznad centra potrošnje vode, sam rezervoar ima ulogu skladišta energije jer akumulira potencijalnu energiju vode.



Slika 6.1. Komponente autonomnog fotonaponskog sistema jednosmerne struje

Autonomni fotonaponski sistemi naizmenične struje su isti kao fotonaponski sistemi jednosmerne struje, izuzev što sadrže inverter jednosmerne u naizmeničnu struju. Na slici 6.2 je prikazan blok-dijagram takvog sistema. Inverter omogućava korišćenje standardnih aparata koji se nalaze u domaćinstvu, kao što su uređaji na električni pogon, usisivači, mašine za pranje veša, kuhinjski aparati i drugi. Upotreba fotonaponskih sistema naizmenične struje za napajanje potrošača u domaćinstvima pojednostavljuje povezivanje sa električnom instalacijom i omogućava korišćenje jeftinijih prekidača i drugih elemenata. Ušteda usled manje cene povezivanja elemenata sistema može da bude značajna jer su za prenos energije jednosmernom strujom pri niskom naponu potrebni provodnici velikog poprečnog preseka. Autonomni fotonaponski sistemi naizmenične struje imaju mogućnost napajanja i potrošača jednosmerne struje, što je u nekim slučajevima pogodno zbog manjih gubitaka energije. Pojedini uređaji jednosmerne struje, kao što su motori, često su efikasniji od njihovih naizmeničnih ekvivalenata. Dimenzionisanje invertora je određeno karakteristikama potrošača, odnosno njegovim radnim naponom, maksimalnom zahtevanom strujom, aktivnom i reaktivnom snagom.

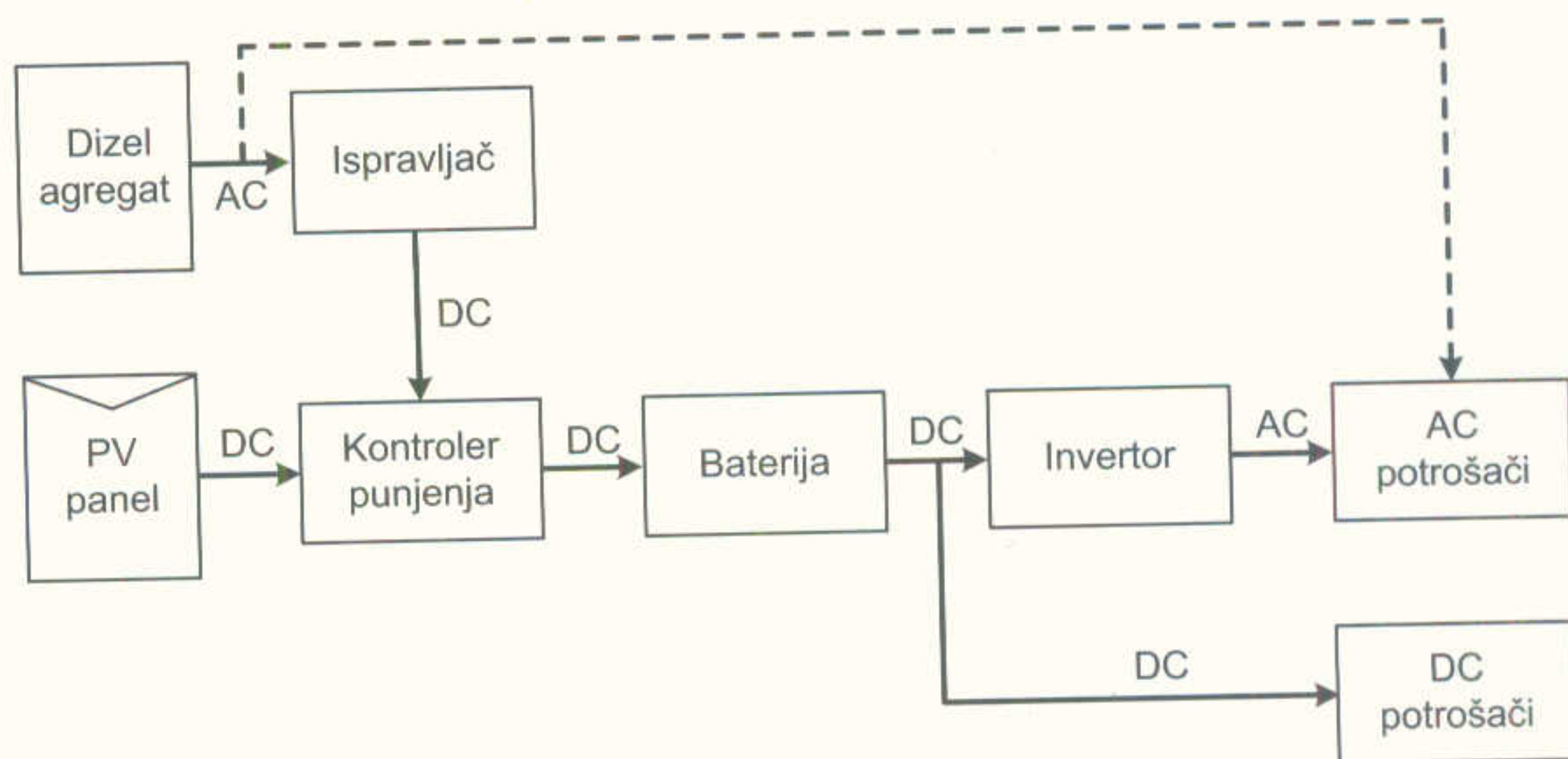


Slika 6.2. Komponente autonomnog fotonaponskog sistema naizmenične struje

Osnovni nedostatak autonomnih fotonaponskih sistema je neophodnost korišćenja akumulatorskih baterija za skladištenje energije. Akumulatorske baterije imaju visoku cenu i relativno kratak vek trajanja. U slučaju kada je potrebno napajati potrošače tokom cele godine, sistem akumulatorskih baterija je predimenzionisan za veći period vremena tokom godine, pri čemu je jako malo iskorišćenje instalisanog kapaciteta fotonaponskog panela na godišnjem nivou.

6.1.2 Hibridni fotonaponski sistemi

Hibridni fotonaponski sistemi nastaju povezivanjem fotonaponskih sistema sa nekim drugim izvorima električne energije, kao što su vetroagregati, hidroagregati i agregati pogonjeni motorima sa unutrašnjim sagorevanjem (SUS motorima). Većina hibridnih sistema koristi akumulatorske baterije za skladištenje energije. Hibridni fotonaponski sistemi se kao i autonomni sistemi najčešće primenjuju za napajanje potrošača koji nisu priključeni na distributivnu mrežu. Hibridni sistemi obezbeđuju pouzdanu snabdevanje takvih potrošača električnom energijom uz optimalan rad sa tehničkog i ekonomskog aspekta. Hibridni sistemi omogućavaju veću sigurnost i raspoloživost isporuke električne energije, što zahteva manje kapacitete akumulatorskih baterija za skladištenje električne energije u odnosu na autonomne fotonaponske sisteme. U slučaju kada se koristi hibridni vetar-solar sistem, fotonaponski sistem i vetroagregat se međusobno dopunjuju u punjenju akumulatorskih baterija iz kojih se napaja potrošač. U slučaju korišćenja hibridnog fotonaponskog sistema sa dizel i benzinskim agregatom, agregat se uključuje onda kada fotonaponski panel ne može obezbedi dovoljno energije. Agregat može da se dimenzioniše samo za punjenje baterija ili za istovremeno punjenje baterija i podmirivanje potrošnje. Komponente hibridnog fotonaponskog sistema sa dizel-agregatom su prikazane na slici 6.3.

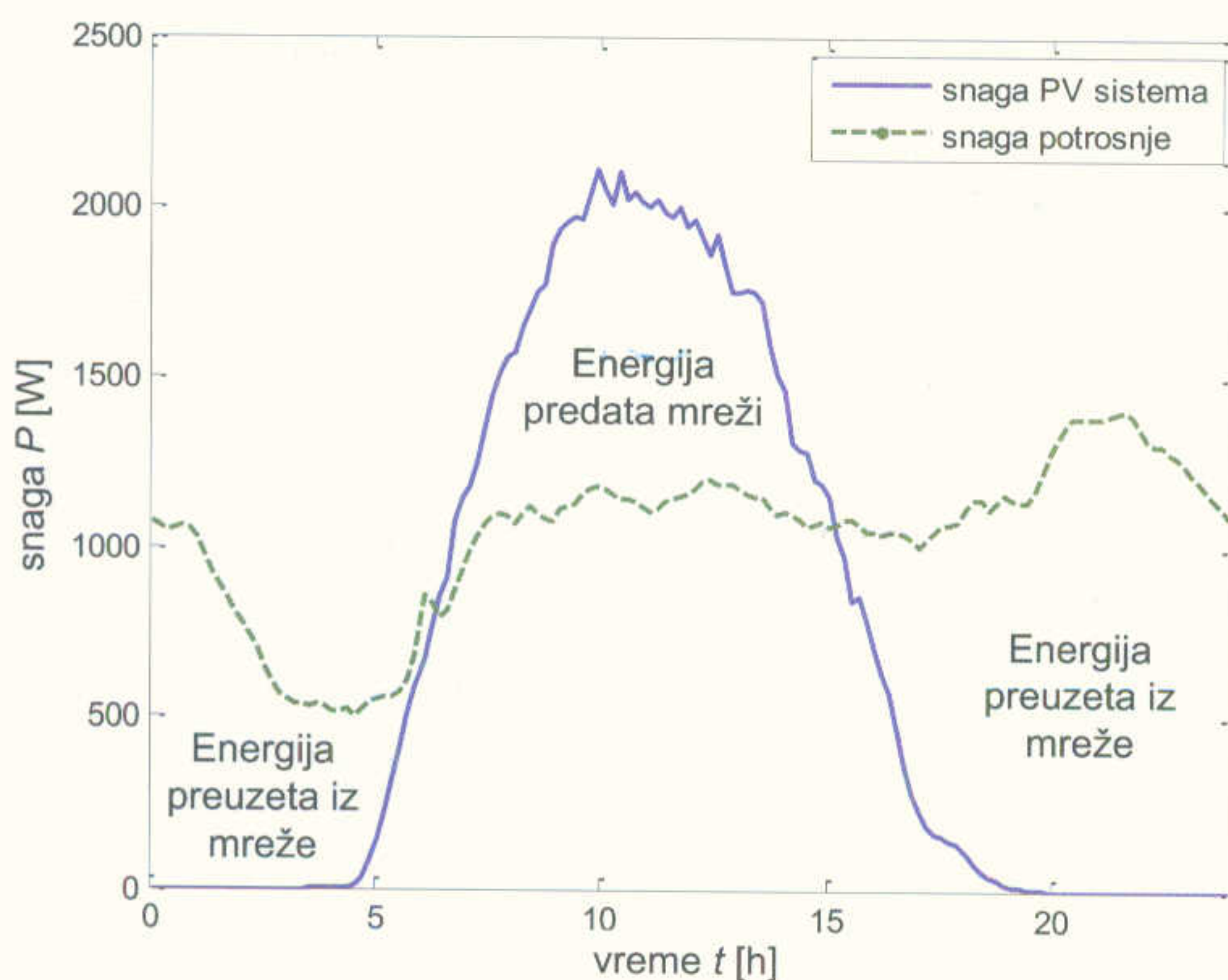


Slika 6.3. Komponente hibridnog fotonaponskog sistema sa dizel-agregatom

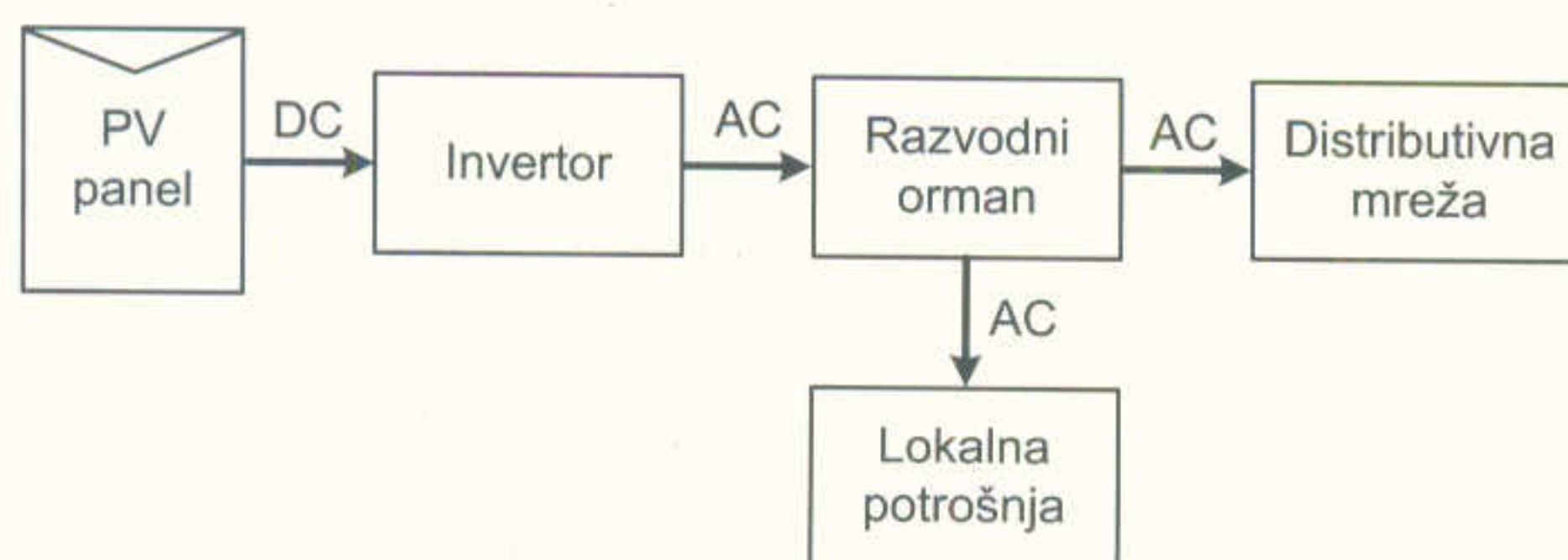
6.1.3 Fotonaponski sistemi povezani na distributivnu mrežu

Fotonaponski sistem koji je povezan na distributivnu mrežu napaja potrošače na lokaciji sistema i isporučuje viškove energije distributivnoj mreži. Kada objekat čijoj instalaciji je priključen fotonaponski sistem troši manje energije od one koju proizvodi fotonaponski sistem, višak energije se predaje mreži. U slučajevima kada objekat zahteva više energije od one koju proizvodi fotonaponski sistem, razlika se nadoknađuje iz mreže. Na slici 6.4 su prikazani karakteristični dijagrami proizvodnje i potrošnje energije.

fotonaponskog panela i potrošnje u objektu za slučaj kada objekat ima instaliran fotonaponskih sistem povezan na distributivnu mrežu. Na slici 6.5 prikazan je blok-dijagram fotonaponskog sistema povezanog na distributivnu mrežu.



Slika 6.4. Karakteristični dnevni dijagrami proizvodnje fotonaponskog panela i potrošnje u objektu

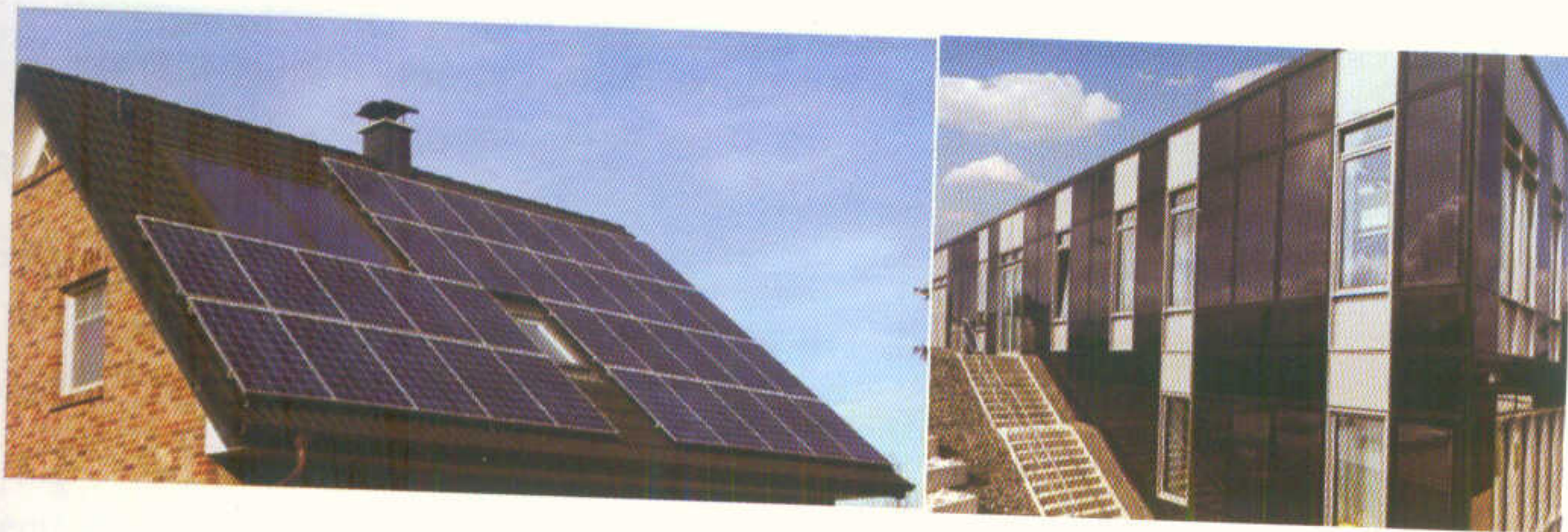


Slika 6.5. Fotonaponski sistem povezan na distributivnu mrežu

Osnovne komponente fotonaponskog sistema povezanog na distributivnu mrežu su fotonaponski panel i invertor, sa odgovarajućim prekidačkim i zaštitnim elementima. Jednosmerna struja dobijena u fotonaponskim modulima pretvara se u naizmeničnu struju pomoću invertora i preko razvodnog ormana i električne instalacije napaja potrošače u zgradi. Višak energije se prenosi u distributivnu mrežu, a u slučaju nedovoljnog generisanja energije iz fotonaponskog sistema manjak energije se nadoknađuje iz mreže. U toku noći, potrošnja se obezbeđuje isključivo iz distributivne mreže.

6.1.4 Fotonaponski sistemi integrisani u krovove i fasade zgrada

Česta primena fotonaponskih sistema povezanih na distributivnu mrežu je kada se ovakvi sistemi integrišu u krovove i fasade zgrada (eng. *Building Integrated Photovoltaic* - BIPV), kao što je prikazano na slici 6.7. U ovakvim primenama fotonaponski moduli se postavljaju na pasivne površine zgrada, tako da ne zauzimaju korisne površine. Osim toga, oni mogu u varijanti staklenih zidova imati i građevinsku ulogu, što pozitivno utiče na cenu sistema. Fotonaponski moduli mogu da zamene konvencionalne građevinske materijale i na taj način imaju dvostruku ulogu koja može višestruko da se isplati. Ovakvi trendovi su podržani i od strane arhitekata, tako da je sve popularnija takozvana solarna arhitektura.



Slika 6.7. Fotonaponski elementi postavljeni kao krovna i fasadna konstrukcija

Fotonaponski sistemi integrisani u krovove i fasade ne zahtevaju dodatno zemljište i mogu se koristiti u gusto naseljenim urbanim sredinama. U slučaju kada se koriste za napajanje industrijske ili komercijalne potrošnje, ovakvi sistemi obezbeđuju električnu energiju u toku najveće potražnje i na taj način smanjuju opterećenje električne mreže. Fotonaponski sistemi integrisani u krovove i fasade zgrada se mogu povezati sa inteligentnim sistemima za nadgledanje, kontrolu, održavanje i osvetljenje u zgradama.

Osim na stambenim i poslovnim objektima, izgradnja fotonaponskih sistema je praktična i na nadstrešnicama različitih objekata, kao što su parking prostori, stajališta za autobuse i slično. U ovakvim slučajevima fotonaponski sistemi mogu biti povezani sa sistemima za punjenje baterija električnih vozila što je imperativ dekarbonizacije i elektrifikacije transporta.

6.1.5 Plivajuće fotonaponske elektrane

U poslednjih nekoliko godina u svetu se razvija koncept plivajućih fotonaponskih elektrana. Ovakvi sistemi su u početku uglavnom razvijani kao male elektrane na rezervoarima vode različite namene: akumulacionim bazenima različite namene, ribnjacima, kanalima i jezerima. Plivajuće fotonaponske elektrane imaju generalno

veći stepen iskorišćenja od onih koje su izgrađene na kopnu, što je rezultat niže temperature panela koji se nalazi iznad vode, kao i manjih gubitaka zbog pokrivanja panela snegom u zimskim mesecima. Osim proizvodnje električne energije, ovakvi sistemi doprinose i smanjenju isparavanja vode u rezervoarima i jezerima.

Za izgradnju plivajućih fotonaponskih panela koriste se isti moduli kao i za elektrane na kopnu. Ovakvi sistemi se realizuju na plivajućim nosačima koji su izrađeni od termoplastične mase. Nosači su modularni, tako da omogućavaju formiranje redova prema željenoj topologiji. Između dva reda nosača, nalaze se staze koje omogućavaju prilaz za instalaciju i servisiranje panela. Na slici 6.8 prikazana je plivajuća fotonaponska elektrana u Japanu.



Slika 6.8. Plivajuća fotonaponska elektrana u Japanu, čija je instalisana snaga 572 kW

Plivajuće fotonaponske elektrane su nova ideja, a prvi instalisani paneli su se pojavili 2013. godine i imali su snage do nekoliko desetina kW. Već u 2014. godine grade se plivajući paneli snage nekoliko stotina kW, da bi se u 2015. izgradilo nekoliko elektrana snage preko 1 MW, a 2017. je u Kini izgrađena elektrana od 40 MW. Najveći projekat koji je realizovan u Evropi je u Londonu, na rezervoaru vode kraljice Elizabete II, njegova instalisana snaga je 6,3 MW. Elektrana je izgrađena u martu 2016. godine.

6.1.6 Prednosti i nedostaci fotonaponskih sistema

Osnovne prednosti svih fotonaponskih sistema su:

- *Pouzdanost* - Fotonaponski moduli, kao uređaji bez pokretnih delova, konstruisani su za životni vek od 25÷30 godina uz veoma malu verovatnoću mogućeg otkazivanja u toku svog rada.
- *Mala potreba za održavanjem* - Fotonaponski sistemi rade uz minimalno servisiranje i bez snabdevanja gorivom, tako da su idealan izvor energije u izolovanim sredinama, kao što su zabačeni planinski krajevi ili ostrva.

- *Ne utiču štetno na prirodnu okolinu* - Fotonaponski uređaji ne proizvode nikakvu emisiju štetnih materija u prirodnu okolinu i predstavljaju nečujan lokalni izvor energije.

- *Besplatno gorivo u izobilju* - Sunčeva svetlost je besplatna, lako dostupna i praktično neiscrpna energija, tako da korisnici mogu da umanje ili ne plaćaju račune za energiju iz distributivne mreže.

- *Lokalno generisana energija* - Fotonaponski uređaji mogu da budu lokalni izvori energije, što obezbeđuje energetske sigurnost i kontrolu pristupa energiji.

- *Fleksibilna veličina sistema* - Fotonaponski sistemi mogu da budu različitih dimenzija i snaga, a modularna konstrukcija omogućuje lako proširenje sistema u zavisnosti od finansijskih mogućnosti i energetske potrebe.

- *Lakoća transportovanja* - Zbog modularne konstrukcije omogućen je prenos fotonaponskih sistema u delovima, što olakšava prenos sistema.

Sa druge strane, postoje ograničenja i nedostaci kod fotonaponskih sistema:

- *Zavisnost od sunčevog zračenja* - Električna energija se ne proizvodi noću, a oblačnost smanjuje izlaznu snagu sistema.

- *Visoka cena* - I pored trenda opadanja, fotonaponski sistemi imaju i dalje visoku cenu proizvedene energije.

- *Promenljiva snaga proizvodnje* - Snaga fotonaponskog sistema nije stalna i zavisi od trenutne snage sunčevog zračenja.

- *Zahtevani prostor za instalaciju* - S obzirom na relativno malu gustinu solarnog zračenja po jedinici površine (relativno malu iradijansu), fotonaponski sistemi velikih snaga zahtevaju velike površine za instalaciju. Iz tog razloga izbegavaju se konstrukcije na plodnom zemljištu.

Cene fotonaponskih sistema variraju zavisno od vrste sistema i instalisane snage. Fotonaponski sistemi snage do 100 kW instalisane snage koštaju oko 1000 €/kW, dok velike elektrane snage preko 1 MW koštaju od 600÷800 €/kW.

6.2 Uređaji za praćenje tačke maksimalne snage

Kod fotonaponskih sistema su neophodni uređaji za praćenje tačke maksimalne snage (eng. *Maximum Power Point Tracker* - MPPT), s obzirom da karakteristike fotonaponskih panela variraju sa solarnom radijacijom i temperaturom i nisu u skladu sa karakteristikama potrošača. Ovakvi uređaji vrše transformaciju struje i napona tako da fotonaponski paneli rade sa maksimalnom snagom i u slučaju kada se uslovi rada menjaju. Savremeni invertori koji se koriste kod fotonaponskih sistema su obično dvostepeni pretvarači, pri čemu je prvi stepen DC-DC pretvarač koji ima ulogu MPPT uređaja, dok je drugi stepen inverter, odnosno DC-AC pretvarač. Inverter i uređaj za praćenje tačke maksimalne snage se često nazivaju uređajima za prilagođenje izlazne

razvijeni u cilju bezbedne, sigurne, efikasne i pouzdane upotrebe i eksploatacije fotonaponskih sistema.

6.4.1 Dimenzionisanje osnovnih komponenti fotonaponskog sistema

Polazna tačka za određivanje izlazne snage fotonaponskog sistema za poznatu ulaznu snagu zračenja je naznačena snaga fotonaponskih modula koju deklarišu proizvođači za standardne uslove (iradijansa „jedno sunce“ tj. 1 kW/m^2 , koeficijent vazdušne mase AM 1,5, temperatura solarnih ćelija od 25°C , moduli potpuno čisti). Instalirana snaga fotonaponskog panela koji sadrži N redno-paralelno vezanih modula je:

$$P_{\text{DC(STC)}} = N P_{\text{DC(STC)1}} \quad (6.18)$$

gde $P_{\text{DC(STC)1}}$ predstavlja naznačenu snagu fotonaponskog modula koju deklariše proizvođač za standardne uslove.

U realnim eksploatacionim uslovima, snaga P_{AC} koju fotonaponski sistem predaje mreži je manja od DC izlazne snage modula pri standardnim uslovima zbog gubitaka u sistemu i manje vrednosti iradijanse na panel u odnosu na iradijansu od 1 kW/m^2 („jedno sunce“):

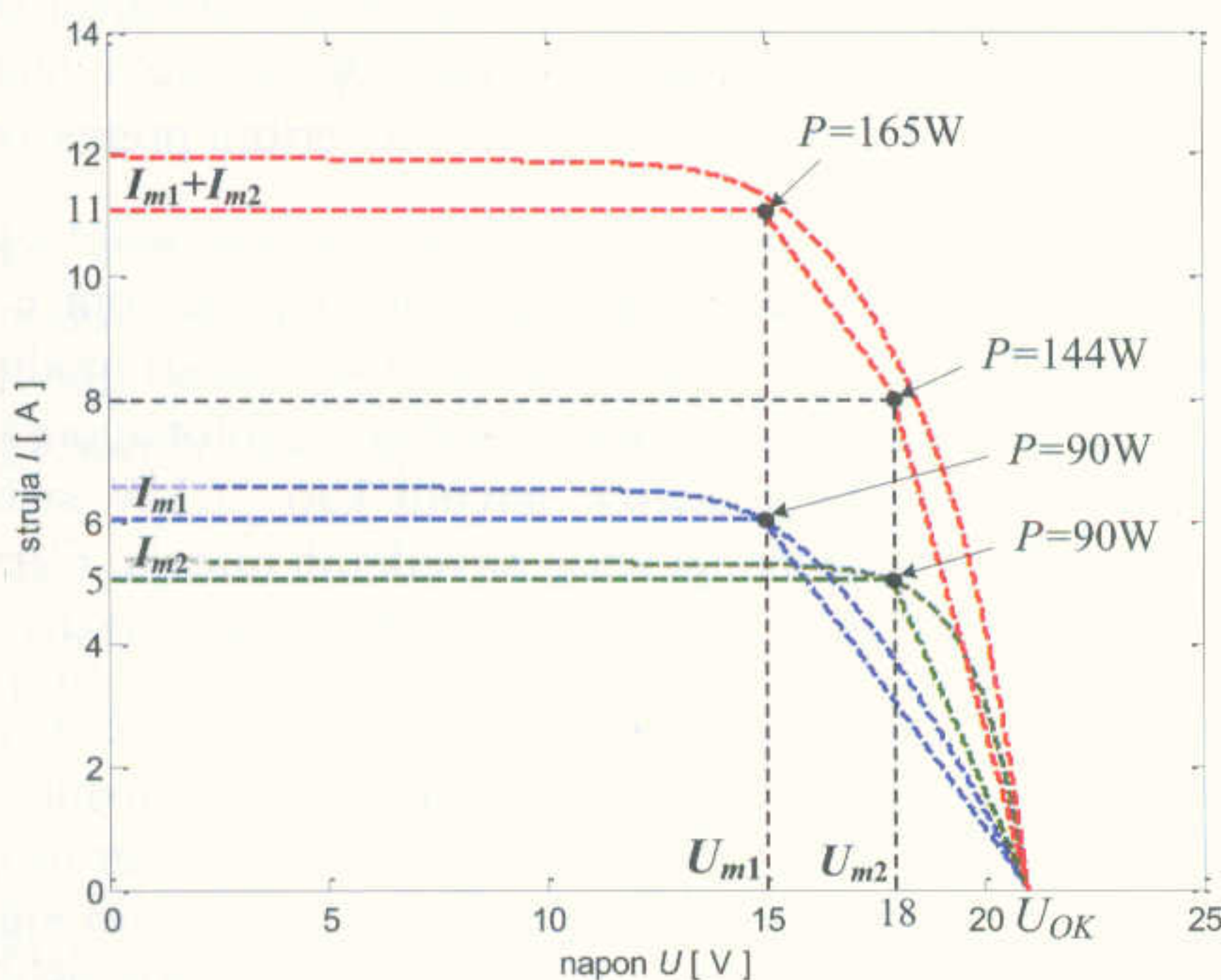
$$P_{\text{AC}} = P_{\text{DC(STC)}} \eta_z \eta_N \eta_T \eta_{\text{inv}} \frac{I_C}{1000 \text{ W/m}^2} \quad (6.19)$$

gde su: I_C iradijansa na površinu panela, η_z , η_N i η_T koeficijenti koji definišu smanjenje efikasnosti panela usled zaprljanja, neuparenosti i povećanja temperature modula u odnosu na standardnu vrednost od 25°C , a η_{inv} je koeficijent koji definiše efikasnost invertora. Procenjene srednje vrednosti koeficijenata η_z , η_N i η_T na godišnjem nivou za područja sa umerenom klimom su: $\eta_z = 0,96$, $\eta_N = 0,97$ i $\eta_T = 0,93$. Za invertore je merodavna Euro-efikasnost i ona za savremene invertore iznosi $\eta_{\text{inv}} \approx 0,97$. Treba navesti da tokom vremena eksploatacije opada efikasnost fotonaponskih modula usled njihove degradacije, tako da se smanjuje snaga P_{DC} u odnosu na snagu koja se ima pri istoj iradijansi kada su moduli novi. Degradaciju efikasnosti daje i garantuje proizvođač modula i ona tipično iznosi oko 1% po svakoj godini eksploatacije, tako da za estimaciju snage u prosečnoj godini u eksploatacionom veku jednačinu (6.19) treba pomnožiti sa koeficijentom 0,9.

Pri zaprljanju fotonaponskih modula dolazi do smanjenja snage zbog smanjena apsorpcije sunčeve energije od strane fotonaponskih modula usled sloja prašine i ostalih naslaga prljavštine. Takođe, površinski sloj prašine se zagreva usled apsorpcije sunčevog zračenja, što čini da fotonaponski moduli rade pri višim temperaturama.

Da bi efikasnost sistema bila što bolja, treba težiti da moduli koji formiraju panele budu što približnijih karakteristika, naročito moduli koji formiraju niz (string). Na slici 6.28 je pokazano kako neuparenost karakteristika modula utiče na efikasnost panela u slučaju dva neuparena modula naznačenih snaga 90 W koji su povezani paralelno. Njihove strujno-naponske karakteristike su zbog jednostavnosti aproksimirane

pravama, kao što je prikazano na slici 6.28. Jedan modul ostvaruje maksimalnu snagu od 90 W pri naponu od 15 V i 6 A, a drugi pri naponu od 18 V i 5 A. Strujno-naponska karakteristika panela, odnosno paralelne veze ova dva modula, pokazuje da je maksimum snage ovako kombinovanih modula samo 165 W, umesto 180 W što bi bio slučaj da su strujno-naponske karakteristike identične. Iz tog razloga potrebno je pri kupovini modula zahtevati od proizvođača minimalnu toleranciju za karakteristike modula koji će biti povezani u panel.



Slika 6.28. Objašnjenje uticaja neuparenosti fotonaponskih modula na efikasnost fotonaponskog sistema

Važan faktor koji utiče na efikasnost fotonaponskog sistema je i temperatura fotonaponskih modula. Da bi se mogla odrediti efikasnost modula pri različitim ambijentalnim uslovima potrebno je proračunati temperaturu modula na osnovu temperature ambijenta T_{amb} , iradijansa I_C na površini modula i temperature za nominalne uslove eksploatacije koju deklariše proizvođač (*NOCT* – *Nominal Operation Cell Temperature*). Nominalna radna temperatura ćelije (*NOCT*) je standardni parametar koji se dobija od proizvođača modula i on odgovara stvarnoj temperaturi modula kada bi iradijansa na površini modula bila $0,8 \text{ kW/m}^2$, ambijentalna temperatura 20°C , brzina vetra 1 m/s kada su moduli postavljeni na otvorenom terenu. Proračun temperature panela (T_C) pri različitim ambijentalnim uslovima i iradijansi može se izvršiti na osnovu sledeće relacije:

$$T_C = T_{amb} + \left(\frac{NOCT - 20^0}{0,8} \right) I_C \quad (6.20)$$

S obzirom da je pad efikasnosti fotonaponskih modula usled povećanja temperature fotonaponskih modula iznad standardne vrednosti (25°C) tipično oko $\alpha_P = -0,4 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, onda je snaga na DC priključcima sistema:

$$P_{DC} = P_{DC(STC)} \eta_T = P_{DC(STC)} (1 + \alpha_P (T_C - 25^0)) \quad (6.21)$$

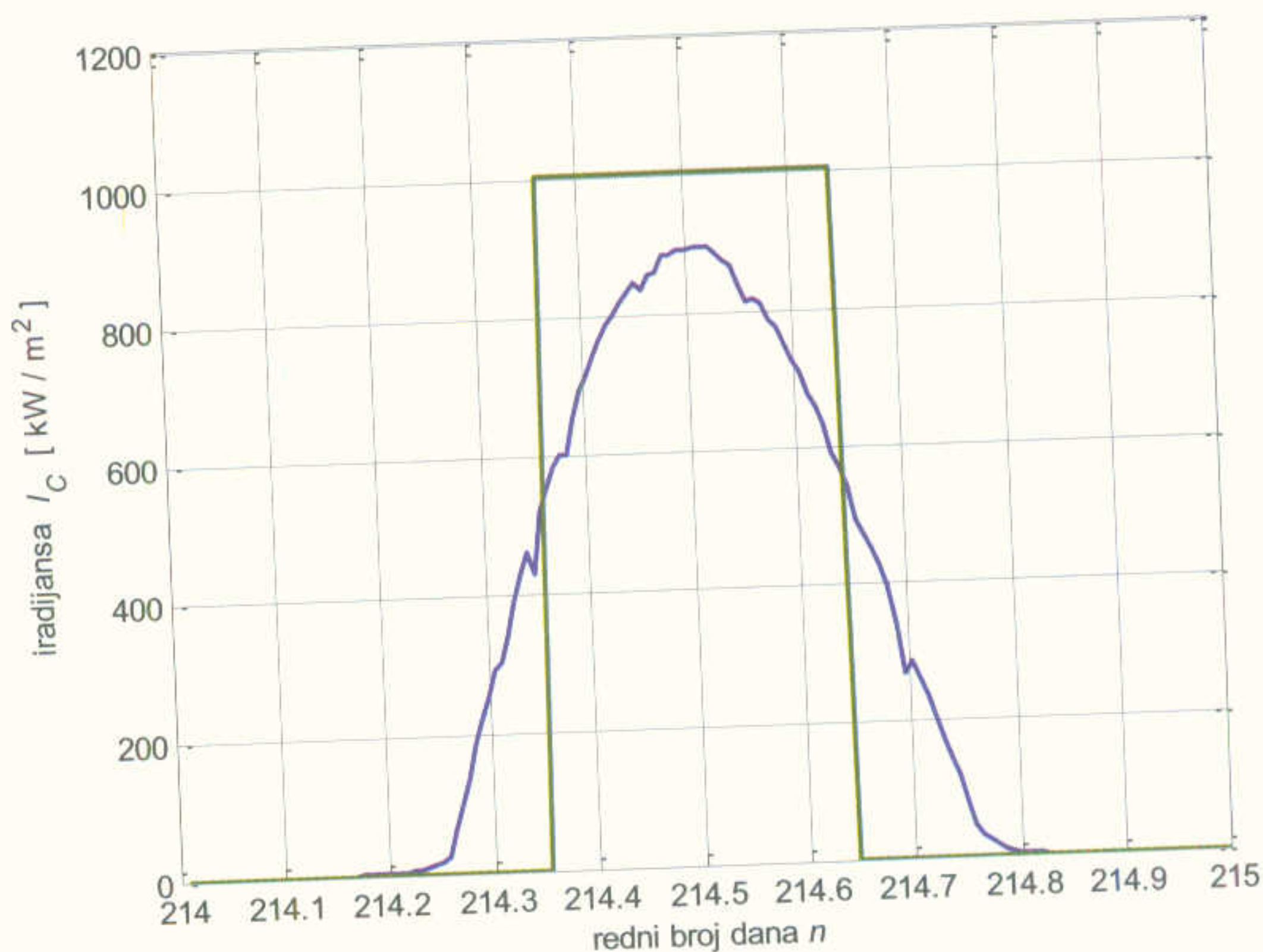
gde je T_C temperatura modula pri temperaturi ambijenta T_{amb} i iradijansi I_C na površini modula, a koeficijent koji uvažava smanjenje snage modula zbog povećanja temperature modula u odnosu na standardnu vrednost od 25^0C je:

$$\eta_T = 1 + \alpha_P (T_C - 25^0) \quad (6.22)$$

Na kraju, na efikasnost fotonaponskog sistema bitno utiče efikasnost samog invertora. Efikasnost invertora se definiše kao odnos ulazne DC snage i izlazne AC snage invertora prema izrazu (6.16) ili kao Euro-efikasnost invertora prema izrazu (6.17).

Kada se govori o fotonaponskim sistemima, oni se tradicionalno opisuju u smislu njihove izlazne DC snage pod standardnim test uslovima, iako oni u realnosti imaju manju izlaznu AC snagu zbog uticaja zaprljanosti i neuparenosti modula, zbog uticaja temperature, kao i zbog gubitaka u invertoru. Na primer, fotonaponski sistem čija je naznačena DC snaga 1 kW se tradicionalno navodi kao „1 kW sistem“, iako je u realnosti njegova izlazna AC snaga manja zbog navedenih uticaja. Često se naznačena snaga fotonaponskog sistema označava u W_p (kW_p ili MW_p) kao vršna snaga sistema.

Kada su poznati podaci za dnevne, mesečne ili godišnje prosečne insolacije na mestu analiziranog fotonaponskog sistema, tada se može jednostavno proceniti proizvodnja električne energije. U tu svrhu se koristi ekvivalentan broj sati iradijancije od $1 kW/m^2$ u toku dana. Objašnjenje ekvivalentnog vremena trajanja iradijancije od $1 kW/m^2$ u toku dana je dato na slici 6.29. Na primer, ako srednja dnevna insolacija u toku sunčanog dana iznosi $6,8 kWh/m^2$, može se ekvivalentirati kao da je postignuta pri standardnoj vrednosti iradijancije od $1 kW/m^2$ („jedno sunce“) u toku ekvivalentnog vremena od 6,8 sati.



Slika 6.29. Objašnjenje ekvivalentnog broja sati iradijancije od $1 kW/m^2$ u toku dana

Može se zaključiti da je srednja dnevna insolacija na površini fotonaponskog panela izražena u kWh/m² brojno jednaka ekvivalentnom broju sati iradijanse od 1 kW/m² u toku dana, odnosno broju sati „jednog sunca“ (*Peak Sun Hours*).

Dnevna insolacija na fotonaponski panel se dobija integraljenjem iradijanse na panel u toku dana ali se može izraziti i kao proizvod standardne vrednosti iradijanse od 1 kW/m² („jedno sunce“) i ekvivalentnog broja sati trajanja $h_{1\text{-sunce}}$ iradijanse od 1 kW/m² u toku dana:

$$\bar{I}_C = \int_0^T I_C dt = 1 [\text{kW/m}^2] \cdot h_{1\text{-sunce}} \quad (6.23)$$

Ukupna efikasnost fotonaponskog sistema $\eta = \eta_Z \eta_N \eta_T \eta_{\text{inv}} \eta_M$ uključuje i efikasnost fotonaponskih modula η_M . Dnevna električna energija W_d (izražena u kWh) koja se predaje distributivnoj mreži može se izračunati na osnovu srednje dnevne insolacije $\bar{I}_C$ na panel (u kWh/m²), površine A panela (u m²) i ukupne efikasnosti η sistema na sledeći način:

$$W_d [\text{kWh}] = A [\text{m}^2] \cdot \frac{1}{T} \int_0^T I_C [\text{kW/m}^2] \eta dt \approx \bar{I}_C [\text{kWh/m}^2] A [\text{m}^2] \eta_{\text{av}} \quad (6.24)$$

gde je korišćena aproksimacija da je efikasnost sistema η u toku dana jednaka srednjoj dnevnoj efikasnosti η_{av} , odnosno efikasnosti sistema pri srednjoj temperaturi panela u toku obdanice.

Snaga fotonaponskog sistema na DC priključcima pri standardnim test uslovima je:

$$P_{\text{DC(STC)}} [\text{kW}] = 1 [\text{kW/m}^2] A [\text{m}^2] \eta_M \quad (6.25)$$

gde je η_M efikasnost fotonaponskog modula deklarisan od strane proizvođača.

Kombinujući prethodne dve jednačine dobija se da je dnevna električna energija koja se predaje distributivnoj mreži:

$$W_d [\text{kWh}] = P_{\text{DC(STC)}} [\text{kW}] \frac{\bar{I}_C [\text{kWh/m}^2]}{1 [\text{kW/m}^2]} \frac{\eta_{\text{av}}}{\eta_M} = P_{\text{DC(STC)}} [\text{kW}] h_{1\text{-sunce}} [\text{h}] \eta_Z \eta_N \eta_T \eta_{\text{inv}} \quad (6.26)$$

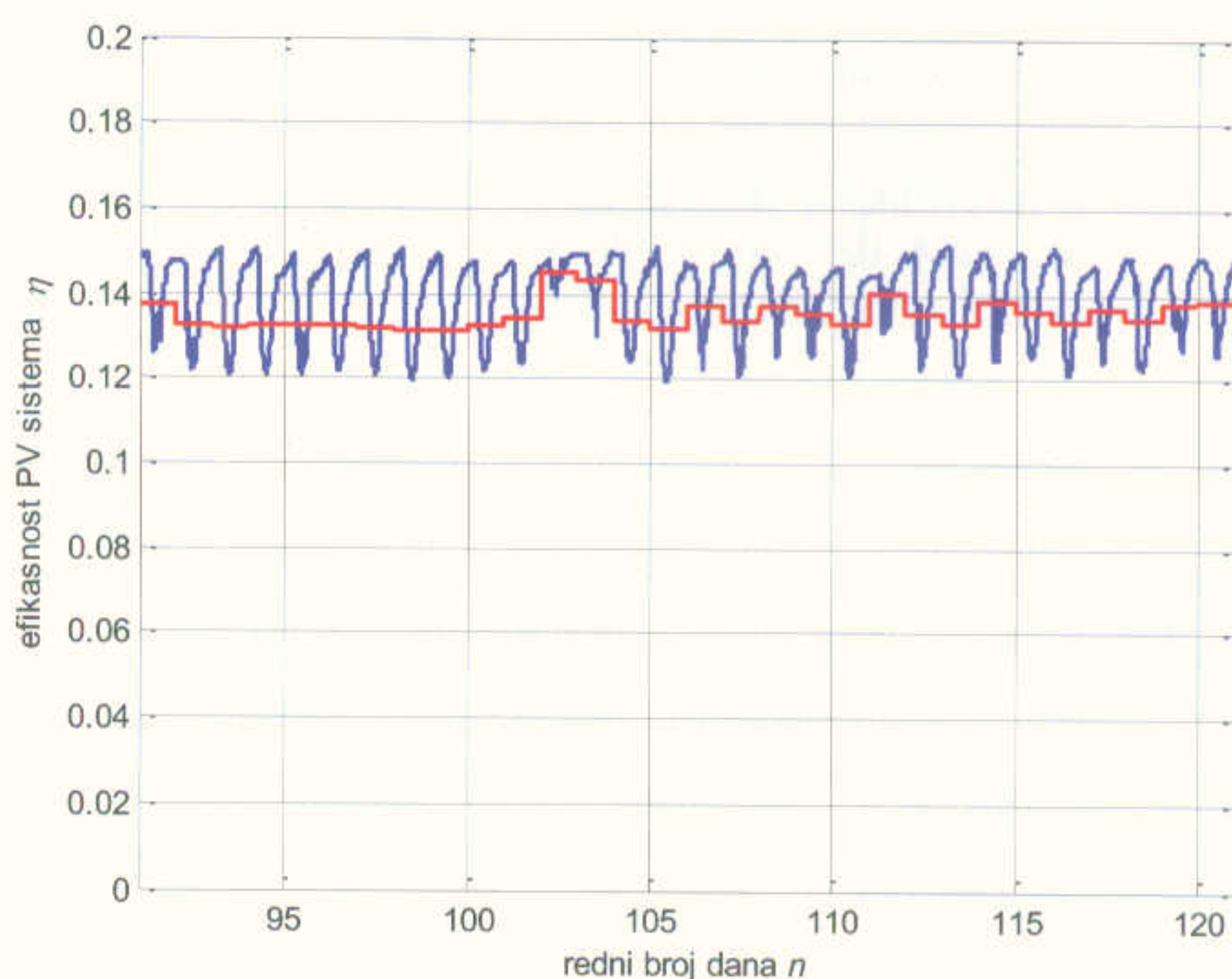
gde je ekvivalentan broj sati $h_{1\text{-sunce}}$ iradijanse od 1 kW/m² brojno jednak srednjoj dnevnoj insolaciji $\bar{I}_C$ na panel u kWh/m²:

$$h_{1\text{-sunce}} = \frac{\bar{I}_C [\text{kWh/m}^2]}{1 [\text{kW/m}^2]} \quad (6.27)$$

U prethodnim izrazima ukupna efikasnost fotonaponskog sistema uzima u obzir zaprljanje i neuparenost modula, uticaj temperature modula i efikasnost invertora η_{inv} , ali takođe i efikasnost η_M fotonaponskih modula u panelu:

$$\eta = \eta_Z \eta_N \eta_T \eta_{\text{inv}} \eta_M \approx \eta_{\text{av}} \quad (6.28)$$

Glavna pretpostavka u prethodnoj jednačini je da efikasnost sistema ostaje konstantna tokom dana. Ova pretpostavka je realna ako fotonaponski sistem ima uređaj za optimizaciju radne tačke (MPPT) koji pri svim uslovima obezbeđuje da sistem radi u tački maksimalne snage. Promene temperature i vazdušne mase utiču na efikasnost konverzije, ali su greške usled njihove dnevne varijacije relativno male. Efikasnost bi bila iznad proseka ujutru, kada je hladnije i kada je manja iradijansa, ali se ovi uticaji u toku godine usrednjavanjem u dobroj meri kompenzuju. Kao primer, na slici 6.30 su prikazane dnevne promene efikasnosti fotonaponskog sistema u okolini Beograda u toku aprila 2009. godine, kao i vrednosti srednjih dnevnih efikasnosti u istom vremenskom periodu. Greška koja se čini korišćenjem srednje dnevne efikasnosti u proračunu godišnje proizvodnje sistema je oko 5%.



Slika 6.30. Dnevne promene efikasnosti i vrednosti srednjih dnevnih efikasnosti fotonaponskog sistema u okolini Beograda u toku aprila 2009. godine

S obzirom da se maksimalna insolacija po pravilu javlja u periodima dana kada je i temperatura maksimalna, u analizama proizvodnje električne energije nekog fotonaponskog sistema umesto srednjih dnevnih temperatura (koje su računate za period obdanice) mogu se koristiti i vrednosti maksimalnih dnevnih temperatura.

Uobičajen i jednostavan način za prikazivanje efikasnosti proizvodnje energije bilo kog sistema za proizvodnju električne energije je prikazivanjem njegove AC snage i faktora kapaciteta (CF – *Capacity Factor*). Faktor kapaciteta se obično definiše na godišnjem nivou, ali se može definisati i za dnevni, nedeljni i mesečni horizont. Instalirana snaga fotonaponske elektrane se izražava kao izlazna DC snaga pod standardnim test uslovima. Zbog toga se kod fotonaponskih elektrana proizvedena godišnja energija obično izražava preko DC faktora kapaciteta na godišnjem nivou:

$$W_d [\text{kWh}] = P_{\text{DC(STC)}} [\text{kW}] \cdot CF \cdot 8760 [\text{h}] \cdot \eta_z \eta_N \eta_T \eta_{\text{inv}} \quad (6.29)$$

Proizvedena energija fotonaponske elektrane na dnevnom nivou je:

$$W_d [\text{kWh}] = P_{\text{DC(STC)}} [\text{kW}] \cdot CF \cdot 24 [\text{h}] \cdot \eta_z \eta_N \eta_T \eta_{\text{inv}} \quad (6.30)$$

gde je faktor kapaciteta na dnevnom nivou:

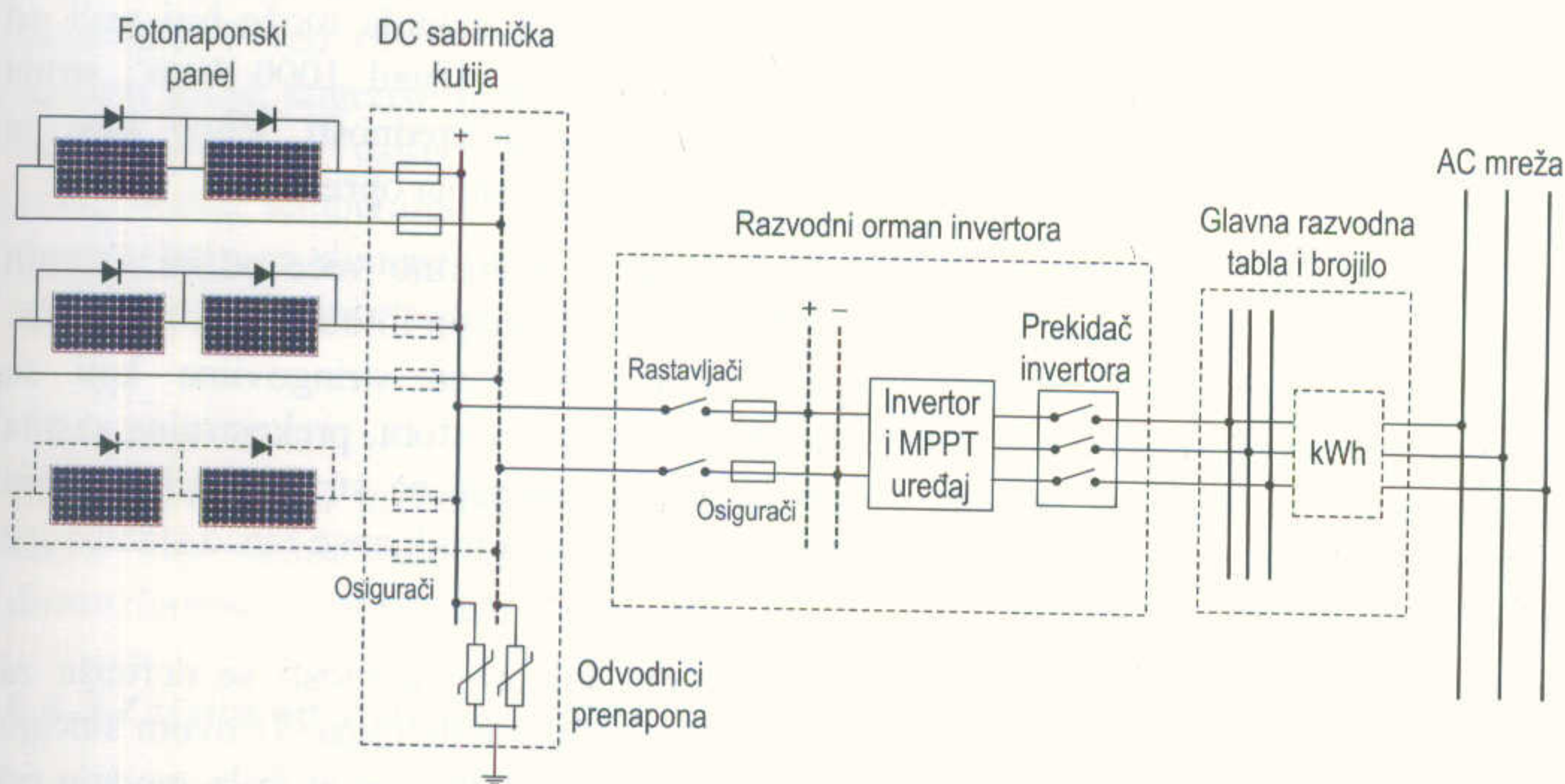
$$CF = \frac{h_{1-\text{sunce}}}{24 \text{ h}} \quad (6.31)$$

Ključni elementi za konfigurisanje sistema su uklapanje modula u raspoloživi prostor i analiza izlaznih karakteristika modula u realnim uslovima eksploatacije i prilagođavanje karakteristikama invertora. Pri konfigurisanju fotonaponskih modula u panel treba imati u vidu i uslov da izlazni napon panela treba bude u deklarisanom opsegu za ulazni napon invertora. Takođe, u granicama deklarisanog opsega za ulazni napon invertora treba da bude i maksimalni izlazni napon fotonaponskog panela koji se očekuje, a to je napon otvorenog kola panela pri minimalnoj temperaturi $T_{\text{amb min}}$ koja se očekuje na lokaciji postavljenja panela:

$$U_{\text{OK max}} = U_{\text{OK(STC)}} (1 - \alpha_U (T_{\text{amb min}} - 25^{\circ})) \quad (6.32)$$

U prethodnoj relaciji za proračun maksimalnog napona pretpostavljeno je da temperatura panela može odgovarati ambijentalnoj temperaturi i da je iradijansa u tim uslovima bliska jednom suncu, čime se ide na stranu sigurnosti.

Principijelna šema fotonaponskog sistema sa centralnim invertorom koji je povezan na distributivnu mrežu prikazana je na slici 6.31.



Slika 6.31. Principijelna šema fotonaponskog sistema sa centralnim invertorom koji je priključen na distributivnu mrežu

Glavna komponenta fotonaponskog sistema povezanog na distributivnu mrežu je fotonaponski panel koji je sastavljen iz više paralelno vezanih grana sa nizovima (stringovima) redno-vezanih fotonaponskih modula. Svaki niz (string) je povezan na