1. Energija Sunca

1.1 Nomenklatura

Pojam	**Simbol**	**Simbol u anglo-saksonskoj literaturi**
Napon otvorenog kruga; napon praznog hoda	U_{ok}	U_{oc}; V_{oc}

1.2 Riješeni primjeri

■ **Primjer 1.1** Razmatra se p-n dioda na temperaturi od 25°C s reverznom strujom zasićenja od 10^{-9} A. Odredite napon diode za sljedeće slučajeve:

a) napon otvorenog kruga (napon praznog hoda),
b) struja diode iznosi 1 A,
c) struja diode iznosi 10 A.

Rješenje: Struja diode dana je jednadžbom:

$$I_d = I_0 \cdot \left(e^{\frac{qU_d}{kT}} - 1 \right).$$

a) Pri praznom hodu struja diode iznosi 0 A, odnosno možemo pisati:

$$I_d = 0 \Rightarrow I_0 \cdot \left(e^{\frac{qU_d}{kT}} - 1 \right) = 0$$

$$e^{\frac{qU_d}{kT}} - 1 = 0 \Rightarrow \frac{qU_d}{kT} = 0 \Rightarrow \boxed{U_d = 0\ \mathrm{V}}$$

b) Ako struja diode iznosi 1 A možemo pisati:

$$I_d = 1 \Rightarrow I_0 \cdot \left(e^{\frac{qU_d}{kT}} - 1\right) = 1$$

$$e^{\frac{qU_d}{kT}} - 1 = \frac{1}{I_0}$$

$$e^{\frac{qU_d}{kT}} = \frac{1}{I_0} + 1/\ln$$

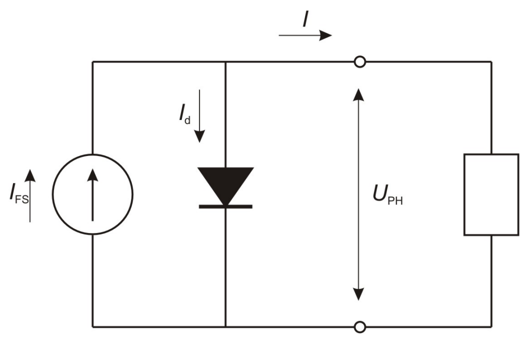
$$\frac{qU_d}{kT} = \ln\left(\frac{1+I_0}{I_0}\right) \Rightarrow \boxed{U_d = 0,532 \text{ V}}$$

c) Ako struja diode iznosi 10 A, a slijedeći postupak opisan u prethodnom slučaju, napon diode iznosi $\boxed{U_d = 0,592 \text{ V}}$.

■

■ **Primjer 1.2** Razmatra se fotonaponska ćelija površine 100 cm^2 sa specifičnom reverznom strujom zasićenja $I_0' = 10^{-12}$ A/cm^2 koja radi na temperaturi od 25°C. Uz puno osvjetljenje specifična struja kratkog spoja iznosi 40 mA/cm^2. Odredite napon praznog hoda na punom, kao i na 50% osvjetljenju. Zanemarite serijski i paralelni otpor fotonaponske ćelije.

Rješenje: Uz zanemarenje serijskog i paralelnog otpora fotonaponsku ćeliju možemo analizirati uz pomoć jednostavne ekvivalentne sheme:



$I_0' = 10^{-12}$ A/cm^2
$S = 100$ cm^2
$T = 298$ K
$I_{KS}' = 40$ mA/cm^2

$U_{\text{PH}100\%}, U_{\text{PH}50\%} = ?$

Slika 1.1: Jednostavna ekvivalentna shema fotonaponske ćelije

Reverznu struju zasićenja i struju kratkog spoja pri punom osvjetljenju možemo izračunati iz njihovih specifičnih vrijednosti i poznate površine ćelije:

$$I_0 = I_0' \cdot S = 10^{-12} \text{ A/cm}^2 \cdot 100 \text{ cm}^2 \Rightarrow \boxed{I_0 = 10^{-10} \text{ A}} \; I_{\text{KS}} = I_{\text{KS}}' \cdot S = 40 \text{ mA/cm}^2 \cdot 100 \text{ cm}^2 \Rightarrow \boxed{I_{\text{KS}} = 4 \text{ A}}$$

Struja fotonaponske 'celije I jednaka je razlici fotostruje I_{FS} koja nastaje osvjetljavanjem ćelije i stuje diode I_{d}:

$$I = I_{\text{FS}} - I_{\text{d}} = I_{\text{FS}} - I_0\left(e^{\frac{qU_d}{kT}} - 1\right).$$

U slučaju praznog hoda na spojne točke nije spojen vanjski teret te je struja ćelije jednaka 0 a napon diode U_{d} jednak je naponu praznog hoda U_{PH} pa možemo pisati:

$$I = 0 \Rightarrow I_{\text{FS}} = I_0\left(e^{\frac{qU_d}{kT}} - 1\right)$$

$$\frac{I_{\text{FS}}}{I_0} + 1 = e^{\frac{qU_d}{kT}} / \ln$$

$$\ln\left(\frac{I_{\text{FS}} + I_0}{I_0}\right) = \frac{qU_d}{kT} \Rightarrow U_{\text{PH}} = U_{\text{d}} = \frac{kT}{q} \cdot \left(\frac{I_{\text{FS}} + I_0}{I_0}\right).$$

U slučaju kratkog spoja napon na diodi jednak je 0 pa je i struja kroz diodu jednaka 0, odnosno $I_d = 0$. Jasno je da je struja kratkog spoja jednaka fotostruji, odnosno $I_{KS} = I_{FS}$. Tada prethodni izraz za napon praznog hoda možemo pisati kao:

$$U_{PH} = \frac{kT}{q} \cdot \left(\frac{I_{KS} + I_0}{I_0} \right).$$

Napon praznog hoda pri punom osvjetljenju tada iznosi $\boxed{U_{PH100\%} = 0,627 \text{ V}}$. Za određivanje napona praznog hoda pri 50% osvjetljenju potrebno je odrediti pripadajuću struju kratkog spoja, odnosno fotostruju. Fotostruja je proporcionalna osvjetljenju pa možemo zakljkučiti da je pri upola manjem osvjetljenju fotostruja upola manja, a time i odgovarajuća struja kratkog spoja, odnosno $I_{FS50\%} = I_{KS50\%} = 2$ A. Napon praznog hoda pri 50% osvjetljenju tada iznosi $\boxed{U_{PH100\%} = 0,610 \text{ V}}$.

■

■ **Primjer 1.3** Odredite optimalni kut nagiba za PV modul okrenut prema jugu i smješten u Zagrebu u solarno podne 1. ožujka. Zemljopisna širina Zagreb je $\varphi = 45,82°$.

Rješenje: Za određivanje optimalnog kuta nagiba modula nužna je karakteriziacija položaja Sunca u danom trenutku. 1. ožujak je 60-ti dan u godini (31+28+1) ĂŤime nam je definirana varijabla $n = 60$ potrebna za određivanje kuta deklinacije Sunca. Kut deklinacije Sunca δ određujemo pomoću izraza [**kulisic91**]:

$$\delta = 23,45° \sin\left(360° \cdot \frac{284+n}{365}\right) \Rightarrow \boxed{\delta = -8,3°}.$$

U solarno (Sunčevo) podne je satni kut Sunca ω po definiciji jednak nuli, odnosno $\omega = 0$.

Visinu Sunca α može se izračunati iz zemljopisne širine, deklinacije Sunca i satnog kuta Sunca sljedećim izrazom:

$$\sin\alpha = \sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \cos\omega.$$

Kako je $\omega = 0$ slijedi da je $\cos\omega = 1$ pa prethodni izraz možemo pisati u obliku:

$$\begin{aligned}
\sin\alpha &= \sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \\
\sin\alpha &= \cos(\varphi - \delta) = \sin(90° - \varphi + \delta) \\
&\Downarrow
\end{aligned}$$

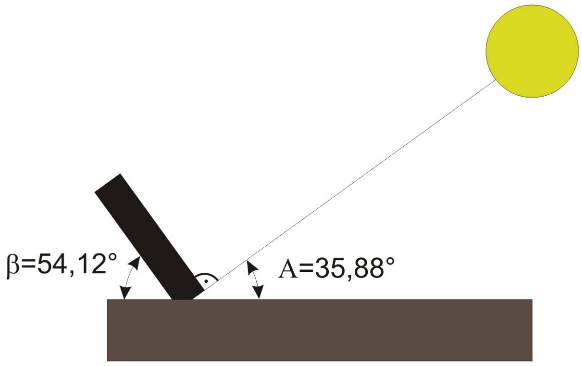
$$\boxed{\alpha = 90° - \varphi + \delta} \Rightarrow \boxed{\alpha = 35,88°}.$$

Optimalni kut podrazumijeva da su Sunčeve zrake okomite na plohu pa iz slike 1.2 slijedi:

$$\beta = 90° - \alpha \Rightarrow \boxed{\beta = 54,12°}.$$

■

■ **Primjer 1.4** Odredite visinu Sunca i azimutni kut Sunca u 3 sata poslijepodne u Zagrebu na dan ljetnog solsticija. Zemljopisna širina Zagreb je $\varphi = 45,82°$.



Slika 1.2: Shematski prikaz optimalnog položaja PV modula u ovisnosti o visini Sunca

---

Rješenje: Na dan ljetnog solsticija (21.6.) os Zemljine rotacije maksimalno je nagnuta k Suncu te je kut deklinacije Sunca $\delta = 23,45°$. U 3 sata poslijepodne satni kut Sunca je dogovorno negativan [**masters2004**] i iznosi $\omega = 3 \cdot 15° = -45°$[1]. Visinu Sunca određujemo iz izraza:

$$\sin\alpha = \sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos\omega,$$

pa slijedi da je $\sin\alpha = 0,63407 \Rightarrow \boxed{\alpha = 39,35°}$.

Azimutni kut Sunca dogovorno je pozitivan prijeSunčeva podneva i negativan poslije Sunčeva podneva a definiran je izrazom [**masters2004**]:

$$\sin\Omega = \frac{\cos\delta \cdot \sin\omega}{\cos\alpha} \Rightarrow \sin\Omega = -0,8384.$$

Funkcija arkusinus je dvoznačna i postoje dvije mogućnosti:

$$\Omega = \arcsin(-0,8384) \Rightarrow \Omega_1 = -57°,\ \Omega_2 = -123°.$$

Jasno je da obje vrijednosti označavaju da je u 3 sata poslijepodne Sunce zapadno od juga. Pitanje je koja je vrijednost točna. Naime, u proljeće i ljeto u rano jutro i kasno poslijedpodne moguće je da je azinutni kut Sunca po apsolutnoj vrijednosti ve'ci od 90°. Za odabit prave vrijednosti koristimo sljedeći test:

$$\text{ako je } \cos\alpha \geq \frac{\tan\delta}{\tan\varphi} \text{ tada je } |\Omega| \leq 90° \text{ a inače je } |\Omega| \geq 90°.$$

Uporaba testnog izraza na konkretnom slučaju rezultira:

$$0,7733 \geq \frac{0,43378}{1,029} \Rightarrow |\Omega \leq 90°| \Rightarrow \boxed{\Omega = -57° \text{ zapadno od juga.}}$$

■

[1] U izrazima u kojima se upotrebljava kosinus satnog kuta Sunca nebitno je da li je satni kut Sunca pozitivan ili negativan, odnosno da li se koristi dogovor da je prijepodne satni kut Sunca pozitivan a poslijedpodne negativan ili obrnuto [**kulisic91**]($\cos(\omega) = \cos(-\omega)$). Pozornost valja obratiti ako se u izrazu koristi sinus satnog kuta Sunca jer $\sin(\omega) \neq \sin(-\omega)$

■ **Primjer 1.5** Odredite vrijednost direktne, difuzne i reflektirane komponente Sunčeva zračenja u solarno podne vedrog 21. svibnja u Zagrebu na plohu okrenutu prema jugoistoku pod kutem od 20° u odnosu na jug i nagnutu pod kutem od 52°. Zemljopisna širina Zagreba je $\varphi = 45,82°$, a za faktor refleksije okoline plohe pretpostavite da iznosi $0,2$. Proračun provedite uporabom ASHRAE modela.

Rješenje: Model karakterizacije Sunčeva zračenja Američkog društva inženjera grijanja, hlađenja i klimatizacije (ASHRAE) na vedar dan temeljen je na empiričkim podacima prikupljenima sredinom 20. stoljeća u SAD-u. Riječ je o jednostavnom modelu ograničene točnosti, no vrlo je jednostavan za primjenu. Također valja napomenuti da zbog drugačijih atmosferskih prilika u Hrvatskoj u odnosu na SAD, uporaba ASHRAE modela unosi dodatnu pogrešku.

Prema ASHRAE modelu direktna komponenta Sunčeva zračenja na plohu koja je okomita na Sunčeve zrake može se izraziti kao:

$$G_b = A \cdot e^{km},$$

pri čemu je A prividno ekstraterestičko ozračenje, k je koeficijent optičke dubine (koeficijent apsorpcije), a m optička masa zraka. Koeficijenti A i k izraženi su sljedećim poluempiričkim formulama:

$$A = 1160 + 75 \cdot \sin\left[\frac{360}{365}(n-275)\right],$$
$$k = 0,174 + 0,035 \cdot \sin\left[\frac{360}{365}(n-100)\right],$$

gdje je s n označen redni broj dana u godini. Kako se analiza provodi za 21. svibnja proizlazi:

$$n = 31+28+31+30+21 \Rightarrow n = 141,$$
$$A = 1160 + 75 \cdot \sin\left[\frac{360}{365}(141-275)\right] \Rightarrow \boxed{A = 1104,4\mathrm{W/m^2}},$$
$$k = 0,174 + 0,035 \cdot \sin\left[\frac{360}{365}(141-100)\right] \Rightarrow \boxed{k = 0,197}.$$

Optičku masu zraka moguće je izračunati iz sljedećeg izraza:

$$m = \frac{1}{\sin\alpha},$$

pri čemu kut α označava visinu Sunce, a definiran je zemljopisnom širinom lokacije (φ), kutem deklinacije (δ) i satnim kutem Sunca (ω):

$$\sin\alpha = \sin\varphi \cdot \sin\delta + \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega.$$

Kut deklinacije definiran je izrazom:

$$\delta = 23,45° \cdot \sin\left(360° \cdot \frac{284+n}{365}\right),$$

pa za 141. dan u godini proizlazi da je $\boxed{\delta = 20,1°}$. Za solarno podne ($\omega = 0°$) vrijedi da je:

$$\alpha = 90° - \varphi + \delta \Rightarrow \boxed{\alpha = 64,3°}.$$

Uporaba dobivene visine Sunca za izračun optičke mase zraka rezultira s $\boxed{m = 1,11}$. Sada su poznati svi parametri potrebni za određivanje G_b:

$$G_b = A \cdot e^{km} = 1104,4 \cdot e^{-0,197 \cdot 1,11} \Rightarrow \boxed{G_b = 887,2 \text{ W/m}^2}.$$

Direktno ozračenje plohe pod nagibom ovisi o kutu (Θ) pod kojim Sunčeve zrake upadaju na plohu, a koji je dan sljedećim izrazom:

$$cos\Theta = \cos\alpha \cdot \cos(\Omega_s - \Omega_p) \cdot \sin\beta + \sin\alpha \cdot \cos\beta,$$

gdje su Ω_s i Ω_p azimutni kutevi Sunca i plohe, α kut visine Sunca i β kut nagiba plohe. U solarno podne satni kut Sunca ω jednak je nuli pa iz izraza:

$$\sin\Omega_s = \frac{\cos\delta \cdot \sin\omega}{\cos\alpha}$$

slijedi da je $\boxed{\Omega_s = 0^\circ}$.

Azimutni kut plohe zadan je u tekstu zadatka i iznosi $\Omega_p = 20^\circ$. UZ prije izračunatu visinu Sunca i zadani nagib plohe $(\beta = 52^\circ)$ slijedi da je:

$$cos\Theta = \cos 64,3^\circ \cdot \cos(0^\circ - 20^\circ) \cdot \sin 52^\circ + \sin 64,3^\circ \cdot \cos 52^\circ \Rightarrow \boxed{\cos\Theta = 0,87588}.$$

Direktno ozračenje plohe pod nagibom sada možemo izračunati uporabom izraza:

$$G_{bp} = G_b \cdot \cos\Theta \Rightarrow \boxed{G_{bp} = 777,1 \text{ W/m}^2}.$$

Prema ASHRAE modelu difuzna komponenta zraÄŤenja na horizontalnu plohu određuje se prema izrazu:

$$G_d = C \cdot G_b,$$

pri čemu je C konstanta definirana izrazom:

$$C = 0,095 + 0,04 \cdot \sin\left[\frac{360}{365}(n - 100]\right).$$

Za $n = 141$ proizlazi da je $C = 0,121$, odnosno da je $G_d = 107,35887,2 \text{ W/m}^2$. Difuzna komponenta zračenja na plohu pod nagibom ovisi o kutu nagiba plohe koji određuje koji dio neba ploha "vidi", odnosno iz kojeg dijela neba difuzno zračenje može doći do plohe i definirana je izrazom:

$$G_{dp} = G_d \cdot \frac{1 + \cos\beta}{2},$$

te slijedi da je $\boxed{G_{dp} = 86,7 \text{ W/m}^2}$.

Reflektivna komponenta zračenja ovisna je o ukupnom direktnom i difuznom zračenju, kutu nagiba plohe, kao i o faktoru reflektivnosti ρ i vrijedi:

$$G_{rp} = \rho \cdot (G_{bp} + G_{dp}) \cdot \frac{1 - \cos\beta}{2} \Rightarrow \boxed{G_{rp} = 33,2 \text{ W/m}^2}$$

■

■ **Primjer 1.6** Metodom Liu, Jordana i Kleina odredite srednju dnevnu ozračenost plohe u Karlovcu u mjesecu svibnju, postavljenoj pod nagibom jednakim zemljopisnoj širini Karlovca ($\varphi = 45^\circ 30^{\text{TM}}$). Ozračenost na horizontalnu plohu za prosječan dan u mjesecu iznosi $\bar{H} = 19,94 \text{MJ}/m^2$, dok prosječna ekstraterestička ozračenost za svibanj iznosi $\bar{H}_0 = 39,09 \text{MJ}/m^2$. Albedo (faktor refleksije) iznosi 0,2. ProsjeÄŤna deklinacija Sunca za mjesec svibanj iznosi $18,8^\circ$.

Rješenje: Ukupna ozračenost plohe jednaka je sumi doprinosa direktne, difuzne i reflektivne komponente te možemo pisati:

$$\bar{H}_\beta = \bar{H}_{b\beta} + \bar{H}_{d\beta} + \bar{H}_{r\beta}.$$

Direktna komponenta ozračenosti plohe pod nagibom može se odrediti iz izraza:

$$\bar{H}_{b\beta} = (\bar{H} - \bar{H}_d) \cdot \bar{R}_{b\beta},$$

pri čemu je $\bar{H}$ srednja dnevna ozračenost horizontalne plohe, $\bar{H}_d$ srednja dnevna difuzna ozračenost horizontalne plohe, a $\bar{R}_{b\beta}$ multiplikacijski faktor ovisan o solarnim kutevima i dan izrazom:

$$\bar{R}_{b\beta} = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega_s' + \frac{\Pi}{180} \cdot \omega_s' \cdot \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin\delta}{\cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega_s + \sin\varphi \cdot \sin\delta \frac{\Pi}{180} \cdot \omega_s}.$$

Prema tekstu zadatka kut nagiba plohe (β) jednak je zemljopisnoj širini lokacije (φ) i iznose $45,5°$, a kut deklinacije Sunca (δ) jednak je $18,8°$. Kut izlaska (zalaska) Sunca na horizontalnu plohu (ω_s) i kut zalaska Sunca za nagnutu plohu (ω_s') potrebno je odrediti uporabom sljedećih izraza:

$$\begin{aligned} \omega_s &= \arccos(-\mathrm{tg}\varphi \cdot \mathrm{tg}\delta) && \Rightarrow \omega_s = 110,27° \\ \omega_s' &= \min\{\omega_s, \arccos[-\mathrm{tg}(\varphi - \beta) \cdot \mathrm{tg}\delta]\} && \Rightarrow \omega_s' = 90°. \end{aligned}$$

Uporabom zadanih i izračunatih vrijednosti solarnih kuteva može se izračunati da je $\boxed{\bar{R}_{b\beta} = 0,889}$. Srednja dnevna ozračenost horizontalne plohe ($\bar{H}$) i srednja dnevna difuzna ozračenost horizontalne plohe ($\bar{H}_d$), odnosno udio rasprĹenog u ukupnog zračenju, vezani su empiričkom Pegeovom dvoparametarskom ili Liu-Jordanovom četveroparametarskom relacijom općeg oblika:

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = A + B \cdot \bar{K}_T,$$

odnosno

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = a - b \cdot \bar{K}_T + c \cdot \bar{K}_T^2 - d \cdot \bar{K}_T^3,$$

gdje je s $\bar{K}_T$ označen indeks prozračnosti, odnosno omjer srednje dnevne prizemne ozračenosti horizontalne plohe i srednje dnevne ekstrateresticke ozračenosti horizontalne plohe:

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0}.$$

Prema podacima zadanima u zadatku proizlazi da je indeks prozračnosti $\bar{K}_T = 0,51$. Originalni Pageovi i Liu-Jordanovi parametri ne odgovaraju u potpunosti našem podneblju. Niz istraživača korelirao je dostupna mjerenja, uglavnom za područje bivše Jugoslavije u potrazi za optimalnim vrijednostima navedenih parametara. U nastavku koristimo podatke prema [**kulisic91**] koji navodi:

$$A = 1,05;\ B = 1,096;\ a = 1,60;\ b = 4,17;\ c = 5,29;\ d = 2,86.$$

Uporaba Pageove relacije uz navedene parametre rezultira s $\bar{H}_d = 32,30\mathrm{MJ/m^2}$, a Liu-Jordanove s $\bar{H}_d = 9,37\mathrm{MJ/m^2}$. Kako je difuzna komponenta ozračenosti horizontalne plohe izračunata Pageovom relacijom veća od ukupne ozračenosti jasno je da navedena relacija nije pogodna za konkretan problem. Stoga u nastavku koristimo podatak izračunat Liu-Jordanovom relacijom te proizlazi:

$$\bar{H}_{b\beta} = (\bar{H} - \bar{H}_d) \cdot \bar{R}_{b\beta} = (19,94 - 9,37) \cdot 0,889 \Rightarrow \boxed{\bar{H}_{b\beta} = 9,40\text{MJ/m}^2}.$$

Difuzna komponenta ozračenosti plohe pod nagibom ovisi o kutu nagiba plohe i dana je relacijom:

$$\bar{H}_{d\beta} = \bar{H}_d \cdot \frac{1 + \cos\beta}{2} = 9,37 \cdot \frac{1 + \cos 45,5^\circ}{2} \Rightarrow \boxed{\bar{H}_{d\beta} = 7,97\text{MJ/m}^2}.$$

Reflektivna komponenta ozračenosti plohe pod nagibom također ovisi o kutu nagiba plohe i dana je relacijom:

$$\bar{H}_{r\beta} = \rho \cdot \bar{H} \cdot \frac{1 - \cos\beta}{2} = 0,2 \cdot 19,94 \cdot \frac{1 - \cos 45,5^\circ}{2} \Rightarrow \boxed{\bar{H}_{r\beta} = 0,60\text{MJ/m}^2}.$$

Sada je moguće odrediti ukupnu ozračenost plohe pod nagibom:

$$\bar{H}_{\beta} = \bar{H}_{b\beta} + \bar{H}_{d\beta} + \bar{H}_{r\beta} \Rightarrow \boxed{\bar{H}_{\beta} = 17,97\text{MJ/m}^2}.$$

■

■ **Primjer 1.7** Fotovoltaični modul sastavljen je od 36 ćelija. Paralelni otpor svake ćelije iznosi 6,6 Ω. Pri punom osvjetljenju i struji od 2,14 A napon modula je 19,41 V. Ako je jedna od ćelija zasjenjena, a struja modula ostaje ista, odredite:

1. napon i snagu modula,
2. pad napona na zasjenjenoj ćeliji,
3. rasipnu snagu na zasjenjenoj ćeliji.

Rješenje: Za bolje razumijevanje problematike zasjenjenja poslužit ćemo se grafičkim prikazom PV modula sastavljenog od n ćelija pri čemu je jedna ćelija eksplicitno prikazana odgovarajućom nadomjesnom shemom, a preostalih $n-1$ ćelija prikazano je simbolički "crnom kutijom", slika 1.3. U slučaju normalnog osvjetljenja cijelog modula u ćeliji n nastaje fotostruja I_{FS}, a kroz cijeli modul teče struja I. Napon na stezaljkama modula U jednak je zbroju napona "crne kutije" U_{n-1} i napon izdvojene ćelije U. U slučaju pak zasjenjenja izdvojene ćelije, fotostruja te ćelije jednaka je nuli. Kako kroz njezin paraleni otpor R_p prolazi struja, ili recimo u ovom trenutku, dio struje I "crne kutije" na otporu dolazi do pada napona. Polaritet napona na otporu rezultira reverznom polarizacijom ćelijske diode, pa je struja kroz diodu praktički jednaka nuli. Prolaskom struje kroz paralelni i serijski otpor izdvojene ćelije dolazi do pada napona na stezaljkama modula. Uz pretpostavku da je preostalih $n-1$ ćelija pod normalnim osvjetljenjem možemo pretpostaviti da kroz njih i dalje teče struja I, dok je njihov napon U_{n-1}. Napon na stezaljkama modula tada iznosi:

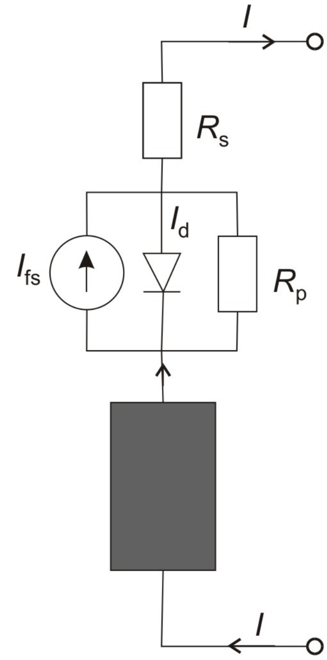
$$U_\text{Z} = U_{n-1} - I \cdot \left(R_\text{p} + R_\text{s}\right),$$

pri čemu su R_p i R_s paraleni, odnosno serijski otpor ćelije. Napon $n-1$ nezasjenjenih ćelija je:

$$U_{n-1} = \frac{n-1}{n} \cdot U,$$

pri čemu je s U označen napon na stezaljkama u uvjetima normalnog osvjetljenja cijelog modula. Iz navedenih izraza proizlazi:

$$U_\text{Z} = \frac{n-1}{n} \cdot U - I \cdot \left(R_\text{p} + R_\text{s}\right).$$



Slika 1.3: Shematski prikaz modula s jednom izdvojenom ćelijom eksplicite prikazanom nadomjesnom shemom

Pad napona na stezaljkama modula zbog zasjenjenja jedne ćelije tada iznosi:

$$\Delta U = U - U_Z \Rightarrow \Delta U = \frac{U}{n} + I \cdot \left(R_p + R_s\right).$$

Sada su poznate sve relacije potrebne za rješavanje zadatka:

1. Uz pretpostavku da je serijski otpor puno manji odparalelnog otpora ćelije, te da ga stoga možemo zanemariti slijedi:

   $$\Delta U = \frac{19,41}{36} + 2,14 \cdot 6,6 \Rightarrow \Delta U = 14,66\text{V}$$

   , odnosno

   $$U_Z = 19,41 - 14,66 \Rightarrow \boxed{U_Z = 4,75\ \text{V}}$$

   . Snagu modula moguće je odrediti iz relacije:

   $$P_{\text{modula}} = U \cdot I = 4,75 \cdot 2,14 \Rightarrow \boxed{P_{\text{modula}} = 10,1\ \text{W}}$$

   .
2. Pad napona na zasjenjenoj ćeliji jednak je:

   $$U_{\text{ć}} = I \cdot R_p \Rightarrow \boxed{U_{\text{ć}} = 14,1\ \text{V}}$$

   .
3. Snaga koja se u obliku topline rasipa na zasjenjenoj ćeliji iznosi:

   $$P_{\text{ć}} = U_{\text{ć}} \cdot I \Rightarrow \boxed{P_{\text{ć}} = 30,2\ \text{W}}$$

   .

■

■ **Primjer 1.8** Na lokaciji od interesa usidrena je brodica na čijem je krovu horizontalno instaliran fotonaponski sustav koji se sastoji od 6 serijski povezanih panela (slika 1.4). Tehnički podaci panela dani su u tablici. U analiziranom trenutku (solarno podne uz visinu Sunca od 60°) ambijentalna temperatura je 30°C, direktno ozračenje plohe okomite na Sunčeve zrake $G_B = 921,2\text{W/m}^2$, direktno ozračenje horizontalne plohe $G_{BH} = 792\text{W/m}^2$, a difuzno ozračenje horizontalne plohe $G_{DH} = 94,5\text{W/m}^2$.

1. Odredite maksimalnu DC snagu na priključcima PV sustava ako je more mirno.,
2. Pri pojavi valova koji se prostiru u smjeru Jug-Sjever dolazi do naginjanja čamca (panela) za kut od ±20°. Odredite varijaciju izlazne DC snage PV sustava uzrokovanu valovima. Zanemarite reflektiranu komponentu ozračenja kao i promjenu temperature panela.

Slika 1.4: Brodica s horizontalnim panelima

Tablica 1.1: Tehnički podaci panela

Model	ZDNY-235P60
Maks. snaga (P_{max})	235 Wp
Opt. radni napon (U_m)	29,78 V
Opt. radna struja (I_m)	7,90 A
Napon otvorenog kruga (U_{ok})	37,45 V
Struja kratkog spoja (I_{ks})	8,35 A
Efikasnost ćlije ($\eta_{Ä‡}$)	16,1%
Efikasnost modula (η_m)	14,4%
NOCT	47°C

Rješenje: Ukupno ozračenje horizontalne plohe je zbroj direktnog i difuznog ozračenja, odnosno:

$$G_H = G_{BH} + G_{DH} = 886,5\text{W/m}^2.$$

Temperaturu solarnih ćelija, odnosno, panela moguće je odrediti iz uporabom sljedećeg izraza:

$$t_{panela} = t_{amb} + \frac{NOCT - 20°}{800} \cdot G_H = 30 + \frac{47-20}{800} \cdot 886,5 = 59,9°\text{C}.$$

U tablici su dani podaci o nazivnoj snazi panela pri STC uvjetima, kao i podaci o odstupanju snage s promjenom temperature. Uzimajući u obzir te podatke i izračunatu temperaturu panela uz uporabu sljedećeg izraza moguće je odrediti i traženu snagu polja panela u stanju mirovanja brodice:

$$\begin{aligned} P_{DC} &= N_{panela} \cdot P_{DC}^{STC} \cdot \frac{G_P}{1000} \cdot \left[1 - \frac{\Delta p}{100} \cdot \left(t_{panela} - 25\right)\right] \\ &= 6 \cdot 235 \cdot \frac{886,5}{1000} \cdot \left[1 - \frac{0,4}{100} \cdot (59,9 - 25)\right] \Rightarrow \boxed{P_{DC} = 1075,3\text{ W}}. \end{aligned}$$

Valja napomenuti da simbol G_P u prethodnom izrazu označava ozračenje ukupno plohe od interesa. Ako je ploha horizontalna onda je ukupno ozračenje horizontalne plohe G_H, a ako je riječ o plohi pod nagibom onda je to njezino ukupno ozračenje, odnosno G_C.

Proračun ukupnog ozračenja plohe pod nagibom provest ćemo uporabom sljedećeg izraza ASHRAE modela:

$$G_C = G_{BC} + G_{DC} = G_B \cdot \cos(\theta) + G_{DH} \cdot \frac{1+\cos(\beta)}{2}.$$

Jedini podatak koji nam nedostaje je incidentni kut upada Sunčevih zraka na plohu pod nagibom (panele), odnosno kosinus toga kuta, $\cos(\theta)$, koji je definiran sljedećom relacijom:

$$\cos\Theta = \cos\alpha \cdot \cos(\Omega_S - \Omega_P) \cdot \sin\beta + \sin\alpha \cdot \cos\beta,$$

gdje su Ω_S i Ω_P azimutni kutevi Sunca i panela, α kut visine Sunca i β kut nagiba plohe. U solarno podne satni kut Sunca ω jednak je nuli pa iz izraza:

$$\sin\Omega_s = \frac{\cos\delta \cdot \sin\omega}{\cos\alpha}$$

slijedi da je $\boxed{\Omega_S = 0^\circ}$.

Paneli su okrenuti prema Jugu pa i za azimutni kut panela vrijedi da je jednak nuli, odnosno $\boxed{\Omega_P = 0^\circ}$, čime se prethodni izraz pojednostavnjuje te slijedi:

$$\cos\Theta = \cos\alpha \cdot \sin\beta + \sin\alpha \cdot \cos\beta = \sin(\alpha + \beta)$$

Kada je čamac izložen djelovanju valova kut nagiba panela varira od -20° kada je nagnut prema Sjeveru do $+20^\circ$ kada je nagnut prema Jugu ($-20^\circ \leq \beta \leq +20^\circ$).

Uvrštavanjem iznesenih podataka u prethodno definirane izraze za ozračenje plohe pod nagibom i snagu panela dolazimo do sljedećih rezultata:

- kada je čamac nagnut prema Jugu:
  $\beta = +20^\circ$; $\cos\Theta = 0,985$; $G_C = 999,0$ W/m^2; $P_{DC} = 1212,0$ W/m^2,
- kada je čamac nagnut prema Sjeveru:
  $\beta = -20^\circ$; $\cos\Theta = 0,643$; $G_C = 684,0$ W/m^2; $P_{DC} = 829,8$ W/m^2.

■

■ **Primjer 1.9** Pretpostavite da gotovo prazan 12 V olovni akumulator ima napon praznog hoda od 11,7 V i unutarnji otpor od 0,03 Ω. Odredite

1. Na kojem naponu radi PV modul ako punu akumulator strujom od 6 A?
2. Ako se akumulator prazni pri naponu od 12,7 V i struji od 20 A, koliki bi bio napon PV modula?

Rješenje: Za bolje razumijevanje procesa poslužit ćemo se pojednostavljenjom shemom spajanja i grafičkim prikazom procesa punjenja i pražnjenja akumulatora, slika 1.5.

1. Prilikom punjenja akumulatora vrijedi:

$$U = U_{\text{akum}} + I \cdot R_u \Rightarrow \boxed{U = 11,88 \text{ V}}$$

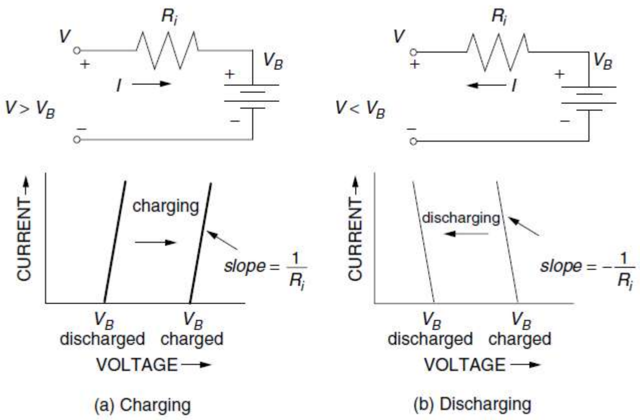
.

2. Prilikom pražnjenja akumulatora vrijedi:

$$U = U_{\text{akum}} - I \cdot R_u \Rightarrow \boxed{U = 12,1 \text{ V}}$$

.

■



Slika 1.5: Shematski prikaz procesa punjenja i pražnjenja akumulatora PV modulom

1.3 Paragraphs of Text

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo