

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

**RAČUNALNA SIMULACIJA RADA
FOTONAPONSKOG SUSTAVA**

MAGISTARSKI RAD

Zagreb 2002

Magistarski rad je izrađen na Zavodu za primijenjenu fiziku Fakulteta elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu i u Brodarskom institut d.o.o. Zagreb u Sektoru za upravljanje sustavima i procesima.

Mentor: _____

Rad ima 193 strana

Povjerenstvo za ocjenu u sastavu:

1. Prof. dr. sc. xxxxxxxxxxx - predsjednik
2. Doc. dr. sc. xxxxxxxxxxx - mentor
3. Dr. sc. xxxxxxxx – Institut "Ruđer Bošković" – Zagreb

Povjerenstvo za obranu u sastavu:

1. Prof. dr. sc. xxxxxxxxxxx - predsjednik
2. Doc. dr. sc. xxxxxxxxxxx - mentor
3. Dr. sc. xxxxxxxx – Institut "Ruđer Bošković" – Zagreb

Datum obrane: 07. svibanj 2002

SADRŽAJ

1.	ZADATAK RADA	4
2.	UVOD	4
3.	SUNČEVA ENERGIJA	4
3.1	Porijeklo i priroda sunčevog zračenja.....	4
3.1.1	Uvod	4
3.1.2	Spektar sunčevog zračenja	5
3.2	Geometrija prijenosa sunčeve energije	6
3.2.1	Kretanje Zemlje u odnosu na Sunce.....	6
3.2.2	Relativan položaj Sunca	7
3.2.3	Upadni kut na plohu	9
3.3	Izvanatmosfersko i prizemno Sunčevo zračenje.....	11
3.3.1	Apsorpcija zračenja prolaskom kroz atmosferu	11
3.3.2	Difuzno ozračenje	13
3.3.3	Mjerenje Sunčevog ozračenje i procjena komponenti ozračenja	14
3.4	Ozračenje i ozračenost na nagnutu plohu	16
3.4.1	Ozračenje kose plohe	16
3.4.2	Ozračenost kose plohe.....	17
3.5	Model klime	19
3.5.1	Frekvencijska raspodjela ozračenja, Liu – Jordanov model	20
3.5.2	Ovisnost srednje temperature o indeksu prozračnosti.....	24
4.	TEHNOLOGIJA ISKORIŠTAVANJA SUNČEVE ENERGIJE	28
4.1	Fototermalna pretvorba – Solarni kolektori	28
4.2	Fotonaponska pretvorba.....	28
4.2.1	Samostojeći fotonaponski sustavi	28
4.2.2	Hibridni fotonaponski sustavi	29
4.2.3	Mrežni fotonaponski sustavi- fotonaponske elektrane.....	29
5.	FOTONAPONSKA PRETVORBA	30
5.1	Fizikalne osnove fotonaponske pretvorbe	30
5.1.1	Fotoelektrični efekt	30
5.1.2	Energetske vrpce:	30
5.1.3	Funkcija gustoće elektronskih stanja.....	31
5.1.4	Vodljivost krutih materijala	32
5.1.5	Fermijeva funkcija.....	33
5.1.6	Vodljivost poluvodiča	35
5.1.7	Poluvodička P-N dioda.....	37
5.1.8	Mehanizmi generacije i rekombinacije parova	46
5.1.9	Realni odnosi struje i napona u fotonaponskoj diodi.	49
5.2	Matematički model fotonaponskog modula.....	52
5.2.1	Analitički model fotonaponske ćelije.....	52
5.2.2	Određivanje parametara analitičkog modela	58
5.2.3	Empirijski model fotonaponske ćelije/modula.....	59
5.3	Modeliranje fotonaponskog generatora	63
5.4	Termički model fotonaponske ćelije.....	65
6.	AKUMULATORSKE BATERIJE U FOTONAPONSKOM SUSTAVU	70
6.1	Spremanje energije – uvod.....	70

6.2	Spremanje električne energije.....	70
6.3	Teorija akumulatorskih baterija	70
6.3.1	Kemijski izvori električne energije - BATERIJE	70
6.3.2	Kemiski procesi u akumulatorskim baterijama: olovo-sumporna kiselina	71
6.3.3	Kemijski procesi kod punjenja i pražnjenja olovnog akumulatora	73
6.3.4	Napon i kapacitet akumulatora.....	75
6.3.5	Tipovi akumulatorskih baterija	82
6.3.6	Metode punjenja akumulatorskih baterija	85
6.4	Matematički model akumulatorske baterije.....	90
6.4.1	Shephardov model.....	91
6.4.2	Ekvivalentni strujni krug.....	91
6.4.3	Linearni električki model	92
6.4.4	Nelinearni električni model	92
6.4.5	Hymanov model akumulatorske baterije.....	94
6.4.6	Primjer modeliranja punjenja i pražnjenja akumulatorske baterije.....	98
7.	REGULACIJA U FOTONAPONSKOM SUSTAVU I TIPIČNA TROŠILA	100
7.1	Uvod.....	100
7.2	Trošila u fotonaponskom sustavu.	101
7.2.1	Trošila za rasvjetu – električne svjetiljke.	101
7.2.2	Trošila struje – elektromotori.....	103
7.2.3	Elektronička trošila	106
7.2.4	Ostala trošila.....	106
7.3	Regulacija u fotonaponskom sustavu.....	107
7.4	Regulator punjenja i pražnjenja akumulatorske baterije.....	108
7.4.1	Tipovi regulatora punjenja i pražnjenja	109
7.4.2	Model regulatora punjenja i pražnjenja.....	111
7.4.3	Pratilac maksimalne snage MPPT	118
7.5	Izmjenjivači.....	124
7.5.1	Tipovi izmjenjivača.....	125
8.	OPIS SIMULACIJSKOG PROGRAMA.....	128
8.1	Struktura simulacijskog programa	128
8.1.1	Glavni izbornik.....	128
8.1.2	Izbornik: "Definiranje sustava"	129
8.1.3	Izbornik: "Definiranje upravljanja "	130
8.1.4	Izbornik: "Klima"	131
8.1.5	Izbornik: "FNG"	133
8.1.6	Izbornik: "BATERIJA"	134
8.1.7	Izbornik: "TROŠILA"	135
8.1.8	Izbornik: "REGULACIJA"	137
8.1.9	Izbornik: "SIMULACIJA RADA FNS-a"	139
9.	REZULTATI JEDNE SIMULACIJE	141
10.	DODATAK	145
10.1	Spektar sunčevog zračenja.....	145
10.2	Karakteristične veličine sunčevog dana	146
10.3	Koeficijenti R_b za proizvoljno orijentiranu plohu modula.....	147
10.4	Praćenje položaja Sunca	148
10.4.1	Jednoosno praćenje sunca oko horizontalne osi u pravcu sjever-jug	148

10.4.2	Jednoosno praćenje Sunca oko horizontalne osi u pravcu istok-zapad	149
10.4.3	Jednoosno praćenje Sunca oko vertikalne osi.....	150
10.4.4	Jednoosno praćenje Sunca oko proizvoljno nagnute osi.....	151
10.4.5	Dvoosno praćenje Sunca.....	153
10.5	Definicija optičke mase zraka.....	154
10.6	Metoda linearizacije funkcije zadana vrijednostima u pojedinim točkama intervala 156	
10.7	Sistematizacija formula za stohastički model ozračenja	158
10.8	Primjeri simulacija strujno- naponskih karakteristika	159
10.9	Primjer primjene termičkog modela fotonaponske ćelije.....	160
10.10	Veza elektromotorne sile galvanskog elementa i promjene standardne Gibbsove energije 162	
10.11	Dijagrami punjenja i pražnjenja olovnog akumulatora	164
10.12	Polarizacija na faznoj granici između elektrolita i elektrode	166
10.12.1	Aktivacijski prenapon	166
10.12.2	Koncentracijski prenapon	168
10.13	Rezultat simulacije modela akumulatorske baterije	170
10.14	Primjer strujno naponske karakteristike pumpnog postrojenja	171
10.15	Algoritmi rada regulatora punjenja i pražnjenja baterije.....	175
10.16	Dijagram toka	179
11.	LITERATURA.....	189
12.	SAŽETAK.....	191
13.	ABSTRACT	192
14.	ŽIVOTOPIS	193

1. ZADATAK RADA

Cilj ovog rada je definirati izgled računalne aplikacije za simuliranje fotonaponskih sustava (FNS). Aplikacija je zamišljena kao pomoć inženjerima pri projektiranju fotonaponskih sustava. U tu svrhu treba napraviti matematičke modele pojedinih komponenti fotonaponskog sustava na temelju dostupnih tehničkih podataka, te ih uključiti u jedinstven simulacijski program. Modeliranje polazi od fizikalne slike. Na temelju mjerenja određuju se parametri analitičkog ili polu-empirijskog modela. Razmatranje je ograničeno na samostojeće sustave.

2. UVOD

Poznavanje rada pojedinih komponenti sustava kao i samog sustava u cjelini nužno je potrebno za pristup projektiranju sustava. Dobro isprojektiran sustav smanjuje nepotrebne troškove zbog predimenzioniranja ili podimenzioniranja. Povećavanjem snage sustava, troškovi zbog neprilagođenja značajno rastu. Za tu svrhu razvijeno je niz matematičkih modela kako pojedinih komponenti tako i sustava u cjelini. Simuliranjem fotonaponskih sustava moguće je sagledati ponašanje sustava tijekom rada te tako otkloniti moguće slabosti koje se mogu pojaviti. Naime projektiranje sustava na temelju srednjih vrijednosti ozračenja i temperature daje pouzdane rezultate samo za klimatske uvijete približno jednakim srednjim vrijednostima. Važno je utvrditi kako će se sustav ponašati ako dođe do odstupanja od srednjih vrijednosti. Stoga dimenzioniranje sustava treba usmjeriti ka nalaženju konfiguracije s većom pouzdanošću opskrbe trošila. U trećem poglavlju ovog rada prikazan je model ozračenja dok su modeli fotonaponske ćelije (generatora) i baterije prikazani u 5. i 6. poglavlju. Ostale komponente FNS-a kao i njihovi modeli predstavljeni su u 7. poglavlju. U slijedećem poglavlju opisan je sam simulacijski program, a u 9. poglavlju dan je jedan primjer simulacije. U dodatku prikazani su proračuni i analize koji su dopuna matematičkim modelima komponenata sustava.

3. SUNČEVA ENERGIJA

3.1 *Porijeklo i priroda sunčevog zračenja*

3.1.1 Uvod

Sunčeva energija je pokretač života na zemlji i svih kretanja. Život kakvog danas poznajemo na planeti Zemlji je u velikoj mjeri ovisan o Suncu. Sunce je najbliža zvijezda planeti Zemlji i predstavlja centar našeg planetarnog sustava. Izvor energije sa Sunca su termonuklearne fuzije [lit. 1]. Energija se kroz sunčevu koru prenosi vođenjem na površinu. Površina sunca se sastoji od tri djela.

Fotosfera je sloj ioniziranih plinova; to je izvor svjetlost i sunčeve energije. Iznad fotosfere je sloj jako razrijeđenog plina debljine 10 000 km koji se zove *kromosfera*. Temperatura kromosfere je od 4500 K do 10^6 K. Zbog visoke temperature, spektar zračenja

je u području vrlo kratkih valova (kraćih od $0.2 \mu\text{m}$), i male gustoće energije zbog male gustoće plinova. Udio u ukupnom zračenju je manji od 1 %.

Na posljetku je *korona*, sloj koji se proteže milijunima kilometara od Sunca u svemir. Koronu čini ekstremno razrijeđeni i ionizirani plinovi koji su u sastavu Sunca ali moguće je da se u sastavu korone nalazi tzv. interplanetarna materija privučena gravitacijom. Vrlo visoka temperatura korone, preko 10^6 K , je posljedica udarnih valova što je potvrđeno prijemom x-zraka iz pravca Sunca. Zbog ekstremno male gustoće korone energija udio u ukupnoj energiji je zanemariv. S druge strane veći dio energije korone uopće ne može doprijeti do Zemlje zbog atmosfere. U posebnim prilikama za vrijeme potpune pomrčine sunca moguće je vidjeti dio bogatog spektra korone.

Sunčevo zračenje je po svojoj prirodi elektromagnetsko zračenje. EM valovi nastaju ubrzanjem nabijenih čestica. Val se širi brzinom svjetlosti $299.792.500 \text{ m/s}$. Elektromagnetski valovi razlikuju se prema načinu nastanka (molekularni prijelazi, nuklearni prijelazi, zračenje dipola) pa se nazivaju radio valovi, mikrovalovi, toplinski valovi, vidljiva svjetlost, ultraljubičasto zračenje, rendgensko zračenje, gama zračenje.

3.1.2 Spektar sunčevog zračenja

Sunčevo zračenje koje dopire do nas posljedica je toplinskog zračenja površine Sunca, odnosno atomskih ili molekularnih prijelaza. Svako tijelo na nekoj temperaturi zrači elektromagnetske valove. Količina toplinske energije koju izrači neko tijelo ovisi o temperaturi površine i svojstvu površine. Za neko tijelo kažemo da je “*crno za neku valnu duljinu*” ako potpuno apsorbira cijelo zračenje na toj valnoj duljini. U stacionarnom stanju pri ravnotežnoj temperaturi, takvo tijelo potpuno izrači svo apsorbirano zračenje. Realna tijela u prirodi nisu “crna”, određeni se dio zračenja reflektira kod apsorpcije. Zračenje nekog tijela na temperaturi T može se prikazati preko zračenja idealno crnog tijela i faktora emisivnosti. Stefan Boltzmanov zakon opisuje ovisnost zračenja tijela o temperaturi T .

$$E_{ct} = \varepsilon \sigma T^4 \quad (3.1)$$

Gdje su :

E_{ct}	gustoća zračenja crnog tijela
ε	faktor emisivnosti površine
σ	Stefan Boltzmanova konstanta: $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ WK}^{-4}\text{m}^{-2}$
T	apsolutna temperatura crnog tijela.

Mnogo važnije svojstvo toplinskog zračenja jest njegova raspodjela ukupne energije zračenja po valnim duljinama odnosno *spektarlina gustoća zračenja*. Za idealno crno tijelo spektralna gustoća toplinskog zračenja određuje se primjenom Plankovog zakona zračenja:

$$\frac{dE}{d\lambda} = f_{cr} \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k T}\right) - 1} \quad (3.2)$$

gdje su

k	Boltzmanova konstanta $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$,
h	Plankova konstanta $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$,

λ valna duljina zračenja,
 c brzina svjetlosti.

Površina Sunca nije crno tijelo ali se u prvom približenju može zamisliti kao idealno crno tijelo. Mjerenjem sunčevog spektra došlo se do zaključka da sunčev spektar najviše nalikuje spektru zračenja crnog tijela pri temperaturi 5762 K te se ta temperatura uzima kao srednja temperatura površine sunca. Zračenje koje dopire do rubova zemljine atmosfere je kontinuirani spektar od valnih duljina 0.2 μm do 3 μm . U dodatku je prikazan sunčev spektar bez utjecaja atmosfere. Ovo zračenje se često naziva i ekstraterističko zračenje. Zbog zrakastog širenja sunčevog zračenja, s udaljenošću opada gustoća zračenja, tako da je srednja gustoća ekstraterističkog zračenja $1367 \pm 7 \text{ W/m}^2$. Obično se ova brojka naziva *solarnom konstantom*. S obzirom da se udaljenost Zemlje do Sunca mijenja tijekom godine, solarna konstanta varira $\pm 47 \text{ W/m}^2$. Sunce je najbliže Zemlji u siječnju a najdalje u lipnju pa je i solarna konstanta najveća zimi (1399 W/m^2) a najmanja ljeti (1307 W/m^2). Ekstraterističko ozračenje je sastavljeno od ultraljubičastog zračenja, vidljive svjetlosti i toplinskog odnosno infracrvenog zračenja. Druge valne duljine su zanemarive.

3.2 Geometrija prijenosa sunčeve energije

3.2.1 Kretanje Zemlje u odnosu na Sunce

Zemlja se vrti oko Sunca u eliptičnoj putanji frekvencijom 1/365,25 obrtaja na dan. Razumljivo je što kalendarska godina ima 365 ili 366 dana. Svake četiri godine uzima se korekcija od jednog dana (29. veljače). Međutim dogovorno se može uzeti u računima da godina traje 365 dana. Udaljenost Zemlje od Sunca mijenja se tijekom godine približno prema izrazu:

$$l = 1,5 \cdot 10^8 \left[1 + 0,017 \sin \left(\frac{365(n-93)}{365} \right) \right] \text{ km} \quad (3.3)$$

gdje je n redni broj dana u godini (1. siječanja $n=1$).

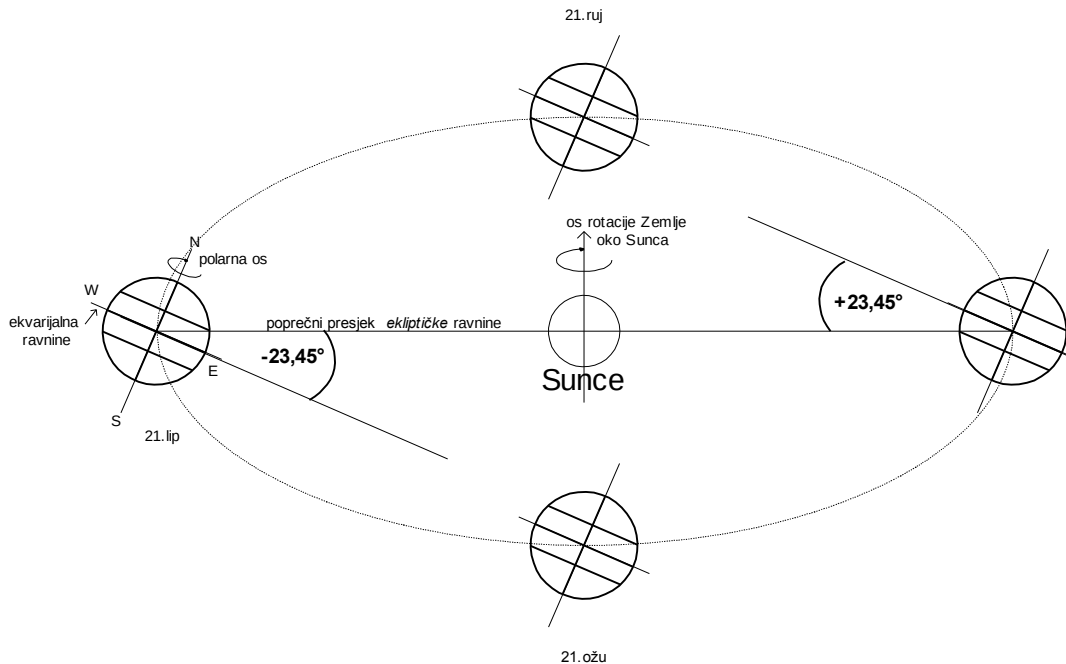
Pored vrtnje oko Sunca, zemlja se vrti i oko zamišljene ose koja se u kraćem vremenskom periodu uzima stalnom u odnosu na zvijezde stajačice. Os vrtnje Zemlje (polarna os) sječe ekliptičku ravninu u kojoj Zemlja kruži oko Sunca pod kutom od $23,45^\circ$. Ravnina koja okomito sječe polarnu os naziva se ekvatorijalna ravnina. Kao i polarna ravnina, ekvatorijalna ravnina je nepromjenljivog položaja prema nepomičnim zvijezdama. Kut između spojnice Zemlja-Sunce i ekvatorijalne ravnine naziva se *solarna deklinacija (nagib sunca)*. Zbog velike udaljenosti Zemlje od Sunca u odnosu na polumjer Sunca može se uzeti da zrake sunca upadaju paralelno na sunčanu stranu zemaljske kugle. Deklinacija se približno može odrediti iz izraza:

$$\delta = 23,45^\circ \sin \left(\frac{360(n-80)}{365} \right) \quad (3.4)$$

Na slici 3.1 shematski je prikazan odnos osi rotacije Zemlje oko Sunca i osi vlastite vrtnje.

3.2.2 Relativan položaj Sunca

Normalno je da se položaj Zemlje definira u odnosu na Sunce, međutim učinak sunčevog zračenja na određenu lokaciju na Zemlji lakše se razmatra uvođenjem prividnog gibanja Sunca oko zemlje odnosno uvođenjem *celestialne sfere*. Celestialna sfera je zamišljena kugla na kojoj su nebeska tijela predstavljeni točkama a Zemlja se nalazi u centru te sfere. Položaj Sunca se mijenja s vremenom, od izlaska do zalaska, tijekom cijele godine i obično je definiran s dva koordinatna sustava.



Slika 3.1 Uz objašnjenje deklinacije

U prvom slučaju položaj Sunca u odnosu na Zemlju definira se već spomenutom *deklinacijom* δ i *Sunčevim vremenom* ω . Drugi sustav je vezan za određenu lokaciju definiranu zemljopisnom širinom i dužinom. Točka na celestijalnoj sferi točno iznad određenog mjesta naziva se zenit. Kut između zenita i položaja sunca na sferi je zenitni kut. Komplementarni kut zenitnog kuta je *visina sunca* α . Kut između projekcije pravca prema Suncu i pravca jug naziva se *azimutnim kutom* ψ . Ova dva spomenuta kuta određuju vektor položaja Sunca $\vec{S}$. Na slici 3.2 shematski je objašnjeno značenje pojedinih kutova.

S obzirom na vrijeme razlikujemo zemaljsko i *sunčevo vrijeme*. Zemlja je podijeljena u vremenske zone. U svakoj zoni definira se isto vrijeme, dok je sunčevo vrijeme definirano za svaku lokaciju posebno. Ishodište sunčevog vremena je *sunčevo podne* tj, trenutak kada je sunce u najvišoj točki svoje prividne putanje. Sunčevo vrijeme se izražava u stupnjevima i u podne iznosi 0° . Sunčev dan traje 360° od -180° do $+180^\circ$ s tim da je prije podne vrijeme

negativno a poslije podne pozitivno. Veza između sunčevog vremena t_{sun} i zemaljskog vremena t_{mj} ovisi o mjestu na zemlji i dobu godine i može se izraziti sljedećim izrazom:

$$t_{sun} = t_{mj} + 4(Lst - Lmj) + E. \quad (3.5)$$

U izrazu (3.5) je Lst standardni meridijan za određenu zonu a Lmj lokalni meridijan. Izraz (3.5) se naziva jednadžbom vremena i detaljnije je opisana u dodatku. Obično se sunčevo vrijeme prikazuje lučnom mjerom.

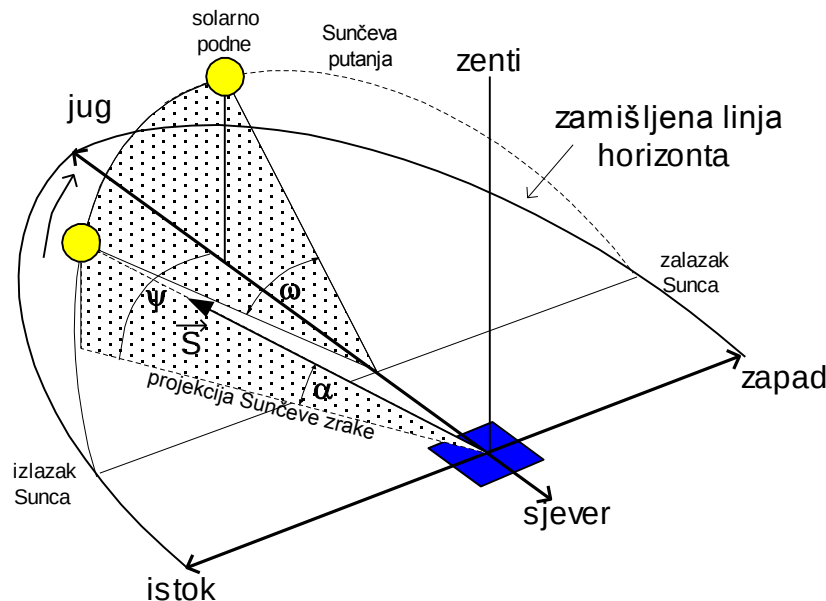
$$\omega = \frac{12 - t_{sun}}{15}. \quad (3.6)$$

Visina sunca se može izračunati prema:

$$\sin(\alpha) = \sin(\varphi)\sin(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)\cos(\omega). \quad (3.7)$$

Azimutni kut se definira kao kut između projekcije sunčeve zrake na horizontalnu plohu i smjera sjever-jug u horizontalnoj ravnini. Azimut sunca u podne je $\psi=0$ pozitivan prema istoku a negativan prema zapadu [lit. 2]. U nekim drugim literaturama sunčev azimut u podne ima vrijednost 180° i mjeri se od sjevera prema istoku. Dakle azimut koji odgovara pravcu istok je $+90^\circ$ a prema zapadu $+270^\circ$. Vrijednost azimutnog kuta se može izračunati, koristeći sljedeći izraz:

$$\cos(\psi) = \frac{\sin(\alpha)\sin(\varphi) - \sin(\delta)}{\cos(\alpha)\cos(\varphi)} = \frac{\sin(\delta)\sin(\varphi)\cos(\omega) - \sin(\delta)}{\cos(\alpha)}. \quad (3.8)$$



Slika 3.2 Uz objašnjenje relativnog položaja sunca

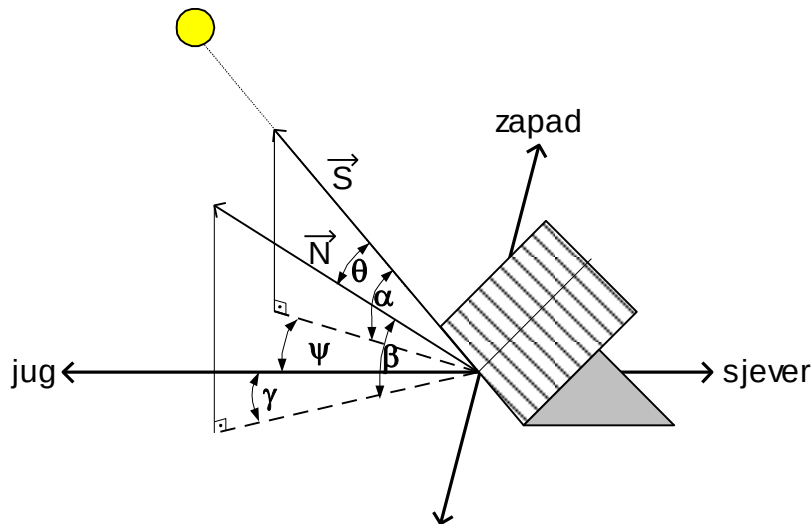
Dakle, relativni položaj Sunca je opisan parametrima:

δ	deklinacija,
φ	zemljopisna širina,
ω	sunčevo vrijeme,
α	visina sunca,
ψ	sunčev azimut.

U dodatku su prikazani izrazi za izračun karakterističnih podataka vezanih uz položaj sunca kao što je vrijeme izlaska Sunca, dužina dana, visina Sunca u podne...

3.2.3 Upadni kut na plohu

Visina sunca je zapravo kut pod kojim sunčeve zrake iz pravca Sunca upadaju na horizontalnu plohu. Fotonaponske ćelije se najčešće postavljaju na plohe nagnute prema Suncu. Za proračun upadne energije na nagnutu plohu najvažniji podatak je upadni kut direktnog sunčevog zračenja. Ravna nagnuta ploha orijentira se vektorom okomice na plohu $\vec{N}$. Pravac vektora plohe je određen *nagibom plohe* β i *azimutnim kutom plohe* γ . Slično kao o kod definiranja sunčevog azimuta, azimut plohe je kut između projekcije vektora okomice plohe i pravca jug. Na slici su prikazane orijentacije plohe i upadni kut..



Slika 3.3 Uz objašnjenje upadnog kuta na nagnutu plohu

Jedinični vektori $\vec{S}$ i $\vec{N}$ se mogu izraziti preko kutova kojim su definirani u koordinatnom sustavu jug-istok-zenit. Skalarni produkt ovih vektora daje vrijednost kosinusa kuta između njih. Upravo taj kut je upadni kut na nagnutu plohu. Bez ulaženja u izvod vrijedi:

$$\cos(\theta) = \cos(\beta)\sin(\alpha) + \cos(\alpha)\sin(\beta)\cos(\psi - \gamma), \quad (3.9)$$

pri čemu je

β	kut nagiba plohe prema horizontalnoj ravnini,
γ	azimut plohe,
α	visina sunca (3.7),
ψ	azimut položaja sunca (3.8),
θ	kut upada sunčevih zraka na plohu.

Izraz (3.9) predstavlja upadni kut na plohu fotonaponskog modula postavljenog čvrsto na lokaciji definiranoj nagibom, azimutom i zemljopisnom širinom. Nije rijedak slučaj da se kod velikih sustava ploha fotonaponskog modula zakreće prema Suncu radi povećanja dozračene energije. Ovdje neće biti riječi o tehnikama praćenja položaja Sunca nego o posljedicama primijenjene tehnike.

Dvoosno praćenje sunca

Ovo je slučaj kada ploha prati sunce po azimutu i po visini. Tada je kut upada sunčevih zraka jednak 0 odnosno upadne zrake su konstantno okomite na plohu.

$$\begin{aligned} \theta &= 0 \\ \beta &= 90 - \alpha \\ \gamma &= \psi \end{aligned} \quad (3.10)$$

Dvoosno praćenje zahtjeva složenu opremu za proračun kuta i za detekciju sunčevog zračenja. Stoga se češće koristi jednoosno praćenje konstantnom brzinom vrtnje. Brzine rotacije ovise o položaju osi rotacija. U dodatku dano je par primjera mogućeg dvoosnog praćenja Sunca.

Jednoosno praćenje Sunca

Primjena jednoosnog praćenja je inspirirana prvenstveno željom za pojednostavljivanjem sustava. Postoji više načina jednoosne rotacije. Nekoliko primjera jednoosnog praćenja Sunca dano je u dodatku. Zajedničko za sva praćenja jest da se projekcije vektora položaja Sunca i okomice plohe na plohu okomito od osi rotacije poklapaju. (vidi dodatak). Posebnu pažnju imaju mogućnosti jednolične rotacije jer nije potreban regulacijski sustav.

3.3 Izvanatmosfersko i prizemno Sunčevo zračenje

Gustoća energetskega toka odnosno snaga Sunčevog zračenja naziva se *ozračenje* (E) a ukupna vrijednost dozačene energije naziva se *ozračenost* (H). Zbog tehničkih razloga češće se mjeri i dokumentira vrijednost dnevne ozračenosti. Kod statističkih analiza, vrijednost ozračenosti se normira tzv. izvanatmosferskom ozračenosti (sl. prijevod od *extraterrestrial irradiation*!). To je vrijednost ozračenja koje bi se izmjerilo na horizontalnoj plohi na razini mora kada ne bi bilo utjecaja atmosfere. Uzimajući u obzir promjene udaljenosti Zemlje od Sunca, dnevna vrijednost izvanatmosferskog zračenja može se procijeniti temeljem izraza:

$$H_0 = \frac{864000}{\pi} \bar{E}_0 \left(1 + 0,033 \cos\left(\frac{360}{365} n\right) \right) \left(\frac{\pi}{180} \omega_s \sin(\delta) \sin(\varphi) + \cos(\delta) \cos(\varphi) \sin(\omega_s) \right) \quad (3.11)$$

gdje je $\bar{E}_0$ solarna konstanta 1367 W/m²
 n redni broj dana u godini
 ω_s sunčevo vrijeme izlaska sunca izraženo u [°]

Brojna ispitivanja eksperimentalnih mjerenja pokazala su da se bolje koreliranje dobiva razmatra li se odnos mjesečnih prosjeka nego dnevne vrijednosti ozračenosti. S tim uvezi lako se može izračunati mjesečni prosjek dnevne izvanatmosferske ozračenosti zbrajanjem dnevnih vrijednosti i dijeljenjem s brojem dana u mjesecu.

3.3.1 Apsorpcija zračenja prolaskom kroz atmosferu

Prije ulaska u atmosferu spektar sunčevog zračenja proteže se od 0.12 μm do 10 μm. Prolaskom kroz atmosferu sunčevo zračenje mijenja jačinu i oblik spektra. Spektar zračenja koji dopijeva da zemljine površine proteže se od 0.3 μm do 3 μm s uočljivim “prazninama u spektru”. Promjena spektra kao i ukupno slabljenje uzrokovano je sljedećim procesima:

- raspršenje na molekulama mnogo manjim od valnih duljina svjetlosti- Rayleigh-ovo raspršenje
- Selektivna apsorpcija u plinovima koji čine atmosferu a poglavito na O₃, O₂, H₂O, CO₂;
- raspršenje na krutim česticama u zraku (aerosoli) –prašina, dim,
- raspršenje i apsorpcija na oblacima.

U procesu selektivne apsorpcije, određene molekule npr. ozon, apsorbiraju samo određene valne duljine svjetlosti. Tako ozon gotovo potpuno apsorbira ultraljubičasti dio svjetlosti. Isto tako ozon je jedini plin koji apsorbira svjetlost u vidljivom spektru. Vidljivo svjetlo je prigušeno uglavnom zbog raspršenja na aerosolima. U infracrvenom području najvažniji mehanizam prigušenja je apsorpcija u vodenoj pari H₂O i ugljičnom dioksidu CO₂. Prigušenje se analitički može aproksimirati procesom selektivne apsorpcije

elektromagnetskog zračenja u plinovima. Proces je opisan Lambert-Beer-Bougerovim zakonom za monokromatsko zračenje [lit. 22]:

$$E_{\lambda}(s) = E_{\lambda}(0) \exp \left[-\alpha_{\lambda} \int_{x=0}^s \rho dx \right], \quad (3.12)$$

gdje je:

- $E_{\lambda}(s)$ jakost elektromagnetskog zračenja na dubini x u sloj plina
- $E_{\lambda}(0)$ jakost elektromagnetskog zračenja pri ulasku u sloj plina
- α_{λ} maseni koeficijent apsorpcije pri određenoj valnoj duljini λ
- ρ gustoća plina
- s debljina sloja plina.

U dodatku je definiran pojam optičke mase zraka i njegova veza s integralom u izrazu (3.12). Shodno definiciji optičke mase zraka, prigušenje monokromatskog zračenja preko cijelog frekvencijskog pojasa može se zapisati kao:

$$E_{\lambda}(s) = E_{\lambda}(0) k(\lambda) \exp[-c_{\lambda} m]. \quad (3.13)$$

Spektralno zavisani koeficijent c_{λ} opisuje tri procesa: *Rayleighovo raspršenje, prigušenje ozonom u području ultraljubičastog i vidljivog spektra i raspršenje na aerosolima* (magla). Koeficijent $k(\lambda)$ opisuje proces selektivne apsorpcije svjetlosti u više atomnim molekulama (vodena para i ugljični dioksid). Napravljena su brojna istraživanja s ciljem određivanja empirijskog izraza za $k(\lambda)$ i c_{λ} i rezultati su uglavnom prikazani u tabelama [lit.18].

Stanje atmosfere i njen utjecaj na prigušenje svjetlosti je izrazito kompleksan i nedefiniran problem. Za potpuno čisto nebo bez oblaka koji prekrivaju sunčev disk (boja neba je svjetlo plava) moguće je procijeniti prizemno direktno ozračenje okomit na upadni smjer na temelju Hottelove jednadžbe [lit.22]:

$$E_b = E_0 \left[a_0 + a_1 \exp \left(-\frac{k}{\sin(\alpha)} \right) \right]. \quad (3.14)$$

Pri tome su koeficijenti općenito zadani kao:

$$a_0 = a_0^* r_0, \quad a_1 = a_1^* r_1, \quad k = k^* r_k. \quad (3.15)$$

Faktori r_0 , r_1 , r_k , predstavljaju korekcijske faktore za različite tipove klime prema [lit. 21]; vrijednosti korekcijskih parametara prikazani su tablicom:

Tablica 3.1 Korekcijski faktori

klimatski tip	r_0		r_1	r_k
vidljivost	23 km	5 km		
tropska klima	0,95	0,92	0,98	1,02
srednjo-pojasa ljeta	0,97	0,96	0,99	1,02
subartička ljeta	0,99	0,98	0,99	1,01
srednjo-pojasne zime	1,03	1,04	1,01	1,00

Ozračenje pri potpuno čistom nebu razmatra se za dva slučaja s obzirom na vidljivost

Za vidljivost od 23 km koeficijenti a_0^* , a_1^* , k^* , su :

$$\begin{aligned} a_0^* &= (0,4237 - 0,00821(6 - NV)^2) \\ a_1^* &= (0,5055 + 0,00595(6,5 - NV)^2), \\ k^* &= (0,2711 + 0,01858(2,5 - NV)^2) \end{aligned} \quad (3.16)$$

Gdje je NV nadmorska visina izražena u km . Za vidljivost čiste atmosfere od 5 km koeficijenti su:

$$\begin{aligned} a_0^* &= (0,2538 - 0,0063(6 - NV)^2) \\ a_1^* &= (0,7678 + 0,0010(6,5 - NV)^2). \\ k^* &= (0,249 + 0,081(6,5 - NV)^2) \end{aligned} \quad (3.17)$$

3.3.2 Difuzno ozračenje

Difuzno zračenje nastaje raspršenjem. Najveći dio raspršenog zračenja dolazi iz područja vidljive svjetlosti. Raspršeno i difuzno zračenje je izvor tzv. dnevne svjetlosti kada nema Sunca na obzoru. Analitički model difuznog zračenja je kompliciran. Difuzno zračenje dolazi iz svih smjerova stoga se ono u aproksimaciji izotropnog modela opisuje angularnom funkcijom raspodjele ozračjenja:

$$D(\theta_z, \gamma) = \frac{dE_d}{d\Omega} \frac{1}{\cos(\theta_z)}. \quad (3.18)$$

Pri čemu je $d\Omega$ diferencijal prostornog kuta :

$$d\Omega = \sin(\theta_z) d\gamma d\theta_z. \quad (3.19)$$

Kut γ je azimutni kut, θ_z je zenitni kut a E_d difuzno ozračenje horizontalne plohe. Shodno definiciji, difuzno ozračenje na ravnoj plohi je:

$$E_d = \int_0^{2\pi} d\gamma \int_0^{\pi/2} D(\theta_z, \gamma) \sin(\theta_z) \cos(\theta_z) d\theta_z. \quad (3.20)$$

Ovaj pristup predstavljanja difuznog ozračjenja dolazi do izražaja kod nagnutih ploha. Pri tom postoje različiti modeli funkcije raspodjela difuznog ozračjenja. Najjednostavniji model je izotropna raspodjela gdje je uzeto da je raspršenje po atmosferi neovisno o položaju Sunca i jednoliko iz svih smjerova. Ma kako ovo bila nerealna pretpostavka često je korištena u

proračunima. U realnim situacijama kutna raspodjela difuznog zračenja Ovisi o položaju oblaka na nebu i o položaju Sunca. Može se uočiti da je nebo svjetlije u blizini položaja Sunca, kao i da je nebo nešto svjetlije na horizontu. Ovaj model je *anizotropni model* difuznog ozračenja. Za potpuno čisto nebo, za slučaj kada nema stohastičke raspodjele oblaka, na temelju Liu Jordanove korelacije može se difuzno zračenje ravne plohe procijeniti iz direktnog ozračenja¹

Nizom istraživanja razvijeni su empirijske korelacije kojim je određeno difuzno ozračenje na temelju direktnog ozračenja [lit.21]:

$$E_d = [0,2710E_0 - 0,2939E_b] \sin(\alpha) . \quad (3.21)$$

3.3.3 Mjerenje Sunčevog ozračenja i procjena komponenti ozračenja

U sklopu meteoroloških mjerenja mjeri se i Sunčevo ozračenje; to je grana meteorologije, tzv. *aktinometrija*. Najjednostavnija kao i najstarija su mjerenja trajanja sunčevog sijanja kao i relativna oblačnost². Uređaj za mjerenje trajanja sunčevog sijanja nazivaju se *heliometri*. Puno rjeđa su direktna mjerenja ozračenja horizontalne plohe pomoću *piranometra*. Piranometri su mjerni uređaji koji mjere ukupno ozračenje koje padne na aktivnu plohu. Princip rada se temelji na radu velikog broja termoparova. Uređaj reagira gotovo potpuno na sve valne dužine. Za razliku od termičkog piranometra koriste i silikonski piranometar. Ovaj piranometar radi na principu fotoelektričnog efekta.

Kao što je objašnjeno u prošlom poglavlju ukupno ozračenje koje upada na horizontalnu plohu čini direktno i difuzno ozračenje. Za razliku od mjerenja ukupnog ozračenja, difuzno i direktno ozračenje se mjeri rijeđe. Razlog je uglavnom složenost mjernih uređaja, velika cijena i ne baš osobita preciznost.

U nedostatku mjerenih vrijednosti ukupnog, difuznog i direktnog ozračenja koriste se empirijske korelacije za procjenu komponenti zračenja iz dostupnih podataka.

Za procjenu ukupnog ozračenja na temelju trajanja sijanja Sunca koristi se poznata Pageova formula:

$$\bar{H} = \bar{H}_0 \left(a + b \frac{\bar{S}}{\bar{S}_0} \right), \quad (3.22)$$

gdje su

$\bar{H}$	srednja dnevna ozračenost ravne plohe ukupnim ozračenjem,
$\bar{H}_0$	srednja dnevna izvanatmosferska ozračenost ravne plohe ukupnim ozračenjem,
$\bar{S}$	Srednja vrijednost dnevne insolacije (broj sati sijanja sunca),
$\bar{S}_0$	Srednja vrijednost dužine dana (max. vrijednost sijanja sunca) ³ ,

¹ To je ozračenje na plohu okomitu na smjer direktnih zraka

² Relativna oblačnost je udio naoblačenog dijela neba u cjelokupnoj površini neba

³ Vidi dodatak

a i b koeficijenti Pageove formule.

Koeficijenti Pageove formule ovise o lokaciji kao i o godišnjem dobu. Važno je napomenuti da se srednje vrijednosti odnose na periode ne kraće od mjesec dana. Drugi autori su također radili na ovoj korelaciji (Duffie i Beckman) ali će se u ovom radu isključivo koristiti izraz (3.22). Za Zagreb koeficijenti Pageove formule su: $a=0,2$ i $b=0,59$ dok su za Split $a=0,24$, $b=0,51$ [lit. 3]. Ove vrijednosti su godišnji prosjeci. Međutim preciznija analiza bi se provela uz mjesečne vrijednosti koeficijenata a i b . Stoga se ponekad kao mjerni podaci mogu naći mjesečne vrijednosti koeficijenata a i b iz Pageove formula. Omjer ukupne ozračenosti i izvanatmosferske ozračenosti naziva se *indeks prozračnosti* i označava s K_T :

$$K_T = \frac{H}{H_0}. \quad (3.23)$$

U analizi rada solarnih sustava jako važnu ulogu igra difuzno zračenje. Vremenom je razvijeno više korelacija između difuznog i ukupnog ozračenosti H_d/H . Neke najvažnije od njih razvili su Liu i Jordan. Pored korelacija kojima se procjenjuje odnos ozračenosti postoje i iste za odnos između difuznog i ukupnog ozračenja E_d/E . Sve korelacije se mogu razvrstati u četiri kategorije:

1. Korelacija između dnevne ukupne ozračenosti H i dnevne difuzne komponente H_d .
2. Korelacija između srednje dnevne ukupne ozračenosti $\bar{H}$ i srednje dnevne difuzne ozračenosti ravne plohe $\bar{H}_d$ (mjesečni prosjek).
3. Korelacija između satne vrijednosti ukupne ozračenosti H_s i satne vrijednosti difuzne komponente H_{sd} .
4. Korelacija između srednje satne ukupne ozračenosti $\bar{H}$ i srednje satne difuzne ozračenosti ravne plohe $\bar{H}_d$ (mjesečni prosjek).

Korelacija između dnevnih ozračenosti difuznog i ukupnog zračenja ravne plohe dana je izrazom koji su razvili Collares-Pereira i Rabl [lit. 23]:

$$\begin{aligned} K_D &= 0,99 & \text{za } K_T &\leq 0,17 \\ K_D &= 1,188 - 2,272K_T + 9,473K_T^2 - 21,856K_T^3 + 14,648K_T^4 & \text{za } 0,17 \leq K_T &\leq 0,8, \\ K_D &= 0,2 & \text{za } K_T &\geq 0,8 \end{aligned} \quad (3.24)$$

gdje je $K_D = \frac{H_d}{H}$.

Za dugoročnije analize razmatraju se mjesečni prosjeci. Liu i Jordan razvili su polinomnu korelaciju četvrtog stupnja između $\bar{K}_D$ i $\bar{K}_T$. Međutim za naše krajeve se pokazalo da je jednostavna Pageova formula točnija [lit. 3], te će takva ovdje biti prikazana:

$$\bar{K}_D = A - B\bar{K}_T \quad (3.25)$$

Originalni koeficijenti gornje Pageove formule su $A=1$ i $B=1,096$, međutim kao i drugi autori Penzar je za naše krajeve proračunao koeficijente $A=1,05$ i $B=1,125$. Intuitivno bi se moglo zaključiti da se i ovi koeficijenti mijenjaju kroz godinu te da valja imati mjesečne vrijednosti. Često se zbog toga u meteorološkim analizama daju prosječne vrijednosti $\bar{K}_D$ za svaki mjesec.

3.4 Ozračenje i ozračenost na nagnutu plohu

3.4.1 Ozračenje kose plohe

Ako se ravna plohe nagne prema Suncu, dozračena energija raste, stoga je razumljivo da su realni fotonaponski moduli nagnuti u odnosu na horizontalnu ravninu. Ozračenje kose plohe uz direktnu i difuznu komponentu zračenja sadrži i reflektirano zračenje.

Direktno zračenje nagnute plohe dano je izrazom:

$$E_{b\beta} = \frac{E_b}{\sin(\alpha)} \max(0, \cos(\theta)), \quad (3.26)$$

pri čemu je kut θ kut između okomice na plohu i upadne zrake Sunca a kut α je kut pod kojim Sunčeve zrake upadaju na vodoravnu plohu. $\cos(\theta)$ dan je izrazom (3.9).

Difuzno zračenje se računa prema izrazu (3.20) promjenom granica integracije. Izotropni model difuznog ozračenja (najčešće izotropan model u većoj ili manjoj mjeri ne opisuje vjerno situaciju) difuzno ozračenje nagnute plohe računa iz difuznog ozračenja horizontalne plohe prema izrazu:

$$E_{d\beta} = E_d \frac{1 + \cos(\beta)}{2}. \quad (3.27)$$

Točniji izraz, koji uzima u obzir anizotropni model difuznog ozračenja je [lit. 23]:

$$E_{d\beta} = E_d \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \left[1 + K_1 \sin^3\left(\frac{\beta}{2}\right) \right] (1 + K_1 \cos^2(\theta) \cos^3(\alpha)), \quad (3.28)$$

gdje je parametar K_1 tzv. modulirajući parametar dan izrazom:

$$K_1 = 1 - \left(\frac{E_d}{E} \right)^2. \quad (3.29)$$

Prema ovom modelu difuzno zračenje se sastoji od tri dijela: pozadinskog zračenja cijele hemisfere, zračenja sunčeve aureole i zračenja horizonta.

Kada je ploha nagnuta prema horizontali ona “vidi” jedan dio tla oko sebe. Poznato je da se dio zračenja koji upada na ravnu plohu reflektira natrag. Koliko će se zračenja

reflektirati ovisi prvenstveno o vrsti tla (vegetacija, snijeg, beton, pijesak, more.). Ne ulazeći u detaljne analize pretpostavlja se da koeficijent refleksije tla ne ovisi o kut upada, dakle:

$$E_r = \rho_{tlo} E, \quad (3.30)$$

gdje je

- E_r zračenje koje se reflektira od tla
- E ukupno zračenje koje upada na horizontalnu plohu (na tlo)
- ρ_{tlo} koeficijent refleksivnosti.

Tako dio tog reflektiranog zračenja ponovo upada na plohu kolektora. Utjecaj reflektiranog zračenja manji je od 10 % pa je razumljivo što se taj efekt nije dovoljno proučavao. Slično kao i kod difuznog zračenja pretpostavlja se izotropni model angularne gustoće reflektiranog zračenja. U tom slučaju reflektirano zračenje kose plohe iznosi:

$$E_{r\beta} = E_r \frac{1 - \cos(\beta)}{2} = (E_b + E_d) \rho_{tlo} \frac{1 - \cos(\beta)}{2}. \quad (3.31)$$

Srednje vrijednosti refleksivnost tla ili albedo za neke vrste tla dani su u tablici:

Tablica 3.2 Albedo za pojedine vrste tla

pustinja	zeleno polje	oranice	jezera i oceani	svježi suhi snijeg	morski led
0,15-0,3	0,03-0,22	0,04-0,12	0,02-0,18	0,8-0,9	0,3-0,4

Na temelju prethodnih izraza može se napisati izraz za ozračenje kose plohe uz primjenu anizotropnog modela difuznog ozračenja:

$$E_\beta = E_b \frac{\cos(\theta)}{\sin(\alpha)} + E_d \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \left[1 + K_1 \sin^3\left(\frac{\beta}{2}\right) \right] \left(1 + K_1 \cos^2(\theta) \cos^3(\alpha) \right) + (E_b + E_d) \rho_{tlo} \frac{1 - \cos(\beta)}{2}, \quad (3.32)$$

odnosno u okviru jednostavnijeg izotropnog modela:

$$E_\beta = E_b \frac{\cos(\theta)}{\sin(\alpha)} + E_d \frac{1 + \cos(\beta)}{2} + (E_b + E_d) \rho_{tlo} \frac{1 - \cos(\beta)}{2}. \quad (3.33)$$

3.4.2 Ozračenost kose plohe

Kod proračuna fotonaponskih sustava rijetko se raspolaže trenutnim vrijednostima ozračenja. Meteorološke postaje mjere i ažuriraju dnevne odnosno srednje dnevne vrijednosti ukupnog i difuznog zračenja. Za slučaj nagnute plohe, dnevna vrijednost odnosno srednja dnevna vrijednost ozračenja dobiva se integriranjem izraza(3.32) preko cijelog dana. S obzirom da su raspoloživa meteorološka mjerenja prosječne vrijednosti za neki određen period, praktično je izračunati srednju dnevnu vrijednost ozračenja nagnute plohe. Obično su to mjesečni prosjeci.

Pretpostavljajući *izotropni model* difuznog zračenja, dobiva se:

$$\bar{H}_\beta = \frac{1}{brdan} \sum_{dan=1}^{brdan} \left\{ \int_{dan} \left[(E - E_d) \frac{\cos(\theta)}{\sin(\alpha)} \right] + \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \int_{dan} E_d + \rho \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \int_{dan} E \right\}, \quad (3.34)$$

odnosno:

$$\bar{H}_\beta = \frac{1}{br.dana} \sum_{mjesec} \left\{ \int_{dan} \left[(E - E_d) \frac{\cos(\theta)}{\sin(\alpha)} \right] \right\} + \bar{H}_d \frac{1 + \cos(\beta)}{2} + \bar{H} \rho \frac{1 - \cos(\beta)}{2}, \quad (3.35)$$

gdje je:

$Brdan$ broj dana u mjesecu koji se razmatra,
 Dan varijabla za prebrojavanje dana u mjesecu.

Prvi član u izrazu predstavlja mjesečni prosjek dnevne ozračenosti plohe direktnom komponentom ozračenja odnosno ozračenost. Taj izraz se često piše u obliku [lit. 24]:

$$\bar{H}_{b\beta} = \bar{R}_b \bar{H}_b. \quad (3.36)$$

Koeficijent $\bar{R}_b$ je složena funkcija i ovisi o stanju atmosfere. U prvom približenju $\bar{R}_b$ se može zamijeniti omjerom izvanatmosferskih ozračenosti nagnute i horizontalne plohe [lit. 24]:

$$\bar{R}_b \cong \frac{\bar{H}_{0\beta}}{\bar{H}_0} = \frac{1}{brdan} \sum_{dan=1}^{brdan} \frac{\int_{dan} E_0 \cos(\theta)}{\int_{dan} E_0 \sin(\alpha)}. \quad (3.37)$$

gdje je $brdan$ broj dana u mjesecu u kojemu se traži prosječna veličina. U dodatku je dan cjelovit izraz za $\bar{R}_b$ ako se u obzir uzme proizvoljna orijentacija panela.

Konačan izraz za mjesečni prosjek srednje dnevne ozračenosti kose plohe glasi:

$$\bar{H}_\beta = (\bar{H} - \bar{H}_d) \bar{R}_b + \bar{H}_d \frac{1 + \cos(\beta)}{2} + \bar{H} \rho \frac{1 - \cos(\beta)}{2}. \quad (3.38)$$

3.5 Model klime

Model klime daje vrijednost ozračenja na ravnu plohu, temperaturu te brzinu i smjer vjetra za određenu lokaciju u određeno vrijeme. U slučaju idealno izotropne atmosfere, ozračenje se može predvidjeti analitičkim izrazom kao funkcija vremena i prostora izrazi (3.14) do (3.17) i (3.21). Ozračenje kose plohe se računa na temelju ozračenja horizontalne plohe na temelju izraza (3.32).

Realne vrijednosti ozračenja ovise o stanju atmosfere (sadržaj pojedinih plinova), tlaku, temperaturi i o niz nedefiniranih faktora koji ovise o specifičnim karakteristikama mjesta. S obzirom na veliki broj slabo predvidljivih utjecaja na stanje atmosfere, gotovo je nemoguće točno izračunati realno ozračenje određene plohe. Prema tome može se reći da je klima, gledano u kraćem periodu jedan stohastički proces. Dakle fizikalne veličine kojima se opisuje sunčeva aktivnost (insolacija, ozračenje ...) su zapravo *slučajne varijable*. Usrednjavanjem izmjerenih satnih, dnevnih ili mjesečnih podataka dobivaju se prosječne vrijednosti koje samo okvirno predstavljaju stanje klime na određenom području. Na temelju tih podataka mogu se napraviti proračuni sustava, međutim postavlja se pitanje pouzdanosti izračuna. Odnosno, s koliko vjerojatnosti se može tvrditi da će tako definiran sustav zadovoljiti uvijete rada. Jer, ako je sustav dimenzioniran prema prosječnim vrijednostima ozračenosti, onda će on biti potpuno pouzdan samo onda kada trenutne vrijednosti ozračenja budu jednake prosjeku. Međutim ništa se ne može reći o pouzdanosti sustava u slučaju znatnog odstupanja ozračenosti od prosjeka.

S druge strane, ovisno o razini pouzdanosti, potrebno je procijeniti rad fotonaponskog sustava. Ovakvi proračuni se obavezno temelje na mjerenim vrijednostima. Razumljivo je da se proračunski algoritmi prilagođavaju vrsti i opsegu dostupnih mjerenja. Tako na primjer u za neke lokacije dostupna su mjerenja insolacije i to kao dnevne ili srednje dnevne vrijednosti za cijeli mjesec. Neke meteorološke postaje imaju mogućnost izravnog mjerenja ukupnog ozračenje kao i difuzne komponente. U simulacijskom algoritmu koji će biti primjenjen radu, model klime se temelji na dnevnim vrijednostima insolacija kroz 17 godina, od 1981 do 1997.

Kao što je rečeno, klima je stohastički proces gdje se slučajne varijable biraju sukladno potrebama. Primjeri nekih stohastičkih modela ukratko će biti predstavljeni u sljedećim poglavljima. U posljednjem poglavlju opisan je detaljno *empirijski stohastički model klime* (ESMK). Prvo je objašnjen model koji generira dnevne vrijednosti relativne osunčanosti za svaki dan, zatim način izračuna ukupne i difuzne komponente dnevne ozračenosti ravne plohe. Na posljetku je prikazan model koji na temelju dnevne ozračenosti računa satne ozračenosti odnosno srednja satna ozračenja.

3.5.1 Frekvencijska raspodjela ozračenja, Liu – Jordanov model

Imajući u vidu da je klima stohastički proces, analizom mjerenja se može uvidjeti da rasipanje karakterističnih veličina (ozračenost, insolacija...) zadovoljava određenu statističku raspodjelu. Intuitivno se može zaključiti da raspodjele ovise o lokalnim klimatološkim svojstvima kao i o dobu godine. Tako npr. vjerojatnost potpuno sunčanog dana veća je u srpnju nego u siječnju itd. Liu i Jordan [lit.21] su uzeli *indeks prozračnosti* kao slučajnu varijablu i pretpostavili su univerzalnu funkciju distribucije. Tako npr. za kumulativnu frekvencijsku raspodjelu odnosno funkciju distribucije slučajne varijable vrijedi:

$$F(K_T) = \frac{\exp(cK_{T,\min}) - \exp(cK_T)}{\exp(cK_{T,\min}) - \exp(cK_{T,\max})}, \quad (3.39)$$

pri čemu su:

$K_{T,\min}$ minimalna vrijednost indeksa prozračnosti,
 $K_{T,\max}$ maksimalna vrijednost indeksa prozračnosti.

Faktor c u izrazu (3.39) određuje se na temelju poznate srednje vrijednosti indeksa prozračnosti koja se dobiva mjerenjem i usrednjavanjem za određeni period korištenjem formule za izračun matematičkog očekivanja stohastičkog procesa. Fizikalno značenje očekivane vrijednosti stohastičkog procesa o kojemu je ovdje riječ je srednja vrijednost indeksa prozračnosti:

$$\bar{K}_T = \int_{K_{T,\min}}^{K_{T,\max}} K_T dF(K_T) = \int_{K_{T,\min}}^{K_{T,\max}} K_T f(K_T) dK_T. \quad (3.40)$$

Funkcija $f(K_T)$, u izrazu (3.40), naziva i funkcijom gustoće vjerojatnosti koja ima fizikalno značenje vjerojatnosti da će indeks prozračnosti poprimiti vrijednosti iz intervala $(K_T, K_T + dK_T)$.

Funkcija raspodjele neke slučajne varijable u stohastičkom procesu ima značenje vjerojatnosti da će slučajna varijabla imati vrijednost manju ili jednaku od argumenta funkcije. Matematički se to piše kao:

$$F_{K_T} : [K_{T,\min}, K_{T,\max}] \rightarrow [0,1] \quad F_{K_T}(x) = P(K_T \leq x). \quad (3.41)$$

Vremenska zavisnost slučajne varijable K_T u ovom slučaju je određena periodom usrednjavanja. Tako na primjer za niz od 50 godina može tražiti raspodjela za svaki dan u godini posebno. U tom slučaju koeficijent c iz izraza (3.39) je diskretna funkcija po danima u godini $c: [1, 365] \rightarrow \mathcal{R}$. Međutim obično nije dostupan tako veliki niz mjerenja. S druge strane prosječna veličina nekog niza je nepouzdana za mali broj podataka u nizu. U slučaju klime, može se govoriti o mjesečnim funkcijama distribucije slučajne varijable indeksa prozračnosti. Tada se $\bar{K}_T$, $K_{T,\min}$, $K_{T,\max}$ odnose za određeni mjesec.

Ovaj model klime je demonstriran na primjeru otoka Lastova, na temelju podataka preuzetih od DHMZ-a koji se za ovu prigodu odnose se na period od 1981 do 1997. Podaci se odnose na trajanje sijanje Sunca za svaki dan. Iz toga se može izračunati relativna osunčanost K_S kao omjer sunčanih sati i duljine sunčevog dana. Pored ovih podataka, iz istog

izvora korišteni su podaci o koeficijentima Pageove formule za svaki mjesec u godini. Važno je napomenuti da izraz (3.22) korelira srednju vrijednost indeksa prozračnosti s relativnom osunčanosti.

$$\bar{K}_T = a + b * \bar{K}_S. \quad (3.42)$$

Za dnevne vrijednosti K_T , gornji izraz zadovoljava pri vrijednostima K_S što bližim srednjoj dnevnoj vrijednosti. Npr. za slučaj potpune naoblake, tj. kada je $K_S=0$, indeks prozračnosti ovisi o vrsti oblaka, relativnoj vlažnosti i kreće se u određenom intervalu. $K_{T,min}$ je najmanja vrijednost indeksa prozračnosti. Prema [lit. 21] za slučaj teške naoblake ovaj parametar ima vrijednost 0,05. S druge strane najveća vrijednost indeksa prozračnosti se može procijeniti na temelju izraza (3.42) uz $K_S=1$. Uzimajući ove naputke u obzir, u tablici 3.3 dani su parametri Liu Jordanove raspodjele za otok Lastovo:

Tablica 3.3 Parametri Liu-Jordanove frekvencijske raspodjela indeksa prozračnosti

mjesec	$K_{T,min}$	$K_{T,max}$	$\bar{K}_T$	c
Siječanj	0,05	0,8070	0,4912	1,33
Veljača	0,05	0,8028	0,5122	1,876
Ožujak	0,05	0,8077	0,5328	2,2775
Travanj	0,05	0,8308	0,5514	2,3
Svibanj	0,05	0,7535	0,5730	4,92
Lipanj	0,05	0,7220	0,6153	9,2197
Srpanj	0,05	0,7369	0,6390	10,154
Kolovoz	0,05	0,7341	0,6314	9,65
Rujan	0,05	0,7516	0,5876	5,622
Listopad	0,05	0,7813	0,5243	2,5785
Studen	0,05	0,8252	0,4925	1,1
Prosinac	0,05	0,7968	0,4623	0,84

Jednom definirana funkcija distribucije može se na jednostavan način koristiti za simuliranje vrijednosti relativnog ozračenja. Većina matematičkih računalnih aplikacija imaju mogućnost generiranja slučajne varijable s unaprijed zadanom funkcijom distribucije. Cilj modela je naći funkciju tako generirane slučajne varijable koja daje najvjerojatniju vrijednost indeksa prozračnosti. Najjednostavniji generator slučajne varijable je *uniformno distribuirana* slučajna varijabla U na intervalu $[0, 1]$. Funkcija distribucije uniformne slučajne varijable na intervalu $[0, 1]$ je:

$$F_U(x) = x, \quad \text{odnosno,} \quad f_U = 1. \quad (3.43)$$

Treba dakle naći funkciju $R: [0,1] \rightarrow [0,1]$ sa svojstvom:

$$K_T = R(U), \quad (3.44)$$

pri čemu je:

K_T indeks prozračnosti,
 U uniformno distribuirana slučajna varijabla.

Funkcija distribucije funkcije neke poznate slučajne varijable može se odrediti na temelju sljedećeg izraza [lit. 25]:

$$F_{K_T}(X) = R^{-1}(X) = U, \quad (3.45)$$

odnosno:

$$R(U) = F_{K_T}^{-1}(U). \quad (3.46)$$

Uspoređujući izraz (3.46) s izrazom (3.44) dolazi se do vrlo važnog zaključka:

$$K_T = F_K^{-1}(U). \quad (3.47)$$

Dakle generator najvjerojatnije vrijednosti relativnog osunčanja je inverzna funkcija distribucije te iste slučajne varijable. Argument te funkcije je jedinična, uniformno distribuirana slučajna varijabla koju može generirati svako računalo. Dakle sukladno izrazu (3.39) dobiva se:

$$K_T = \frac{\ln(A - B \cdot U)}{c}, \quad (3.48)$$

pri čemu je:

$$\begin{aligned} A &= \exp(cK_{T,\min}), \\ B &= \exp(cK_{T,\min}) - \exp(cK_{T,\max}). \end{aligned}$$

Izraz (3.48) daje odgovor na pitanje kako generirati najvjerojatnije dnevne vrijednosti ozračenosti. Pri tome koeficijent c ovisi o mjesecu u godini jer se funkcija raspodijele određuje na temelju mjesečne prosječne vrijednosti indeksa prozračnosti. Za kvalitetnu simulaciju od velike važnosti su satne vrijednosti ozračenosti. Pokazano je [lit. 21] da se distribucija satnih indeksa prozračnosti može dobo aproksimirati funkcijom distribucije dnevnih indeksa prozračnosti. Dakle dobiva se :

$$k_T = \frac{\ln(A - B \cdot U)}{c}, \quad (3.49)$$

pri čemu je satni indeks prozračnosti definiran izrazom:

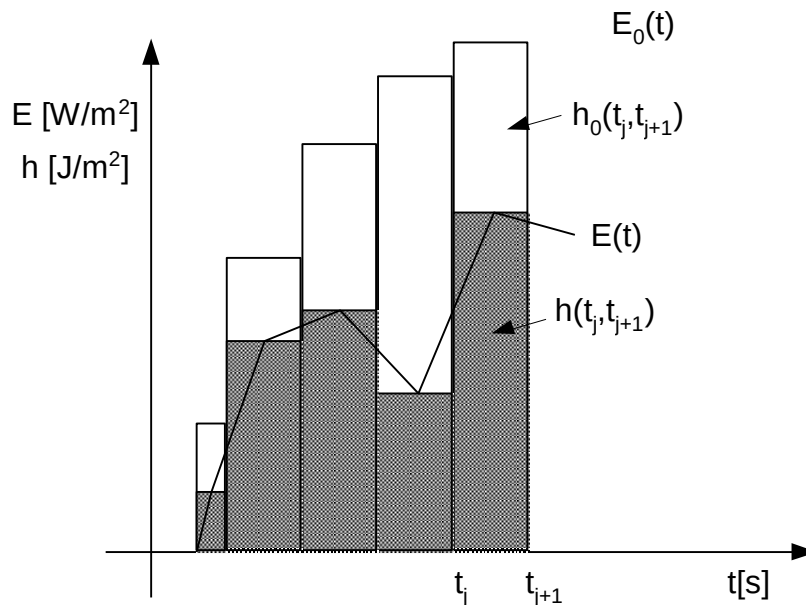
$$k_T = \frac{h(j)}{h_0(j)} \quad (3.50)$$

$h(j)$ je satna ozračenost horizontalne plohe ukupnim ozračenjem, $h_0(j)$ izvanatmosferska satna ozračenost horizontalne plohe ukupnim ozračenjem. Izvanatmosferska satna ozračenost horizontalne plohe može se izračunati na sličan način kao i dnevna vrijednost (3.11) s tim da su granice integracije vremena koja odgovaraju početku i kraju satnog intervala. Prema, tome vrijedi:

$$h(j) = k_T h_o(j) = \frac{\ln[A - B \cdot U]}{c} \cdot \int_{t_1}^{t_2} \bar{E}_0 \varepsilon(n) \sin[\alpha(t)] dt. \quad (3.51)$$

Izraz (3.51) predstavlja prizemnu satnu ozračenost za interval $[t_1, t_2]$.

Za simulacije s kraćim koracima od 1 h, potrebno je odrediti funkciju ozračenja tijekom dana. Najjednostavnije i dovoljno točno je izvršiti linearizaciju, spajanjem sredina satnih intervala linearnom interpolacijom odrediti ozračenje između dva čvora odnosno sredina satnih intervala (slika 3.4.).



Slika 3.4 Linearizacija funkcije ozračenja

Pri tome izračenje u sredini satnog intervala j dano je izrazom:

$$E_j = \frac{h(j)}{3600}. \quad (3.52)$$

Za sat u kojemu sunce izlazi ili zalazi gornji izraz je nešto drugačiji. Umjesto 3600 s satna ozračenost se dijeli s vremenom od izlaska do početka sljedećeg punog sata. U dodatku je dan algebarski izraz po dijelovima linearizirane funkcije zadane vrijednostima u određenim čvorovima. Difuzna komponenta ozračenja se procjenjuje na temelju Erbsovog izraza [lit. 21], koji korelira omjer satne difuzne i ukupne ozračenosti i satnog indeksa prozračnosti:

$$k_d = \frac{h_d}{h} = \begin{cases} 1 - 0,09k_T \text{ za } k_T \leq 0,22, \\ 0,9511 - 0,1604k_T + 4,388k_T^2 - 16,638k_T^3 + 12,336k_T^4 \text{ za } 0,22 < k_T \leq 0,8, \\ 0,165 \text{ za } k_T > 0,8. \end{cases} \quad (3.53)$$

Analogno izrazu (3.52) za srednje satno ozračenje ukupnim ozračenjem, koristeći izraz (3.53), može se izračunati difuzna i direktna komponenta ozračenja u sredini satnog intervala:

$$\begin{aligned} E_{dj} &= k_T k_d \frac{h_0(j)}{3600} \\ E_{bj} &= k_T (1 - k_d) \frac{h_0(j)}{3600} \end{aligned} \quad (3.54)$$

pri čemu su

E_{dj}	difuzna komponenta ozračenja u sredini satnog intervala j ,
E_{bj}	direktna komponenta ozračenja u sredini satnog intervala j ,
$h_0(j)$	izvan-atmosferska ozračenost u satnom intervalu j na horizontalnoj plohi.

Linearizacijom funkcije ozračenja kroz točke definirane s (3.54) dobivaju se funkcije $E_d(\omega)$ i $E_b(\omega)$. Konačno ove funkcije su temelj stohastičkog modela klime odnosno ozračenja plohe proizvoljno orijentirane po visini i azimutu prema izrazu (3.32). Sistematičnosti radi, u dodatku su prikazani svi izrazi kojima je definiran **stohastički model ozračenja** proizvoljno orijentirane plohe.

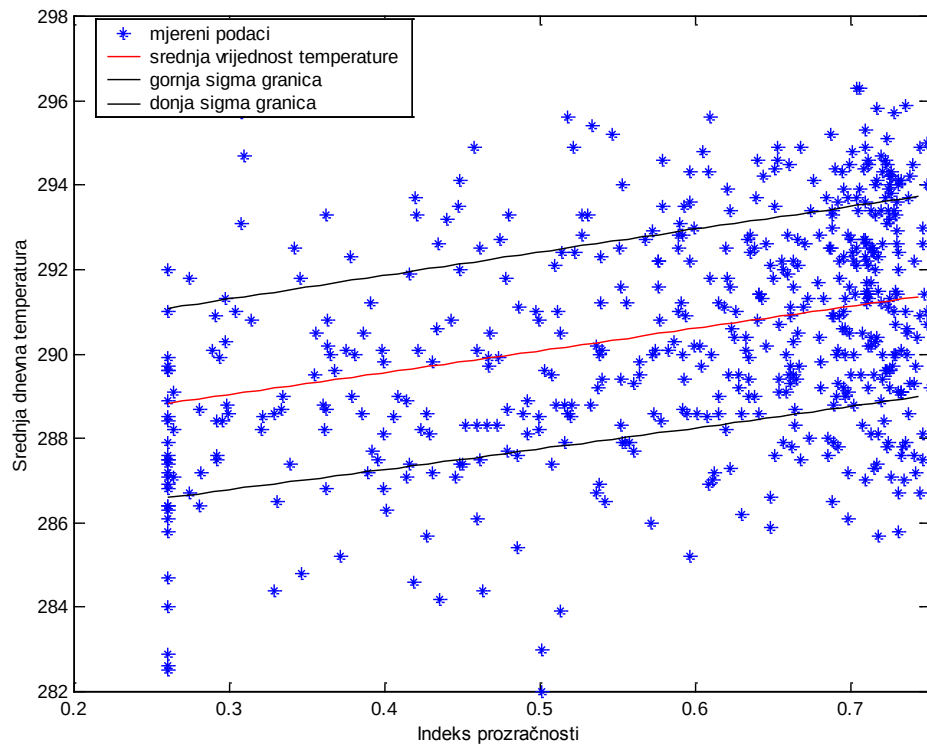
Primjer modela klime prikazan je na primjeru Otoka Lastova za dan 23. lipanj za modul nagnut pod kutom od 45 i azimutom -10 stupnjeva od juga prema zapadu.

3.5.2 Ovisnost srednje temperature o indeksu prozračnosti

Temperatura zraka tijekom dana u prosjeku raste od jutra do iza podne i onda pada. Srednja vrijednost dnevne temperature ovisi o nizu meteoroloških prilika: o dobu godine, o stanju atmosferskog tlaka, o razini vlažnosti u zraku, o kretanju zračnih masa itd... Gotovo je nemoguće analitički procijeniti temperaturu za neki dan u godini, međutim na temelju iskustva, odnosno snimljenih podataka, može se analizirati srednja vrijednost temperature za neki dan kao i granice u kojima se kreće temperatura. Iz mnoštva faktora koji utječu na srednje dnevnu temperaturu na nekoj lokaciji posebno treba izdvojiti dnevnu ozračenost odnosno indeks prozračnosti. Naime, Sunčevo ozračenje je pokretač uglavnom svih termičkih prijelaza na planeti Zemlji pa se stoga može intuitivno zaključiti da postoji određena korelacija između dnevne ozračenosti i srednje dnevne temperature. Utjecaj drugih faktora na temperaturu je slabo predvidljiv te se stoga može opisati određenom stohastičkom raspodjelom oko srednje vrijednosti.

Za potrebe ovog rada analizirana je korelacija između srednjeg indeksa prozračnosti i srednje dnevne temperature za svaki mjesec u godini za otok Lastovo. Meteorološki podaci se odnose na period od 1981. do 1997 godine. Rezultat analize je linearna korelacija između prosiječene vrijednosti srednje dnevne temperature $T_{sr,m}$ i K_T . Rasipanje srdenje dnevne temperature $T_{sr,d}$ oko prosijeka okarakterizirano je *standardnom devijacijom* $\sigma_{sr,m}$ koja ovisi

o indeksu prozračnosti K_T pri određenom intervalu⁴ indeksa prozračnosti. Na slici 3.5 je prikazan primjer takve korelacije za mjesec svibanj.



Slika 3.5 Korelacija između srednje dnevne temperature i indeksa prozračnosti.

Ova korelacija se može prikazati sljedećim izrazom:

$$\begin{aligned} T_{sr,m} &= T_{sr0} + ksr \cdot K_T, \\ \sigma_{sr,m} &= \sigma_{sr0} + b1 \cdot K_T + b2 \cdot K_T^2. \end{aligned} \quad (3.55)$$

Pri čemu se koeficijenti T_{sr0} , ksr , σ_{sr0} , $b1$, $b2$ dobivaju primjenom metode najmanjih kvadrata. Za otok Lastovo, za što je napravljena analiza, ovi parametri dani su u tablici 3.4:

Tablica 3.4 Koeficijenti korelacije $T_{sr}=f(K_T)$

	siječanj	veljača	ožujak	travanj	svibanj	lipanj	srpanj	kolovoz	rujan	listopad	studenj	prosinac
T_{sr0}	282,24	281,91	282,38	285,00	287,48	286,75	291,35	291,81	291,76	290,70	287,17	284,14
ksr	-1,36	-1,28	1,61	1,62	5,21	12,03	9,52	8,30	3,61	-0,65	-2,49	-2,79
σ_{sr0}	4,06	3,70	3,48	1,35	2,07	-1,09	3,57	-0,68	1,02	3,75	2,08	0,60
$b1$	-6,66	-5,35	-6,08	-0,65	0,77	10,19	-8,23	8,94	3,78	-7,32	2,64	9,36
$b2$	5,85	6,52	6,90	2,93	-0,49	-7,75	9,30	-7,37	-3,01	7,44	-2,83	-9,51

⁴ Cijeli skup indeksa prozračnosti $K_T \in [K_{T,min}, K_{T,max}]$ podijeljen je na n klasa. Za svaku klasu utvrđena je frekvencija i podskup vrijednosti temperature koje odgovaraju toj klasi. Dalje je za svaku tako definiranu klasu određena srednja vrijednost odgovarajućeg vektora podataka, kao i standardna devijacija

U prvoj aproksimaciji, raspodjela temperatura za određeni razred vrijednosti indeksa prozračnosti (K_T , $K_T + dK_T$) može se predstaviti Gaussovom raspodjelom. Ova raspodijela je definirana srednjom vrijednošću i standardnom devijacijom. Korištenjem tako definirane funkcije raspodijele može se generirati najvjerojatnija vrijednost temperature zraka pri određenom indeksu prozračnosti za određeni mjesec u godini. Ova metoda je objašnjena u točki 3.5.1. Konačno se dobiva:

$$F_T(T_{sr,d}) = \frac{1}{2\pi\sqrt{\sigma_{sr}(mj)}} \int_{-\infty}^T e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{T_{sr,d} - T_{sr,m}}{\sigma_{sr,m}(mj)}\right)^2} dT, \quad (3.56)$$

$$T_{sr,d}(n, mj) = F_T^{-1}(U),$$

gdje su:

$T_{sr,d}$	srednja dnevna temperatura za dan n i mjesec mj ,
$T_{sr,m}$	prosječna vrijednost srednjih dnevnih temperatura,
U	jednoliko raspodijeljena slučajna varijabla,
$\sigma_{sr,m}$	standardan devijacija rasipanja $T_{sr,d}$ od $T_{sr,m}$.

Dnevni hod temperature ovisi o nizu faktora koje je teško sve uzeti u obzir. Intuitivno se zna da temperatura raste od jutarnjih sati i dostiže maksimum u poslijepodnevnim satima. Uzima se da je najmanja temperatura zraka ujutro u 5 h a najveća popodne u 14 h. Dnevne varijacije temperature ovise o dobu godine i o srednjoj temperaturi. Međutim može se uzeti da je opseg variranja temperatura zraka 2 % od srednje vrijednosti. S obzirom na cikličnu prirodu promjene satnih vrijednosti temperatura, temperatura je prikazana kosinusnom funkcijom. Realno se ne očekuje glatka funkcija temperature, te se stoga ova funkcija modulira bijelim šumom u granicama $[0,9;1,1]$. Važno je napomenuti da se indeks prozračnosti generira kao skup od 24 satne vrijednosti indeksa prozračnosti $k_T(j)$. Dnevna vrijednost indeksa prozračnosti može se dobiti prema sljedećem izrazu:

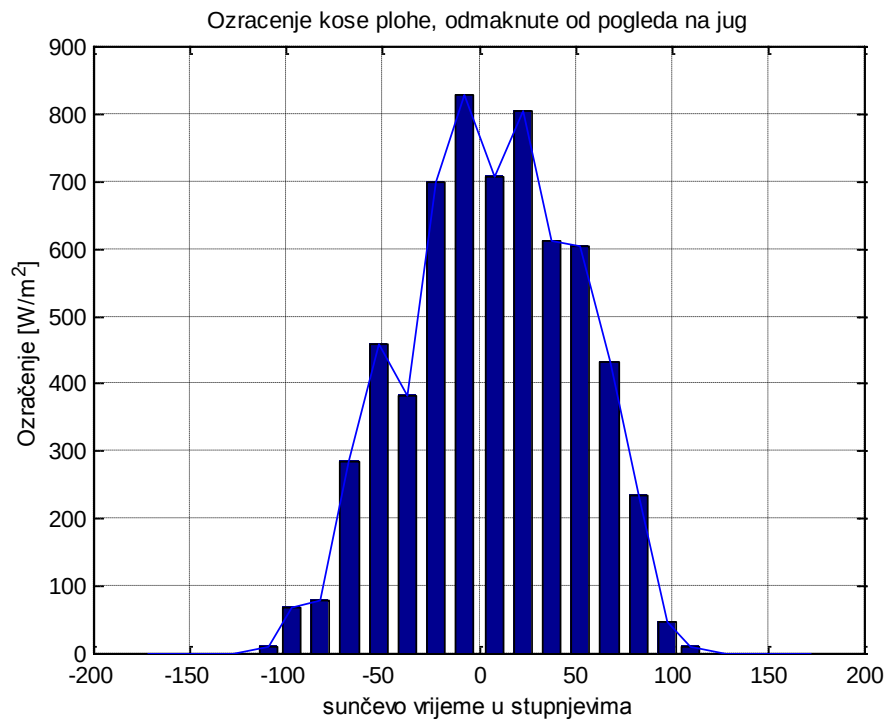
$$K_T = \sum_{j=1}^{24} k_T(j) \cdot \frac{h_0(j)}{H_0}, \quad (3.57)$$

pri čemu je $h_0(j)$ satna ozračenost ravne plohe a indeks j označava sate od 1 do 24.

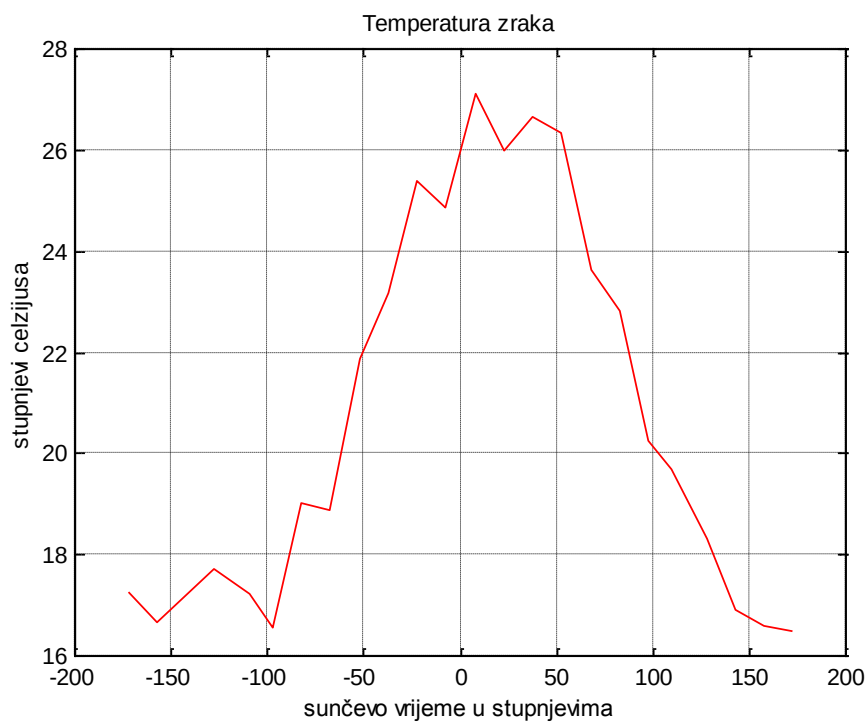
Napokon model klime izražen preko izraza (3.51) – (3.56) prikazan je na slikama 3.6 i 3.7. Simulirano je ozračenje nagnute plohe sa sljedećim svojstvima:

Lokacija:	LASTOVO
Zemljopisna širina	42,75° SGŠ
Datum:	23.06 (174. dan)
Nagib plohe:	45°
Azimut	10° od juga prema zapadu

Važno je naglasiti da se rezultat višestrukog simuliranja klime za isti dan međusobno razlikuju. Dobiveni rezultati predstavljaju **najvjerojatnije** karakteristike klime.



Slika 3.6 Ozračenje nagnute plohe .



Slika 3.7 Temperatura zraka .

4. TEHNOLOGIJA ISKORIŠTAVANJA SUNČEVE ENERGIJE

Sunčeva energija je izvor života na zemlji. iskorištavanje Sunčeve energije staro je koliko i ljudska civilizacija. Danas se sunčeva energija iskorištava kako posredno tako i neposredno. Formalno govoreći, energija fosilnih goriva je po svom porijeklu nastanka sunčeva energija, pohranjena u organskim tvarima u fazi nastanka. S druge strane, neposredno iskorištavanje sunčeve energije se svodi na iskorištavanje energije elektromagnetskog zračenja užarene površine sunca. U pogledu neposrednog iskorištavanja sunčeve energije razlikujemo dvije tipične tehnologije: *fototermalna pretvorba* i *fotonaponska pretvorba*.

4.1 Fototermalana pretvorba – Solarni kolektori

Fototermalna pretvorba temelji na korištenju tzv: solarnih kolektora. Apsorber kolektora se izlaže sunčevom zračenju. Zbog specifičnih svojstva absorber akumulira sunčevu energiju u vidu topline koju predaje radnom mediju (voda, zrak, ...). Radni mediji prenosi energiju kroz izmjenjivač gdje se toplina predaje potrošaču. Primjena fototermalne pretvorbe danas je jako raširena i ekonomski je na pragu pune prihvatljivosti. Sunčevim kolektorima osigurava se toplina za zagrijavanje prostorija, a ponajviše za pripremu sanitarne vode. Topla voda je okosnica mnogih privrednih sektora, uglavnom turizma, te se upravo ova tehnologija tu pokazala idealnim riješenjem.

4.2 Fotonaponska pretvorba

Neposredna pretvorba energije elektromagnetskog zračenja Sunčeve svjetlosti u električnu energiju naziva se fotonaponska pretvorba. Uređaji kojim se omogućuje pretvorba nazivaju se fotonaponske ćelije. Više ćelija čine fotonaponski modul a više modula fotonaponski agregat ili fotonaponsko polje kako se to u nekim literaturama spominje. Primarni zadatak ovog rada, kako je to u uvodu rečenog je formiranje algoritma i izgleda programa za simulaciju fotonaponskog sustava. Pored toga, sekundarni cilj rada je dati detaljni uvid u prilike u fotonaponskom sustavu ponajviše u samostojećim sustavima, naglasiti specifičnosti i probleme o kojim treba voditi računa tijekom projektiranja ovakvih sustava.

Postoje tri glavne skupine fotonaponskih sustava: samostojeći, hibridni i mrežni fotonaponski sustavi. Svaki od ovih sustava biti će ovdje ukratko predstavljen.

4.2.1 Samostojeći fotonaponski sustavi

Fotonaponski sustav u kojemu je fotonaponski generator jedini ili primarni izvor električne energije su samostojeći fotonaponski sustavi. To su sustavi relativno male snage, uglavnom izvan doseg standardne elektroenergetske mreže. Postoje izvedbe fotonaponskih sustava gdje fotonaponski agregat samostalno napaja trošila u raspoloživom vremenu a neki drugi izvor energije (dizel agregat, vjetroturbina, elektroenergetska mreža) izvan tog vremena.

U ovom poglavlju će se ukratko nabrojati razni primjeri fotonaponskih sustava koji rade energetske rečeno u "otonoj režimu". S obzirom na put energije od fotonaponskog izvora do trošila sustavi mogu biti:

1. **Direktni FNS za DC trošilo:** to su uglavnom mali sustavi, manje važnosti i pouzdanosti opskrbe. Iznimno su jednostavni, praktički bez održavanja. To su često pumpna postrojenja male snage ili rasvjeta manjih površina.
2. **Indirektni FNS za DC trošilo preko prilagodbe.** Pojedina trošila kao što su pumpna postrojenja, sama po sebi imaju funkciju spremanja energije. Pumpe crpe vodu i dobavljaju je u spremnik na određenoj visini. U takvi sustavima nije potrebno dodatno spremanje energije. Radi boljeg iskorištavanja potencijala fotonaponskih modula, instaliraju se uređaji za poboljšanje sučelja fotonaponskog modula i pumpe.
3. **Neregulirani sustav sa spremnikom .** Spremnik energije u fotonaponskim sustavima su uglavnom akumulatorske baterije. Baterije imaju ulogu međuspremnika energije i održavaju razmjerno konstantan napon sustava. Kada je potrošnja energije manja od proizvodnje, višak energije se sprema u akumulatorsku bateriju. U vremenu kada je potrošnja energije veća baterija napaja trošilo. Više o radu i ulozi akumulatorske baterije biti će prikazano u poglavljima 6 i 7.
4. **Regulirani sustav za DC trošilo sa spremnikom. Ovo je najčešća postava fotoanponskog sustava.** Tu su sustvi srednje i velike snage. Regluacija se odnosi na punjenje akumulatorskih baterija. Napon trošila je određen naponom baterije. Nešto rijedi slučaj je kada je i napon trošila reguliran na nazivnu vrijednost.
5. **Direktni sustav za AC trošilo.** Slično DC sustavima, to su pumpna postrojenja s AC motorima.
6. **Regulirani sustav za AC trošilo sa spremnikom.** Za razliku od reguliranih DC sustava ovi sustavi imaju regulirano napajanje trošila. Izmjenjivači se napajaju iz akumulatorskih baterija (rijede direktno iz FNM-a) i napajaju izmjenična trošila na izlazu.
7. **Kombinirani sustav.** Pored AC tu su i DC trošila.

4.2.2 Hibridni fotonaponski sustavi

Hibridni fotonaponski sustavi su oni gdje, za napajanje samostojeće mreže pored fotonaoponskog generatora koristi još neki izvor električne energije. Najčešće je to dizel agregat ili vjetno turbina.

4.2.3 Mrežni fotnaponski sustavi- fotonaponske elektrane

Kao što samo ime kaže, mrežni fotonaponski susavi su takovi sustavi gdje je fotonaponski generator predstavlja samo jednu proizvodnu jedinicu elektroenergetskog sustava. Fotonaponski agregat opremljen je odgovarajućim izmjenjivačem (mrežom komutiranim), što ujedno osigurava sinkronizaciju fotonaponskog agregata na mrežu.Ovakvih sustav ima samo nekoliko u svijetu snage uglavnom veće od 100 kW. Razvoj ovakvih sustava spada u problematiku globalne opskrbe energijom te o tome ovdje neće biti riječi.

5. FOTONAPONSKA PRETVORBA

5.1 Fizikalne osnove fotonaponske pretvorbe

Fotonaponska pretvorba je direktna pretvorba energije sučevog zračenja u električnu energiju. Fotonaponske ćelije posreduju u konverziji Sunčeve u električnu energiju. Fizikalni fenomen koji objašnjava ovu pretvorbu je *fotoelektrični efekt*.

5.1.1 Fotoelektrični efekt

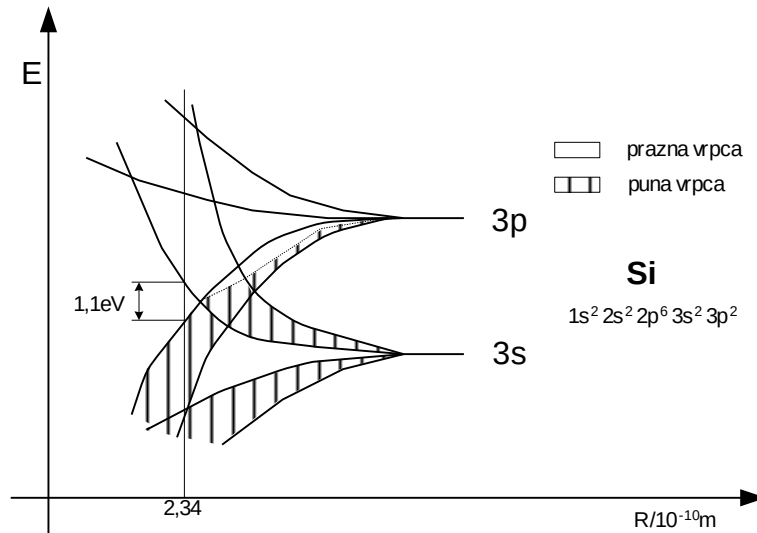
To je efekt izbijanja elektrona iz metala pod djelovanjem svjetlosti. [lit 5.] Pokusi su pokazali da energija izbačenih elektrona ne ovisi o jakosti svjetlosti nego o frekvenciji, što je bilo teško razumjeti na temelju klasične fizike. [lit. 1] Efekt je 1905 objasnio A. Einstein uvodeći pojam *fotona*. Po toj teoriji svjetlosna energija se prenosi u kvantima jediničnog iznosa $h\nu$. Ako foton pogodi vezani elektron u kristalu atoma, elektron se “otkida” od kristala (matičnog atoma) a foton nestaje. Proces je moguć samo ako je energija fotona veća ili jednaka od energije vezanja elektrona ($E_\gamma - E_B$). Pri reakciji fotona na slobodnom elektronu (Comptonov efekt) foton ne predaje svu energiju elektronu nego samo jedan dio. U oba slučaja mora vrijediti zakon očuvanja količine gibanja.

5.1.2 Energetske vrpce:

Statička električna svojstva metala, termička svojstva metala uspješno su objašnjena modelom slobodnog elektronskog plina. Po toj teoriji u potencijalnoj jami metala nalaze se *kvazi slobodni elektroni* (čija je kinetička energija manja od energije potrebne za izlaz iz potencijalne jame). Međutim električna vodljivost metala, poluvodiča i izolatora ne mogu se objasniti ovim modelom već modelom *energetskih vrpca*.

Energetska stanja izoliranog atoma su diskretna. Približavanjem atomskih centara dolazi do cijepanja diskretnih stanja u niz bliskih stanja tako da od jednog diskretnog stanja nastaje čitava jedna vrpca s gotovo kontinuiranom raspodjelom elektrona po energetskim razinama. Tako npr. od 2s elektronskog stanja kod izoliranog atoma nastaje 2s energetska vrpca. S obzirom da svi elektroni ne mogu biti na istoj energetskoj razini (Pauliev princip) jedno energetsko stanje se cijepa na niz bliskih stanja. Što je udaljenost između atomskih centara manja to je raslojavanje jednog energetskog stanja veće, što je energetski nivo niže u jami to je njegovo raslojavanje manje. Energetska stanja usamljenog atoma su diskretizirana. Elektroni iste podljuske u atomu imaju istu energiju. S obzirom na broj elektrona koji pripadaju nekoj podljusci možemo govoriti o tome je li podljuska popunjena ili ne. Energetska stanja u popunjenoj podljusci tvore tzv *valentnu vrpcu*, dok energetska stanja u praznoj ili nepopunjenoj podljusci čine *vodljivu vrpcu*. Energetski prostor između vodljive i valentne vrpce naziva se *zabranjena vrpca*. Princip nastajanja vrpca objašnjen je na pojednostavljenom modelu periodičnog potencijala: *Kroning-Penneyev model* (lit 2).

U izoliranom atomu energetska stanja dviju podljuski mogu biti relativno udaljena a da pri cijepanju u ljuske dođe do njihovog približavanja. Tako se npr kod kristala Berilij vrpce 2s i 2p stapaju u jednu s 2 popunjena od 8 dozvoljenih stanja (2+6), pa je Berilij vodič a ne izolator, jer su vodiči karakterizirani nepopunjenom vodljivom vrpcom.



Slika 5.1 Cijepanje energetskih vrpca

Kod kovalentnih kristala (Silicij, Germanij, Dijamant) jedno diskretno stanje se može podijeliti u dvije vrpce (npr. gornja i donja 2p vrpca), slika 5.1. Preklapanje vrpca objašnjava poluvodička svojstva Silicija i Germanija. Ovo cijepanje jedne vrpce u dvije objašnjava se postojanjem dva realna rješenja valnih funkcija jednog elektronskog stanja kod približavanja atomskih centara [lit 1.].

Jedna od najvažnijih karakteristika kristala je gustoća elektronskih stanja, odnosno broj elektronskih stanja u jediničnom energetsom pojasu.

5.1.3 Funkcija gustoće elektronskih stanja

Kod *modela slobodnog* elektronskog plina, gustoća elektronskih stanja računa se uz pomoć relacije neodređenosti. Broj elektronskih stanja u jedinici prostora i jediničnom energetsom intervalu ($E, E+dE$) tada iznosi:

$$S(E) = \frac{8\pi\sqrt{2m^3}}{h^3} \sqrt{E} . \quad (5.1)$$

Puneći elektronska stanja od najnižeg prema najvišem dolazi se do tzv. *Fermijeva nivoa*. To je ona vrijednost kinetičke energije koja se dostiže puneći energetske nivoe u skladu s Paulijevim principom. To je ujedno i najveća kinetička energija elektrona pri temperaturi od 0 K. Prema tome, ako poznamo gustoću vodljivih elektrona u metalu, Fermijev nivo se može izračunati :

$$E_F = \frac{h^2}{2m} \left(\frac{3N}{8\pi V} \right)^{2/3}. \quad (5.2)$$

U modelu energetske vrpce odnosno periodičnog potencijala funkcija gustoće elektronskih stanja se modificira. Funkcija se odnosi na vrpcu a ne na cijeli energetski spektar. Umjesto mase elektrona uvodi se *efektivna masa elektrona* kao nadomjestak specifičnom ponašanju elektrona u kristalnoj rešetki. Pri dnu vrpce funkcija gustoće elektronskih stanja iznosi :

$$S(E) = \frac{8\pi\sqrt{2m^3}}{h^3} \sqrt{E - E_C}, \quad (5.3)$$

pri čemu je E_C energetska razina dna vrpce. Pri vrhu gustoća se smanjuje prema sličnom zakonu, gdje je E_C energija vrha vrpce:

$$S'(E) = \frac{8\pi\sqrt{2m^3}}{h^3} \sqrt{E_V - E}, \quad (5.4)$$

pri čemu je E_V energetska razina vrha vrpce. Do izraza (5.3) i (5.4) dolazi se analizom Brillouinovih zona.

5.1.4 Vodljivost krutih materijala

Vodljivost nekog materijala ovisi prvenstveno o atomskoj strukturi kao i o makroskopskom stanju vodiča. Relacija koja povezuje gustoću struje j , električno polje E i vodljivost σ_c glasi:

$$j = \sigma_c E. \quad (5.5)$$

Gustoća struje j je broj elektrona koji prođu presjekom vodiča u jedinici vremena dok je E primjenjeno električno polje u kojemu se nalazi materijal. Izraz (5.5) se može napisati i drugačije:

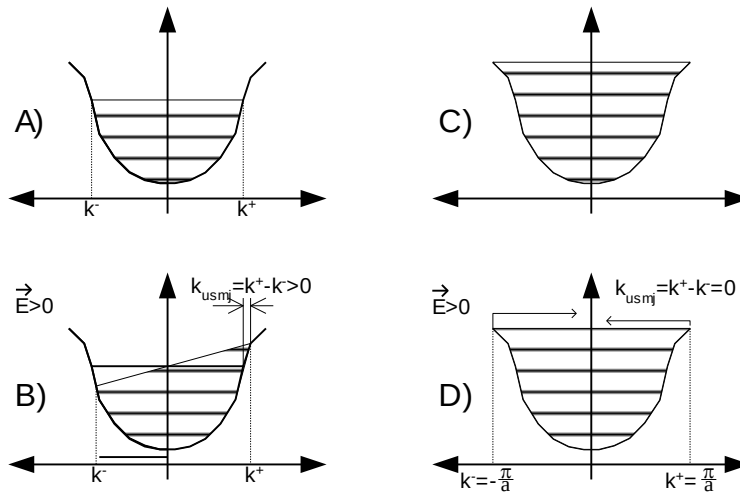
$$nev_e = \sigma_c E, \quad (5.6)$$

gdje je n gustoća vodljivih elektrona, e naboj elektrona a v_e usmjerena brzina elektrona. U tom kvaziklasičnom model svi elektroni u vodljivoj vrpce sudjeluju u vođenju struje napredujući brzinom proporcionalnom veličini primjenjenog polja. Kako je očito da bi veličina polja trebala biti proporcionalna ubrzanju elektrona, mora postojati mehanizam koji ne dozvoljava ubrzanje do brzina većih od v . To je objašnjeno modelom kretanja elektrona kroz periodičnu kristalnu rešetku (Kroning-Penniyev model).

Prije uključenja vanjskog električnog polja elektroni se gibaju u svim smjerovima podjednako. Usmjerena brzina takvog gibanja jednaka je nuli. Uključivanjem polja narušava se simetrija gibanja u svim smjerovima podjednako. Ako u vrpce postoje slobodna energetska stanja u blizini elektrona s vrha raspodijele, to će ti elektroni, podstaknuti

električnim poljem, zauzeti dostupna mjesta. Na njihovo mjesto doći će niži elektroni i tako redom.

Elektroni na gornjem rubu vrpce imaju upravo takvu valnu duljinu da reflektirani val na atomskim centrima poništava upadajući val. Elektroni koji pod djelovanjem električnog polja dosegnu rub vrpce ispunjavaju uvijete Braggove refleksije, njihovo usmjereno gibanje promjeni smjer pa se čini da ih polje usporava. Elektroni na samom rubu zone ne mogu povećati svoj valni vektor jer bi to značilo skok u višu energetska zonu. *Dakle, popunjena vrpca se ne može narušiti djelovanjem električnog polja⁵, odnosno ne vodi struju.* Na slici 5.2 je prikazana najniža energetska vrpca ili tzv. prva Brillouinova zona u slučaju kada je polupuna i puna s i bez djelovanja električnog polja.



Slika 5.2 Utjecaja električnog polja na raspodjelu elektrona u prvoj Brillouinovoj

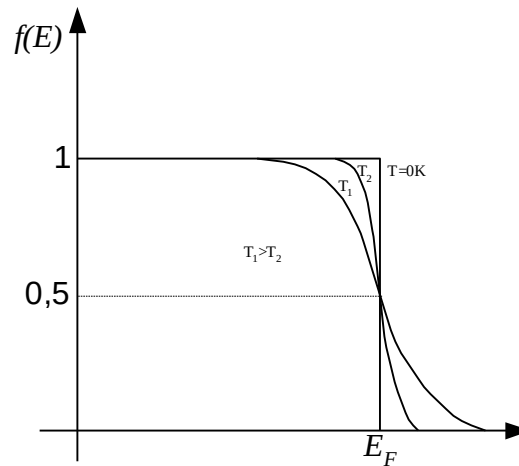
5.1.5 Fermijeva funkcija

Na apsolutnoj nuli svi elektroni jednog kvantno-mehaničkog sustava popunjavaju redom sva energetska stanja od najnižeg do najvišeg bez preskakanja jer se na taj način ostvaruju najmanju energija sustava. Porastom temperature neki elektroni pri vrhu raspodjele prelaze u viša energetska stanja (jer su slobodna). Statistika koja daje raspodjelu elektrona po elektronskim stanjima pri nekoj temperaturi je *Fermi-Diracova statistika* (raspodjela). Ova raspodjela vrijedi i za sve čestice koje se ne razlikuju a za koje vrijedi Pauliev princip [lit 2]. Algebarski izraz Fermi-Diracove raspodjele dobiva se analizom vjerojatnosti nekog mikrostanja na temelju makrostanja. Razmatra se vjerojatnost svake moguće raspodjele elektrona po slobodnim razinama. Tako se dobiva da je najvjerojatnija ona raspodjela koja se ostvaruje s najvećim brojem individualnih raspodijela:

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1} \quad (5.7)$$

⁵ Osim u slučaju kada je električno polje toliko jako da izbaci elektron u višu vrpcu

U izrazu (5.7) je E_F vrijednost Fermijevog nivoa, tj one kinetičke energije koja se mora dostići puneći elektronima redom sva elektronska stanja od najnižih prema višim u skladu s Paulijevim principom. [lit. 2]. To je najveća zaposjednutost energetska razina pri apsolutnoj nuli. Važno svojstvo Fermi-Diracove raspodjele je simetričnost: Za temperature $T > 0$ K vrijednost popunjenosti Fermijeva nivoa je uvijek 50 %.



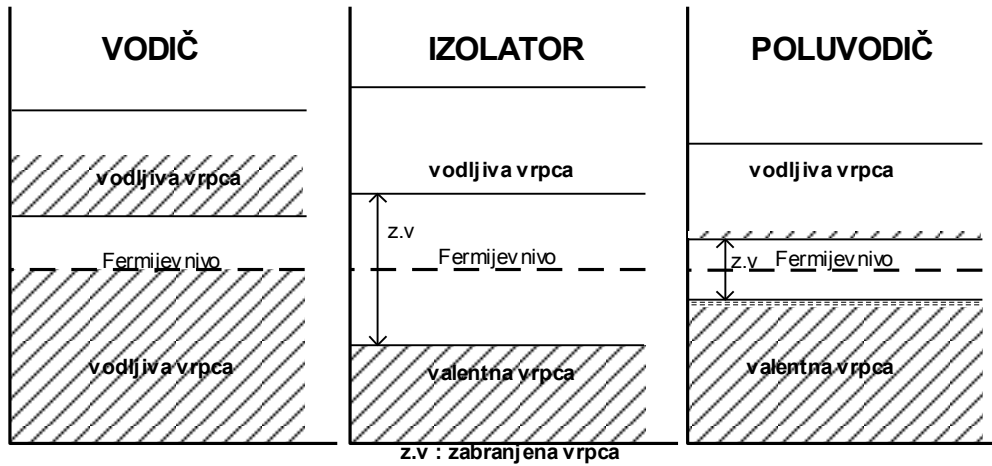
Slika 5.3 Fermi-Diracova raspodijela.

Raspodjela elektrona po energetskeim stanjima dobiva se množeći Fermi-Diracovu raspodjelu s gustoćom stanja:

$$\frac{dN}{dE} = \frac{8\pi\sqrt{2m^{*3}}}{h^3} \frac{\sqrt{E - E_C}}{\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1}, \quad (5.8)$$

gdje je E_C energetska razina dna vrpce, m^* efektivna masa elektrona a N broj elektrona u energetskeim intervalu $(E, E+dE)$.

Važno je imati na umu da Fermijev nivo za određenu strukturu nije stalna vrijednost, nego se mijenja s temperaturom. Položaj Fermijevog nivoa, popunjenost vrpce i njihova međusobna udaljenost određuju električna i toplinska svojstva krutih tvari. U principu kristal ima svojstva vodiča ako elektroni djelomično popunjavaju vodljivu vrpcu, a svojstvo izolatora (slika 5.4) kad posjeduje potpuno popunjenu valentnu vrpcu i energetskei udaljenu potpuno praznu vrpcu, koju ne popunjavaju elektroni u skladu s relacijom (5.8) niti pri visokim temperaturama. Poluvodičima nazivamo kristale kojima je prazna vodljiva vrpca dovoljno blizu popunjene valentne vrpce, tako da u skladu s relacijom (5.8) postoji određen broj elektrona koji su iz valentne prešli u vodljivu čime kristal dobiva sposobnost vođenja struje i to kako zbog elektrona u vodljivoj tako i zbog odstupanja od potpune zaposjednutosti elektronima valentne vrpce



Slika 5.4 Položaj Fermijeva nivoa u metalu, izolatoru i poluvodiču.

5.1.6 Vodljivost poluvodiča

Poluvodiči, inače nevodljive tvari, pokazuju značajna vodljiva svojstva kod povećanja temperature, osvjetljenosti i drugim vanjskim efektima. Većina poluvodiča su kristalne strukture na mikroskopskom nivou. Atomi u kristalnoj rešetki poluvodiča povezani su međusobno kovalentnim vezama. Najpoznatiji poluvodiči su Silicij i Germanij. Za analizu vodljivosti poluvodiča važan je pojam *šupljina*. Šupljine su zamišljene pozitivno nabijene čestice mase približno masi elektrona i naboja jednakog naboju elektrona ali s pozitivnim predznakom. Šuplijene nastaju kad se elektroni pri vrhu popunjene vrpce poluvodiča, uslijed vanjskog poticaja (temperature npr.), prebacuju u vodljivu vrpcu. Uslijed toga ostaje nepopunjeno elektronsko stanje pri vrhu valentne vrpce što omogućava drugim elektronima da ga zauzmu. Pod djelovanjem električnog polja elektroni pri vrhu valentne vrpce gibaju se suprotno od očekivanog smjera struje iz razloga što imaju negativnu efektivnu masu. S gibanjem elektrona pri vrhu vrpce, giba se i šupljina u istom smjeru, s istim ubrzanjem i brzinom. S obzirom da ovi elektroni imaju negativan naboj i negativnu masu, šupljine se ponašaju kao čestice s pozitivnom masom i pozitivnim nabojem.

Uvođenjem pojma vremena relaksacije τ_e i τ_h kao srednjeg vremena između dva sudara, vodljivost poluvodiča σ se može napisati kao:

$$\sigma = e^2 \left(\frac{N_e \tau_e}{m_e^*} + \frac{N_h \tau_h}{m_h^*} \right). \quad (5.9)$$

S obzirom da je omjer vremena relaksacije i efektivne mase slabo promjenljiva varijabla, to je za vodljivost poluvodiča najvažniji utjecaj broj nosilaca slobodnih elektrona u vodljivoj vrpce N_e i broj šupljina u valentnoj vrpce N_h [lit 1]. Često se umjesto broja nosilaca naboja barata s gustoćom elektrona e i gustoćom šupljina p . Gustoća elektrona se lako dobiva integriranjem izraza (5.8) preko područja vodljive vrpce tj od $E=E_C$, do $E=\infty$:

$$n = \int_{E_C}^{\infty} f(E) \frac{8\pi\sqrt{2m_e^{*3}}}{h^3} \sqrt{E - E_C} , \quad (5.10)$$

gdje je $f(E)$ Fermijeva funkcija odnosno vjerojatnost da se elektron može naći na energetskej razini E . Važno je imati na umu da se umjesto mase elektrona računa s efektivnom masom elektrona pri dnu vrpce. Rješenjem integrala (5.10) dobija se koncentracija elektrona u vodljivoj vrpce:

$$n = N_C \exp\left(\frac{E_F - E_C}{kT}\right), \quad (5.11)$$

pri čemu je N_C efektivna *gustoća elektrona u vodljivoj vrpce* i ovisna je o vrijednosti efektivne mase i apsolutnoj temperaturi.

Gustoća šupljina se računa preko gustoće elektronskih stanja pri vrhu vrpce i vjerojatnosti da određeno energetske stanje nije popunjeno, s razlikom da se umjesto efektivne mase elektrona računa s efektivnom masom šupljina. Dakle:

$$p = \int_{-\infty}^{E_V} [1 - f(E)] \frac{8\pi\sqrt{2m_h^{*3}}}{h^3} \sqrt{E_V - E} , \quad (5.12)$$

odnosno:

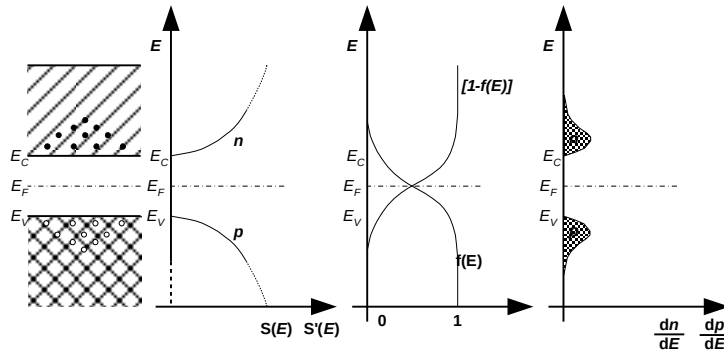
$$p = N_V \exp\left(\frac{E_V - E_F}{kT}\right), \quad (5.13)$$

pri čemu je N_V , slično kao kod elektrona, *efektivna gustoća šupljina u valentnoj vrpce*.

Vrijednosti gustoće elektrona u (5.11) i gustoće šupljina u (5.13) nazivaju se ravnotežnom koncentracijom nosilaca. Važno je uočiti da umnožak ravnotežnih koncentracija ne ovisi o položaju Fermijeva nivoa nego samo o širini zabranjene vrpce i temperaturi, te se može pisati kao:

$$np = CT^3 \exp\left(-\frac{E_G}{kT}\right). \quad (5.14)$$

Izraz (5.14) vrijedni općenito bez obzira na tip poluvodiča (P ili N tip). Pri čemu je $E_G = (E_C + E_V)/2$ a C konstanta.



Slika 5.5 Gustoće nosilaca naboja u poluvodiču

U čistom poluvodiču bez primjesa, svi elektroni u vodljivom pojasu potječu iz valentne vrpce pa se stoga uzima da je u takvom poluvodiču gustoća elektrona jednaka gustoći šupljina (slika 5.5). Izjednačenjem ovih gustoća nosilaca naboja dobija se izraz za Fermijevu energiju u intrističnom (čistom) poluvodiču:

$$E_F = \frac{E_V + E_C}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_V}{N_C} \quad (5.15)$$

Za silicij i germanij, drugi pribrojnik u izrazu (5.15) je znatno manji od prvog te se tako dobiva drugo važno svojstvo poluvodiča: *Fermijev nivo se nalazi u sredini zabranjene vrpce.*

5.1.7 Poluvodička P-N dioda

Koncentracija nosilaca u vodljivoj i valentnoj vrpce se može povećati dodavanjem *primjesa*. Na taj način se može kontrolirati vodljivost poluvodiča. Dodavanjem primjesa čistom poluvodiču se stvaraju energetska stanja unutar zabranjene vrpce. Primjese koje uvode energetske nivo blizu dna vodljive vrpce omogućuju vlastitim elektronima da se “lako” prebace u vodljivu vrpcu. Zbog tog svojstva nazivaju se donori. Većina nosilaca naboja su elektroni porijeklom od samog poluvodiča i od donorskih atoma, pa se takvi poluvodiči nazivaju *poluvodiči N-tip*. Tipični donori u kristalima silicija i germanija su fosfor, arsen i antimon. Svi ovi elementi su elementi pete grupe što znači da imaju pet elektrona za tvorbu kemijskih veza. S obzirom da su poluvodiči elementi četvrte grupe, to se kovalentna veza ostvaruje s četiri elektrona primjese dok je peti elektron slabo vezan za matični atom. Energetska razina donora je 0,04-0,05 eV ispod vodljive vrpce.

Ako se poluvodiču dodaju elementi treće grupe, za potpunu vezu nedostaje jedan elektron. Energetski nivo donorskih stanja je nešto iznad vrha popunjene vrpce. Ta blizina omogućava valentnim elektronima lagani energetska skok tako da u valentnoj vrpce ostaje nova šupljina. Efekt dodavanja akceptorskih atoma je povećanje gustoće šupljina u valentnoj vrpce. S obzirom da su u ovom slučaju šupljine u većini, poluvodič s akceptorskim primjesama naziva se *poluvodič P-tipa*. Akceptorska stanja se nalaze 0,05-0,06 eV iznad valentne vrpce.

Položaj Fermijeva nivoa o P i N tipu poluvodiča lako se može naći ako se zna efektivna gustoća naboja. Za poluvodiče s primjesama pri sobnim temperaturama uglavnom svi donorski odnosno akceptorski atomi su ionizirani. To je zbog položaja energetskog nivoa

donorskih odnosno akceptorskih stanja. Koncentracija primjesa koja se dodaje intrističnim poluvodičima uglavnom je za 4-5 redova veličina veća od termičkih koncentracija nosilaca. Prema tome može se reći da elektroni u vodljivoj vrpce N-tipa poluvodiča potječu od donorskih primjesa. Isto vrijedi za šupljine u valentnoj vrpce P-tipa poluvodiča:

$$\begin{aligned} n \approx N_D, \quad p &= \frac{n_i^2}{N_D} && \text{N-tip poluvodiča,} \\ p \approx N_A, \quad n &= \frac{n_i^2}{N_A} && \text{P-tip poluvodiča.} \end{aligned} \quad (5.16)$$

Elektroni u N tipu poluvodiča nazivaju se i većinski nosioci a šupljine manjinski nosioci. Na temelju ovih približenja lako se dobiva Fermijeva razina kod N-tipa odnosno P-tipa poluvodiča:

$$\begin{aligned} E_F &= E_C + kT \ln \left(\frac{N_D}{N_C} \right) \text{ kod N-tipa,} \\ E_F &= E_V - kT \ln \left(\frac{N_A}{N_V} \right) \text{ kod P-tipa.} \end{aligned} \quad (5.17)$$

Dakle Fermijev nivo je kod N tipa pomaknut prema vodljivoj vrpce i nalazi se između sredine zabranjene vrpce i donorskog nivoa E_D .

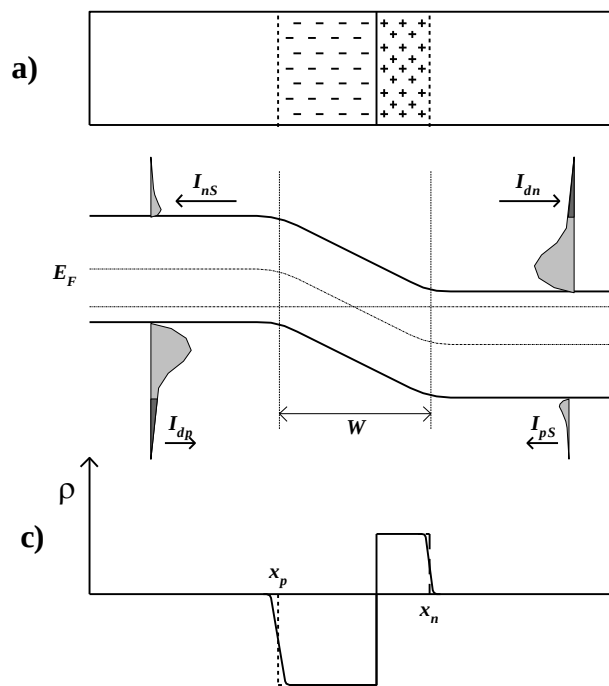
5.1.7.1 PN spoj

Spajanjem⁶ P i N tipa poluvodiča nastaje PN spoj. Na mjestu nastanka spoja dolazi do nagle promjene koncentracije nosilaca naboja tako da difuzija nosilaca nadjačava nastojanje ugrađenog električnog polja da ih zadrži. Ugrađeno električno polje je posljedica nehomogene prostorne raspodjele atoma akceptora i donora. Posljedica difuzije je rekombinacija nosilaca uz PN spoj. Nakon toga područje neposredno uz PN spoj ostaje bez slobodnih nosilaca, samo prostorni naboj tzv. *osiromašeno područje* odnosno *barijera*, koji tvori jako električno polje. S obzirom da su atomi primjesa uglavnom ionizirani na sobnim temperaturama, to će osiromašeno područje bliže N-tipu poluvodiča biti pozitivnog naboja a P-tipa negativnog naboja.

Ovo prijelazno područje naziva se i potencijalna barijera. Uistinu je to tako za veliki dio većinskih nosilaca. Naime zbog poravnanja Fermijevih nivoa u jedinstven nivo dolazi do povećanja energetske razine dna vodljive vrpce na P strani diode u odnosu na dno vodljive vrpce na N strani. To znači da elektroni sa dna vodljive vrpce N strane diode *ne mogu prijeći* na P stranu upravo zbog toga što nemaju dovoljnu energiju da se popnu na dno vodljive vrpce

⁶ Pod spajanjem se podrazumijeva čitav tehnološki proces izrade kompaktne strukture koja u jednom svom dijelu ima svojstva P tipa poluvodiča a u drugom svojstva N tipa poluvodiča.

P strane diode. Elektroni na P strani diode i šupljine na N strani su manjinski nosioci. Nalaze se iznad barijere te se slobodno driftno gibaju pod utjecajem ugrađenog električnog polja. Difundirati mogu i većinski nosioci ali samo oni čija je energija veća do energetske barijere. U termičkoj ravnoteži difuznu struju većinskih nosilaca poništava driftna struja manjinskih nosilaca. Kada bi imali uniformno dopirane P i N strane poluvodičke PN diode, difuzija većinskih nosilaca u procesu nastanka PN spoja tekla bi sve dok gustoća većinskih elektrona iznad barijere ne bude jednaka gustoći manjinskih elektrona. Na slici 5.6 je prikazan PN spoj u ravnoteži. Širine P, N i sloja barijere nacrtane su prenaplašeno radi što zornijeg predstavljanja. Indeksi dn i dp odnose se na difuzne struje elektrona i šupljina, te nS i pS za driftne struje.



Slika 5.6 Energetski dijagram PN spoja u ravnoteži

Prije početka razmatranja strujno naponskih odnosa u poluvodičkoj diodi treba istaknuti približenja koja su upotrebljena.

Približenje 1. PN dioda je podijeljena na dva homogena dijela: *Kvazi neutralno područje* gdje nema prostornog naboja i *osiromašeno područje* (barijera) gdje nema slobodnih nosilaca naboja.

Približenje 2. Kod srednjih vrijednosti priključenog vanjkog napona na diodi, driftna i difuzijska struja se poništavaju.

Približenje 3. Smatra se da su na rubovima barijere koncentracije većinskih nosilaca puno veće od manjinskih.

Približenje 4. Kod slabe injekcije u kvazineutralnoj zoni manjinski nosioci se uglavnom gibaju difuzno.

Približenje 5. Uzima se da su struje unutar barijere prostorno nepromjenljive zbog male širine barijere.

5.1.7.2 Kontaktni potencijal

Zbog polja prostornog naboja na rubovima osiromašenog područja vlada tzv. kontaktni potencijal. Kontaktni potencijal odgovara energiji E_K koju treba dodati većinskim nosiocima s dna vrpce da bi mogli difundirati na suprotnu stranu. Kao što se vidi sa slici 5.6, potencijalna energija zabranjene vrpce jednaka je zbroju kontaktne potencijalne energije i energetske širine E_1 i E_2 . Pri čemu je E_1 udaljenost Fermijeva nivoa od vrha valentne vrpce na P strani odnosno E_2 udaljenost Fermijeva nivoa od dna vodljive vrpce na N strani. Koristeći izraz (5.17) dobivaju se vrijednosti energija E_1 i E_2 :

$$E_1 = E_F - E_V = -kT \ln \left(\frac{N_A}{N_V} \right), \quad (5.18)$$

$$E_2 = E_C - E_F = -kT \ln \left(\frac{N_D}{N_C} \right).$$

Dakle kontaktni potencijal jednak je :

$$U_K = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right). \quad (5.19)$$

5.1.7.3 Propusna i inverzna polarizacija

Ako se na poluvodičku diodu dovede napon tako da je P strana diode na višem potencijalu od N strane dolazi do smanjenja električnog polja u barijeri. Ovo smanjenje polja odražava se kao smanjenje potencijalne barijere. To ima za posljedicu povećanje broja većinskih nosilaca koji difuzijom prelaze na suprotnu stranu. U ovom slučaju manjinski nosioci ne mogu driftom strujom kompenzirati priliv većinskih nosilaca. Ova razlika u strujama stvara povišenje gustoće manjinskih nosilaca uz rub osiromašenog područja *injekcija manjinskih nosilaca*. S druge strane promjena koncentracije većinskih nosilaca se može praktički zanemariti te se umjesto koncentracije većinskih nosilaca na rubu zone može pisati ravnotežna koncentracija:

$$n_{n0} \cong n_{0n} \text{ i } p_{p0} \cong p_{0p}. \quad (5.20)$$

Unutar barijere vlada jako električno polje i velik gradijent koncentracije nosilaca naboja. To ima za posljedicu velike struje difuzije i drifta koje se poništavaju. Pretpostavlja se da je i kod propusne polarizacije razlika tih struja puno manja od svake posebno. Dakle može se uzeti da je driftna struja nosilaca jednaka difuznoj struji nosilaca unutar barijere:

$$e\mu_h p \xi \cong eD_h \frac{dp}{dx}, \quad (5.21)$$

gdje su:

D_h difuzijska konstanta za šupljine [m^2s^{-1}],
 μ_h pokretljivost šupljina [$\text{m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$].

Lijeva strana jednakosti je struja koja teče kroz neku točku zbog djelovanja polja $\xi(x)$, a desna strana je difuzijska struja zbog postojanja gradijenta. prema Einsteinovoj relaciji između vodljivosti i difuzijske konstante dobiva se diferencijalna jednačina:

$$\xi(x)dx = -dU = \frac{kT}{e} \frac{dp}{p}. \quad (5.22)$$

Rješavanjem dif. jednačine (5.22) uz rubni uvijete vidi sliku: $p_b=p_{n0}$ i $p_a=p_{p0}$ te se napokon dobiva:

$$p_{n0} = p_{p0} \exp\left(\frac{eU}{kT}\right). \quad (5.23)$$

Izraz (5.19), prema [lit 4], može se pisati kao:

$$U_K = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{p_{0p}}{p_{0n}}\right). \quad (5.24)$$

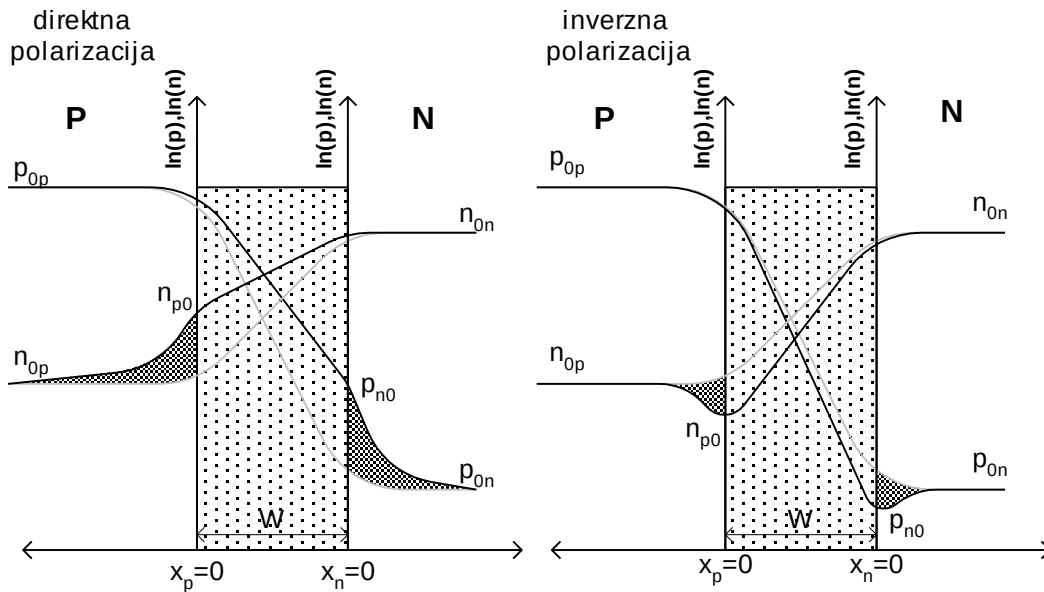
Odnosno, koncentracija većinskih nosilaca može se izraziti preko koncentracije manjinskih nosilaca eksponencijalnom vezom:

$$p_{n0} = p_{p0} \exp\left(-\frac{eU_K}{kT}\right). \quad (5.25)$$

Zanemareli se padovi napona na kvazi neutralnim dijelovima diode može se reći da se sav vanjski napon U primjenjuje zapravo na barijeri. Efektivni napon na barijeri $V_{b,ef}$ je zapravo $V_{b,ef} = U - U_K$. Kombiniranjem izraza (5.25) i (5.26) napokon se dobiva izraz za promjenu manjinskih nosilac uslijed promjene vanjskog napona:

$$p_{n0} = p_{0n} \exp\left(\frac{eU}{kT}\right). \quad (5.26)$$

Slično se može izvesti za manjinske elektrone na P strani. Injekcija manjinskih nosilaca pri direktnoj odnosno inverznoj polarizaciji prikazana je na slici 5.7.



Slika 5.7. Injekcija manjinskih nosilaca kod direktne i inverzne polarizacije

Ako je napon propusne polarizacije takav da je koncentracija injektiranih manjinskih nosilaca puno manja od ravnotežne koncentracije većinskih nosilaca, riječ je o *režimu niske injekcije*. Povećana koncentracija manjinskih nosilaca uz rub barijere omogućava difuzijsko gibanje manjinskih nosilaca. S obzirom na pretpostavku o režimu niske injekcije zbog male količine manjinskih nosilaca driftna struja se može zanemariti u odnosu na difuzijsku. S udaljšavanjem od barijere prema volumenu ukupnu struju diode preuzimaju većinski nosioci. Na slici 5.7 kvalitativno je prikazan dijagram koncentracije nosilaca naboja za reverznu i direktnu polarizaciju.

5.1.7.4 Struja manjinskih nosilaca u PN diodi

Struja manjinskih šupljina u **kvazi neutralnoj zoni** je prema spomenutom približenju 4, jednaka difuznoj komponenti:

$$J_h = -qD_h \frac{dp}{dx}, \quad (5.27)$$

pri čemu je D_h difuzijska konstanta za šupljine a q napoj elektrona. Isto tako se može za šupljine primjeniti zakon kontinuiteta za područje izvan barijere (kvazi-neutralno područje):

$$\frac{1}{q} \frac{dJ_h}{dx} = -(R - G), \quad (5.28)$$

gdje su

R i G [$1/\text{cm}^3\text{s}$] prostorne funkcije rekombinacije i generacije parova elektron-šupljina.

Postoji više modela rekombinacije i generacije parova slobodni elektron-šupljina i o njima će biti kasnije govora. Za ovo prikazivanje uzet ćemo da je funkcija generacije parova prostorno konstantna funkcija, dakle

$$G(x) = \text{const.} \quad (5.29)$$

Kao što će biti pokazano, brzina rekombiniranja parova može se prikazati formulom:

$$R(x) = \frac{\Delta p}{\tau_h}, \quad (5.30)$$

gdje je:

Δp odstupanje od ravnotežne koncentracije
 τ_h srednje vrijeme života šupljina do rekombinacije.

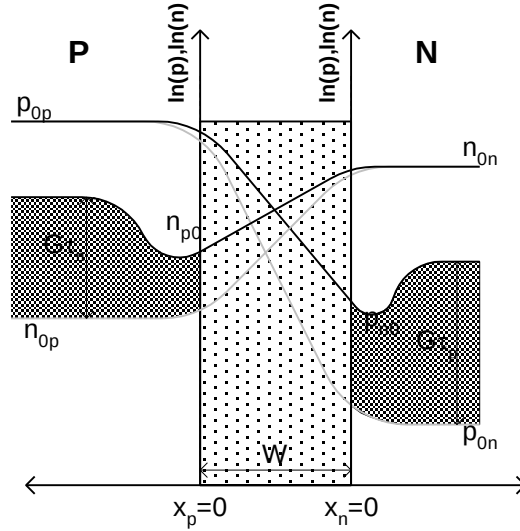
Kombiniranjem izraza (5.28), (5.29) i (5.30) dobiva se funkcija raspodjele manjinskih nosilaca. Izraz (5.26) se može shvatiti kao rubni uvjet za rješenje diferencijale jednadžbe odnosno:

$$p_n(x) = p_{0n} \left\{ 1 + \left(\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right) \exp\left(\frac{-x}{L_h}\right) \right\} + G\tau_h \left[1 - \exp\left(\frac{-x}{L_h}\right) \right], \quad (5.31)$$

pri čemu je

L_h difuzijska dužina manjinskih šupljina. $L_h = \sqrt{D_h \tau_h}$.

Sličan se izraz može izvesti za manjinske elektrone na P strani. Na slici 5.8 kvantitativno je prikazan dijagram raspodjele nosilaca naboja za slučaj da postoji stalan izvor generacije parova elektron-šupljina. Vidi se da je gradijent manjinskih nosilaca u većem djelu istog predznaka kao i kod reverzne polarizacije. To je posljedica raspodjele generiranih parova elektron-šupljina koja raste od barijere prema volumenu.



Slika 5.8 Raspodjela manjinskih nosilaca u slučaju generacije parova (svjetla karakteristika)

Difuzna struja manjinskih nosilaca dobiva se primjenom formule (5.27) na izraz (5.31). Dobiva se za manjinske šupljine:

$$J_h = \frac{qD_h p_{0n}}{L_h} \left[\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right] \exp\left(\frac{-x}{L_h}\right) - qGL_h \exp\left(\frac{-x}{L_h}\right). \quad (5.32)$$

Odnosno za manjinske elektrone:

$$J_e = \frac{qD_e n_{0p}}{L_e} \left[\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right] \exp\left(\frac{-x}{L_e}\right) - qGL_e \exp\left(\frac{-x}{L_e}\right). \quad (5.33)$$

Primjenom zakona kontinuiteta, izraz (5.28), na **osiromašenom području** uz pretpostavke $R \approx 0$, i $G(x) = \text{const.}$ daje:

$$|J_h(x_n) - J_h(x_p)| = qGW, \quad (5.34)$$

$$|J_e(x_n) - J_e(x_p)| = qGW.$$

S obzirom na relativnu malu širinu zabranjenog W pojasa može se uzeti da je promjena struje linearna. Ukupna struju kroz fotonaponsku čeliju jednaka je struji vanjskog kruga J . To znači da je na svakom mjestu u diodi (čeliji) zbroj struja manjinskih i većinskih nosilaca jednak vanjskoj struji J . Pri tom je važno imati na umu da je ukupna struja prostorno nepromjenljiva.

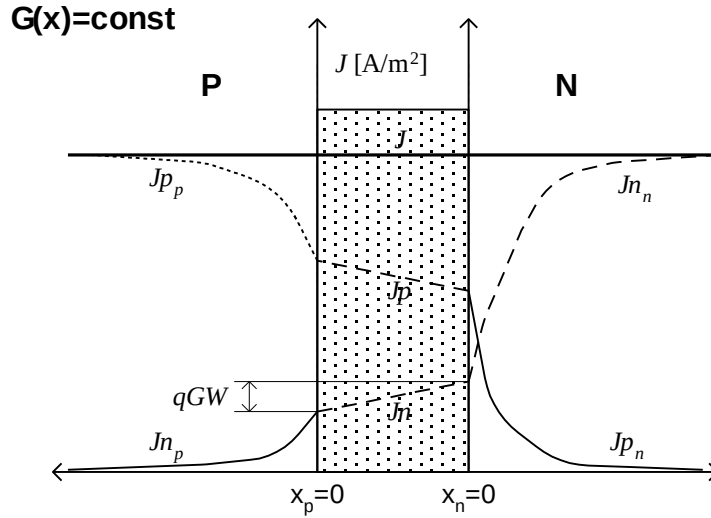
$$J = Jn_n + Jp_n = Jn_p + Jp_p = Jn_i + Jp_i, \quad (5.35)$$

gdje su :

Jn_n ukupna struja većinskih elektrona ,
 Jp_n ukupna struja manjinskih šupljina,

- J_{p_p} ukupna struja većinskih šupljina,
 J_{n_p} ukupna struja manjinskih elektrona,
 J_{p_i} ukupna struja šupljina u barijeri,
 J_{n_i} ukupna struja elektrona u barijeri.

Ne ulazeći u oblik većinskih struja i vodeći računa o rubnim uvjetima mogu se na jednom dijagramu prikazati sve struje kroz fotonaponsku ćeliju, slika 5.9;



Slika 5.9 Strujni dijagram u fotonaponskoj ćeliji

Prema tome za rubove barijera vrijedi:

$$\begin{aligned}
 J &= J_{n_p}(x_p=0) + J_{p_p}(x_p=0), \\
 J &= J_{n_n}(x_n=0) + J_{p_n}(x_n=0).
 \end{aligned}
 \quad (5.36)$$

Uvažavajući zakon kontinuiteta na rubovima barijera napokon se dobiva:

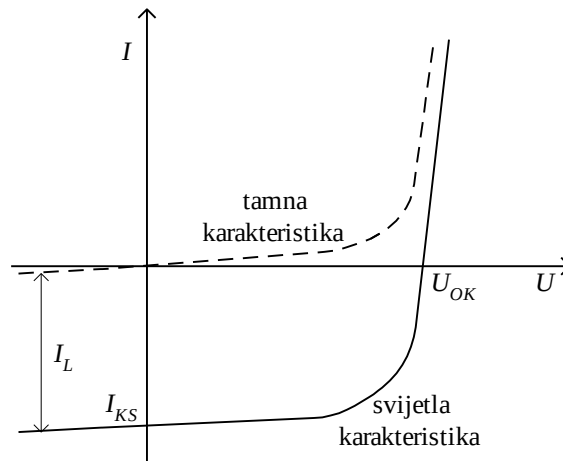
$$J = J_{n_p}(x_p = 0) + J_{p_n}(x_n = 0) + qGW. \quad (5.37)$$

Kao što se vidi iz izraza (5.37), struja kroz fotonaponsku ćeliju može se izračunati na temelju poznavanja struja manjinskih nosilaca na rubovima barijere. Do potpunog izraza lako se dolazi koristeći izraze (5.33) i (5.34), uzimajući da je $x=0$.

$$J = n_i^2 \left(\frac{qD_n}{L_n N_A} + \frac{qD_p}{L_p N_D} \right) \left(\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right) - qG(L_n + W + L_p). \quad (5.38)$$

Pri čemu su izrazi za ravnotežne koncentracije manjinskih nosilaca n_{0p} i p_{0n} zamijenjeni prema izrazu (5.16). Posljednji izraz u formuli je gustoća tzv. fotostruje. Množeći gustoću struje s površinom fotonaponske ćelije A dobivamo konačni oblik I-U karakteristike fotonaponske ćelije.

$$I = I_0 \left(\exp \left(\frac{qU}{kT} \right) - 1 \right) - I_L \quad (5.39)$$



Slika 5.10 U-I karakteristika fotonaponske ćelije

5.1.8 Mehanizmi generacije i rekombinacije parova

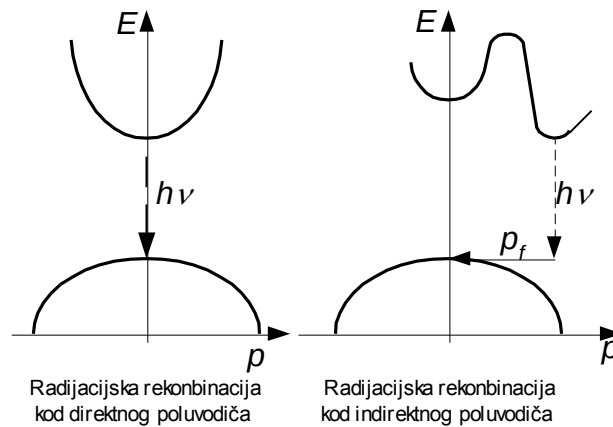
U poglavlju 5.1.6 je pokazano da produkt koncentracija nosilaca naboja ne ovisi o fermijevom nivou nego samo o temperaturi. To znači da je za stalnu temperaturu u ravnotežnoj situaciji produkt $np = \text{const}$. Kvadratni korijen umnoška ravnotežnih koncentracija n_i naziva se koncentracija intrističnih naboja. Stalna vrijednost umnoška koncentracija elektrona i šupljina ne znači da su te koncentracije stalne. Naime to samo znači da je broj novo generiranih nosilaca jednak onim rekombiniranih. Dakle poluvodič se nalazi u stanju dinamičke ravnoteže. Ako iz bilo kojeg razloga dođe do poremećaja ravnotežnog produkta koncentracija, npr. poveća se broj nosilaca $np > n_i^2$ doći će do pojačanja rekombinacijskih procesa koji će smanjiti koncentracije nosilaca. Postoji više mehanizama generacije i rekombinacije parova elektron šupljina. Ovdje će se ukratko predstaviti nekoliko najvažnijih. Za sve mehanizme rekombinacije može se uvesti zajedničko mjerilo: *vrijeme života* τ .

$$\tau_e = \frac{\Delta n}{R}, \quad \tau_h = \frac{\Delta p}{R}. \quad (5.40)$$

Radijacijska rekombinacija se odnosi na prijelaz elektrona iz vodljive u valentnu vrpce uz emisiju svjetlosti frekvencije određene širinom zabranjenog područja. Ovaj proces je suprotan hvatanju fotona i nastajanju para elektron-šupljina. Kod direktnog tipa poluvodiča⁷ proces se mnogo češće javlja nego kod indirektnog tipa. U prvom slučaju elektroni izravno prelaze iz vodljivog u valentni pojas uz emisiju svjetlosti. Kod indirektnih poluvodiča uz emisiju svjetlosti dolazi i do emisije fonona. Razlog tomu je što se krajnja stanja prijelaza ne

⁷ Dno vodljive vrpce i vrh valentne vrpce javlja se pri istoj količini gibanja.

nalaze pri istom količini gibanja kristalne rešetke. Fononi su kvanti oscilatornog gibanja kristalne rešetke s malom energijom i velikom količinom gibanja (za razliku od fotona).



Slika 5.11 Rekombinacija parova kod direktnog i indirektnog poluvodiča

Broj radijacijskih rekombinacija proporcionalan je produktu koncentracija elektrona i šupljina.

$$R_{RAD} = Bnp. \quad (5.41)$$

Pri čemu faktor B ovisi o vrsti poluvodiča. U termalnoj ravnoteži ovaj proces je uravnotežen generacijom parova za koju vrijedi:

$$np = CT^3 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right). \quad (5.42)$$

Prema tome radijacijski procesi rekombinacije/generacije mogu se iskazati jednom formulom. Pri čemu pozitivna vrijednost znači da prevladava rekombinacija a negativna vrijednost da prevladava generacija parova;

$$R_R = B(np - n_i^2). \quad (5.43)$$

Ako uzmemo da su n_0 i p_0 ravnotežne koncentracije dane izrazima (5.11) i (5.13) i da svakoj promjeni koncentracije elektrona Δn odgovara ista vrijednost promjene koncentracije šupljina $\Delta p = \Delta n$, dobiva se vrijednost vremena života nosilaca kod radijacijske rekombinacije:

$$\tau = \frac{n_0 p_0}{B n_i^2 (n_0 + p_0)}. \quad (5.44)$$

Augerova rekombinacija se javlja kada se pri rekombinaciji oslobođena energija predaje drugom slobodnom elektronu ili šupljini koji prelaze u viša energetska stanja. Nakon toga slijedi relaksacija elektrona/šupljine iz viših u niža stanja emisijom fonona. Ovaj proces se

javlja kod većih koncentracija primjesa, za siliciju to je preko 10^{17} cm^{-3} . Vremena života nosilaca za ovu reakciju su:

$$\tau_e = \frac{1}{Cnp + Dn^2}, \quad \tau_h = \frac{1}{Cnp + Dp^2}. \quad (5.45)$$

Stepenasta rekombinacija preko nečistoća. Ovaj proces je najčešće povezan s kvalitetom izrade fotonaponskih ćelija. Nečistoće unutar poluvodiča ostavljaju energetske zone u zabranjenoj zoni. Takvi nivoi olakšavaju prelazak nosilaca iz vodljive u valentnu vrpce i obrnuto. Teoriju generacije i rekombinacije kroz energetska stanja unutar zabranjene vrpce uspješno su objasnili Shokley, Read i Hall (SRH teorija) [lit 4]. Mjera rekombinacije kroz energetska stanja unutar zabranjene vrpce je [lit 6]

$$R_T = \frac{np - n_i^2}{\tau_{ho}(n + n_1) + \tau_{e0}(p + p_1)}. \quad (5.46)$$

gdje su:

- τ_{e0} i τ_{ho} specifična vremena života koja ovise o vrsti i koncentraciji onečišćenja[s] ,
- n_1, p_1 se dobivaju korištenjem izraza (5.47),
- E_t energetski nivo onečišćenja unutar zabranjene vrpce.

$$E_t = N_C \exp\left(\frac{E_t - E_C}{kT}\right). \quad (5.47)$$

Rekombinacija preko energetskih centara unutar zabranjene zone je najveća ako su centri unutar zabranjene vrpce.

Rekombinacija na površini je neizbježan proces s obzirom da se na površini se prekida kristalna struktura, te se zbog toga unutar zabranjene zone javlja niz dozvoljenih stanja. Ako se površinska rekombinacija aproksimira jednim energetskim nivoom unutar zabranjene vrpce dobiva se izraza za mjeru rekombinacije:

$$R_A = \frac{S_{e0}S_{h0}(np - n_i^2)}{S_{e0}(n + n_1) + S_{h0}(p + p_1)}. \quad (5.48)$$

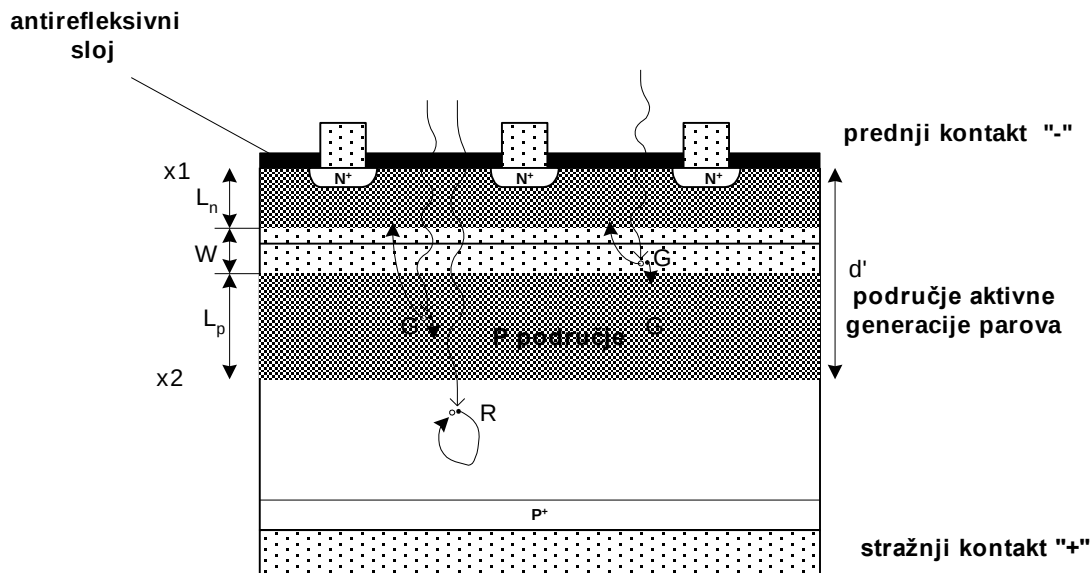
Gdje su S_{e0} i S_{h0} su brzine površinske rekombinacije [lit 6]. Često se u jednadžbama koristi nadomjesno vrijeme života nosilaca za sve procese rekombinacije. U tom slučaju mjera rekombinacije U se jednostavno može napisati (jedno dimenzionalni primjer):

$$R(x) = \frac{p(x) - p_o}{\tau_h} = \frac{n(x) - n_o}{\tau_e}. \quad (5.49)$$

5.1.9 Realni odnosi struje i napona u fotonaponskoj diodi.

Strujno naponska karakteristika (5.39) je teorijska funkcija izvedena uz niz pretpostavki koji će ovdje biti sistematizirane.

1. Dioda je aproksimirana s dva homogena područja. Područje električki neutralno područje bez slobodnih nosilaca.
2. Dioda radi u režimu niske injekcije. To znači da je koncentracija manjinskih nosilaca uz rub barijere nakon injekcije još uvijek puno manja od ravnotežne koncentracije većinskih nosilaca.
3. Manjinski nosioci se uglavnom gibaju difuzno.
4. Sve struje unutar barijere su prostorno nepromjenljive.
5. Vanjsko električno polje aplicira se samo na barijeru
6. Unutar barijere zanemaruje se rekombinacija
7. Funkcija generacije parova je prostorna konstantna funkcija.



Slika 5.12 Generacija i rekombinacija parova, aktivno područje ćelije

U slučaju realnih fotonaponskih ćelija treba voditi računa o sljedećim gubicima:

Na smanjenje struje kratkog spoja utječe:

- refleksivnost materijala od kojeg je napravljena ćelija
- električki kontakti pokrivaju 5 - 15% površine ćelije
- ako ćelija nije dovoljne debljine (ovisi o apsorptivnosti materijala) dio zračenja se gubi prolaskom kroz ćeliju
- parovi elektron šupljina nastali u dubini ćelije, daleko od potencijalne barijere imaju veliku vjerojatnost rekombinacije.

Smanjenje napona otvorenog kruga se naročito očituje kroz rekombinacijske procese. Iz jednadžbe (5.39) lako se može izvesti ovisnost napona otvorenog kruga tehničkim karakteristikama ćelije:

$$U_{OK} \approx \frac{E_g}{e} + \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_L}{eAN_c N_v \left(\frac{1}{N_A} \sqrt{\frac{D_e}{\tau_e}} + \frac{1}{N_D} \sqrt{\frac{D_h}{\tau_h}} \right)} \right). \quad (5.50)$$

Iz (5.50) se vidi da je napon otvorenog kruga uvijek manji od širine zabranjenog pojasa. Za siliciju U_{OK} je cca 60 % od E_g . Povećavanjem koncentracija primjesa raste napon otvorenog kruga. S obzirom da se donja vrijednost koncentracija primjesa može tehnološki regulirati, to N_D i N_A nisu ključni za smanjenje napona otvorenog kruga. Puno važniji efekt je rekombinacija parova kako u unutrašnjosti ćelije tako i u osiromašenom području. Posebno značajnu ulogu imaju stepenaste rekombinacije zbog nečistoća u unutar osiromašenog područja kao i površinske rekombinacije. U razvoju strujno naponskih odnosa ovaj efekt je zanemaren. Međutim uzme li se u obzir i ova rekombinacija koja postaje značajna kod viših napona strujno naponska karakteristika poprima oblik [lit 6.], [lit 9.]:

$$I = I_0 \left(\exp \left(\frac{qU}{kT} \right) - 1 \right) + I_w \left(\exp \left(\frac{qU}{2kT} \right) - 1 \right) - I_L, \quad (5.51)$$

pri čemu je:

I_0 struja zasićenja prema (5.38),
 I_w struja zasićenja zbog stepenaste rekombinacije unutar osiromašenog područja.⁸

Gustoća struje J_w je dana izrazom: [lit 6.]

$$J_w = \frac{en_i^2 \pi}{2\sqrt{\tau_{e0}\tau_{h0}}} \frac{kT}{e\xi_{\max}}, \quad (5.52)$$

gdje je

$\xi_{\max}$ najveća vrijednost električnog polja unutar osiromašenog područja.

Potrebno je spomenuti da se izraz (5.51) može napisati i jedno-eksponencijalnom funkcijom [lit 2], [lit 6], [lit 8.].

$$I = I_0' \left(\exp \left(\frac{qU}{nkT} \right) - 1 \right) - I_L \quad (5.53)$$

⁸ Pretpostavlja se da postoji samo jedan energetski nivo unutar zabranjene vrpce.

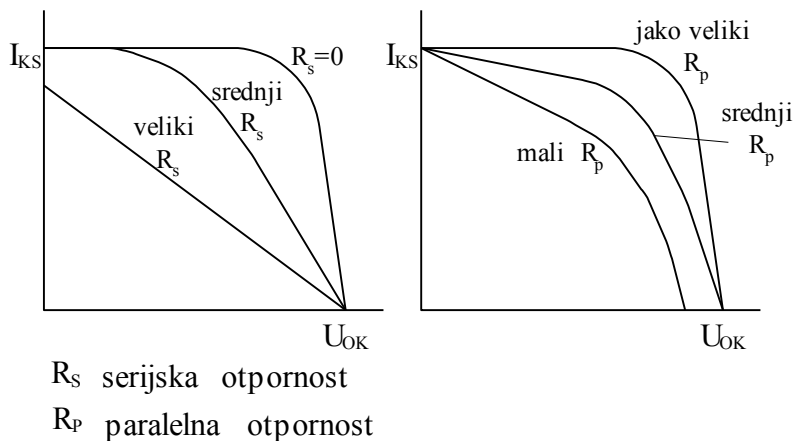
Faktor n u jednadžbi (5.53) naziva se *faktor idealnosti* i ma vrijednost između 1 i 2. Međutim analizom realnih karakteristika pomoću ove jednadžbe dobiva se za n vrijednost blizu 4, što nema fizikalno objašnjenje, te se za realnije modele rađe koristi izraz (5.51)

Realna fotonaponska ćelija ima također parazitske otpore kao izvor gubitaka. Otpori se mogu podijeliti u dvije skupine.

Serijsku otpornost predstavljaju svi oni efekti koji smanjuju napon ćelije usljed protjecanja struje. U to spada otpornost samog materijala od kojeg je napravljena fotonaponska ćelija, otpornost metalnih kontakta i međukontakta, kontaktna otpornost između metala i poluvodiča.

Paralelna otpornost ili shunt odnosi se na one efekte koji smanjuju struju ćelije. To je odraz lokalnih defekata u blizini pn spoja.

Oba ova efekta utječu na smanjenje djelotvornosti fotonaponske ćelije. Kod realnih fotonaponskih ćelija serijska otpornost R_s iznosi cca. $0,0025 \Omega m^2$ a paralelna oko $0,25 \Omega m^2$. U ovom modelu uzeto je u obzir postojanje parazitskih otpornosti s tim da je uzeto da su to konstantne vrijednosti. Slika 5.13 pokazuje kako parazitske otpornosti utječu na strujno naponske odnose u realnoj fotonaponskoj ćeliji.



Slika 5.13 Utjecaj parazitske otpornosti na djelotvornost ćelija

5.2 Matematički model fotonaponskog modula

Model fotonaponskog modula je matematička interpretacija fizikalnih procesa unutar fotonaponskog modula. To je alat kojim se simulira rad modula pri različitim uvjetima rada. Ovdje su razmatrana dva modela, električni i termički. Prvi model daje strujno naponsku karakteristiku modula pri određenoj temperaturi i ozračenju. Drugi model daje temperaturu samog modula pri određenoj temperaturi okoline i ozračenju. Postoje dva osnovna pristupa kod modeliranja: analitički i empirijski pristup.

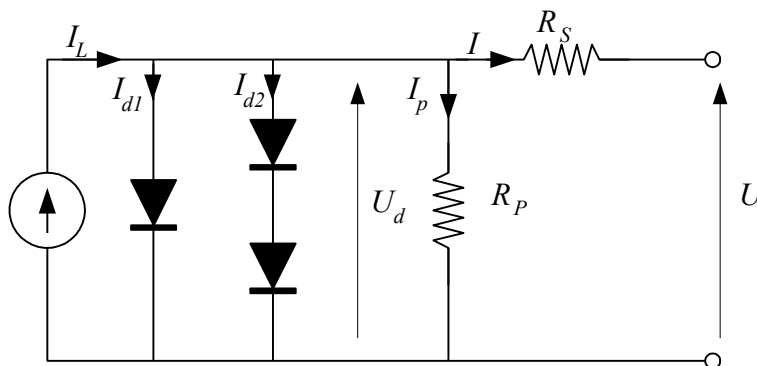
Analitički pristup slijedi iz fizikalnog razumijevanja procesa unutar modula. Parametri se određuju na temelju laboratorijskih mjerenja i imaju fizikalno značenje. Vrlo često se radi o temperaturno ovisnim parametrima.

Dok sa druge strane empirijski model, jednostavnijeg je oblika, često ima isti oblik kao i analitički ali je prilagođen računalnoj obradi. Parametri obično nemaju fizikalno značenje.

Strujno naponska karakteristika modula se izvodi na temelju izraza (5.39). To je Schockley-jev izraz za idealnu diodu. Međutim, odnosi u realnom modulu nisu idealni, stoga se u model uvode parametri proizašli iz razmatranja prirode gubitaka u modulu.

5.2.1 Analitički model fotonaponske ćelije.

Fotonaponska ćelije se može prikazati nadomjesnim strujnim krugom prikazanim na slici 5.14.



Slika 5.14 Nadomesna električna shema fotonaponskog modula

Strujno-naponska karakteristika fotonaponskog modula se izvodi iz prvog Kirhofovog pravila za nadomjesni strujni krug prikazan na slici 5.14:

$$I = I_L - I_{d1} - I_{d2} - I_p, \quad (5.54)$$

gdje su struje I , I_L , I_{d1} , I_{d2} i I_p objašnjeni u sljedećim poglavljima.

5.2.1.1 Fizikalno značenje fotogenerirane struje I_L

Izraz za fototostruju I_L , fotonaponske ćelije površine A neposredno je dan u (5.38) odnosno iz [6] slijedi:

$$I_L = J_L A = qG(L_n + W + L_p)A, \quad (5.55)$$

gdje je G mjera generacije parova usljed djelovanja svjetlosti. Mjerna jedinica od G je broj parova u jedinici vremena. To je obično prostorna funkcija, ali se ovdje uzima da je približno konstantna u aktivnom području ćelije širine $L_n + W + L_p$. Inače, G se može izračunati kao srednja vrijednost od $G(x)$ pri čemu je;

$$G(x) = \int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} \eta_c(\nu) \Phi_{f0}(\nu) (1 - \rho_c(\nu)) \alpha_c(\nu) \exp[-\alpha_c(\nu)x] d\nu, \quad (5.56)$$

gdje je

- $\eta_c(\nu)$ spektralna kvantna djelotvornost tvorbe parova, (broj generiranih parova po apsorbiranom fotonu.⁹ [lit 10.]),
- $\rho_c(\nu)$ spektralna refleksivnost površine ćelije,
- Φ_{f0} inicijalni tok fotona na površini ćelije,
- $\alpha_c(\nu)$ spektralna apsorbivnost ćelije.

Tok fotona je broj fotona koji okomito prolaze kroz presjek od 1m^2 u jedinici vremena. Ako se tok pomnoži s energijom fotona dobiva se spektralna gustoća snage Sunčevog zračenja:

$$E(\nu) = \Phi_{f0}(\nu) h\nu \left[\frac{W}{m^2} \right], \quad (5.57)$$

Treba uzeti u obzir da se gustoća toka mjenja s kutom pod kojim upada tok fotona na površinu i ovisnost faktora refleksije o upadnom kutu. Tad se jednadžba (5.55) može napisati kao:

$$J_L = q \int_{x1}^{x2} \int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} \frac{\eta(\nu) [1 - \rho(\nu, \theta)] \alpha(\nu) E(\nu, \theta) \exp(-\alpha(\nu)x)}{h\nu} dx d\nu, \quad (5.58)$$

gdje su $x1$ i $x2$ definirani na slici 5.12. Nakon integracije po aktivnom području dobiva se:

$$J_L = q \int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} \frac{\eta(\nu) [1 - \rho(\nu, \theta)] E(\nu, \theta) [1 - \exp(-\alpha(\nu)d)]}{h\nu} d\nu. \quad (5.59)$$

⁹ Za fotone visoke energije, događa se sekundarna tvorba kao posljedica udarne jonizacije primarno stvorenog elektrona.

S obzirom da faktor refleksije ovisi o kutu upada sunčevih zraka na ravnu plohu a širina osiromašenog područja d' zavisi o temperaturi može se zaključiti da je fotogenerirana struja funkcija *temperature, spektralne raspodjele i upadnog kuta* sunčevih zraka na plohu. Dakle, općenito se može napisati [lit.11]:

$$J_L = F_1(m, \theta, T), \quad (5.60)$$

gdje je m apsolutna vrijednost mase zraka za određenu lokaciju (vidi dodatak),
 θ upadni kut na plohu modula,
 T temperatura modula.

Veličine koje su mjerljive su ozračenost plohe i temperatura zraka. Na temelju tih veličina treba odrediti vrijednost fotostruje. Analizom analitičkog izraza (5.59) može se konačno napisati emepirijski izraz za fotogeneriranu struju pomoću mjerljivih veličina:

$$J_L = J_{L0} \frac{E}{E_0} f_1(m) f_2(\theta) f_3(T) = aE, \quad (5.61)$$

pri čemu su

$E [W/m^2]$	vrijednost ozračenja plohe modula mjereno širokopojasnim piranometrom na bazi termoparova,
$E_0 = 1000 W/m^2$	nazivna vrijednost ozračenja sa spektralnom raspodjelom koja odgovara masi zraka od $m=1.5$ i $T=25^\circ C$,
J_{L0}	gustoća fotostruje pri nazivnom ozračenju, spektralnoj raspodjeli i temperaturi.

Temperaturna ovisnost: fotostruja ovisi o širini efektivne zone generacije parova širine $W + L_e + L_h$. Difuzijske dužine L_e , i L_h su slabo temperaturno ovisne a širina osiromašenog područja osim o temperaturi ovisi još i o naponu. S obzirom da je W (cca $1 \mu m$) puno manja od difuzijskih dužina (cca $50 \mu m$) to se utjecaj širine zabranjenog pojasa može zanemariti prema difuzijskim dužinama elektrona i šupljina. Dakle faktor a (5.61) je slabo promjenljiva varijabla te se u modelu smatra konstantom. Obično se u točnijim analizama temperaturna ovisnost predstavlja lineranom funkcijom:

$$\frac{\partial J_L}{J_L \cdot \partial T} = \alpha_L = (0.03\% - 0.06\%). \quad (5.62)$$

Spektralna ovisnost: se ogleda u promjeni energetske gustoće Sunčevog prizemnog zračenja. Promjena vrijednosti integrala iz (5.58) nastupa jer se različite frekvencije sunčevog zračenja različito prigušuju prolazom kroz atmosferu i različito reagiraju u doticaju s fotonaponskom ćelijom. Kvantizacija utjecaja atmosfere na tok fotona određene valne duljine je tzv. masa zraka (vidi DODATAK). Drugim riječima, neke frekvencije više doprinose fotoefektu od drugih, a njihova relativna zastupljenost se mijenja s putem svjetlosti kroz atmosferu.

S druge strane, vrijednost zračenja izmjerena piranometrom s termoparovima nije dobar pokazatelj utjecaja promjene spektra na rad ćelije. Razlog je u različitim spektralnim odzivima piranometra i fotonaponske ćelije. Spektralni odziv se definira kao omjer primljene (izmjerene) gustoće energetskega toka i stvarnog toka. Razlike između tih vrijednosti nastaju zbog refleksije i transmisije. Unošenjem korekcijskog faktora može se dobro opisati utjecaj spektra na struju kratkog spoja. Korekcijski faktor $f(m)$ iz jednadžbe (5.60) može se prikazati empirijskim izrazom:

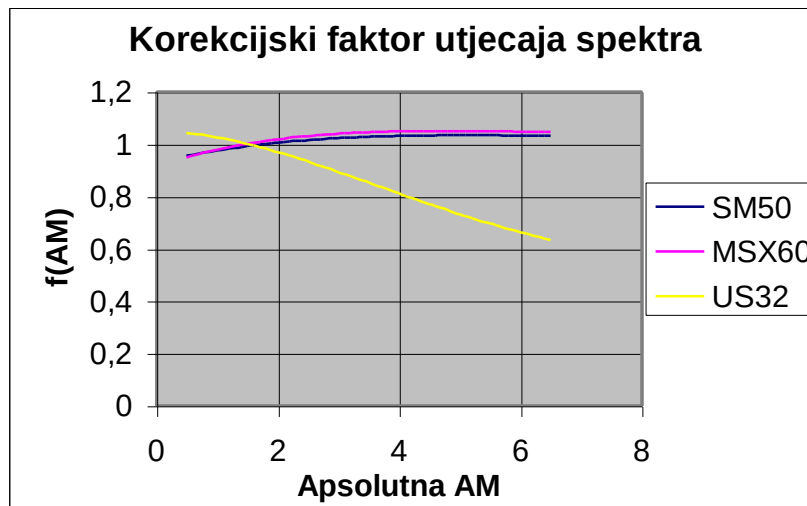
$$f_1(m) = A_0 + A_1m + A_2m^2 + A_3m^3 + A_4m^4. \quad (5.63)$$

Temeljem mjerenja pri idealno čistoj atmosferi [lit. 11] određeni su koeficijenti empirijske formule za većinu poznatih fotonaponskih modula. Tablica 5.1 prikazuje neke koeficijente:

Tablica 5.1 Koeficijenti korekcijskog polinoma f_1

koeficijenti	SM50	MSX60	US32
A_0	0,93	0,913	1,047
A_1	0,054228	0,079168	0,000821
A_2	-0,0099	-0,01598	-0,0259
A_3	0,00073	0,001306	0,003174
A_4	-0,000019	-0,000037	-0,00011

Pri **stalnoj** temperaturi i upadnim kutom na plohu, korekcijski faktori za tri fotonaponska modula prikazan su na slici 5.15.



Slika 5.15 Korekciona funkcija.

Utjecaj upadnog kuta: se očituje kroz dva fenomena. Prvi, tzv. *kosinusni efekt*, je povećanje površine za istu količinu fotonskog toka pri čemu se smanjuje gustoća zračenja, dok je drugi efekt posljedica povećanja refleksivnost pokrovnog materijala fotonaponske ćelije pri povećanju upadnog kuta. U jednadžbi (5.60) gustoća energetskega toka je zapravo integral po svim mogućim kutovima upada sunčevih zraka. Prolaskom kroz atmosferu samo jedan dio zračenja zadrži smjer a ostalo zračenje dolazi iz svih smjerova kao raspršeno zračenje. Dakle,

cjelokupni energetski tok sastoji se od tri djela: direktnog, difuznog i reflektiranog. Efekt refleksije odnosi se na direktno zračenje koje pada na plohu FNM [lit 11]. Dakle, s vrijedi:

$$E = E_{bn} \cos(\theta) f_2(\theta) + E_d + E_r, \quad (5.64)$$

gdje su:

E_{bn} direktna komponenta zračenja okomita na zraku Sunca,
 E_d dio difuzna komponenta zračenja koja upada na plohu modula,
 E_r dio reflektirano zračenja od tla i okolnih predmeta koje upada na plohu modula.

Funkcija korekcije $f_2(\theta)$ ovisi o tipu modula i predstavljena je empirijski izrazom [lit. 11]:

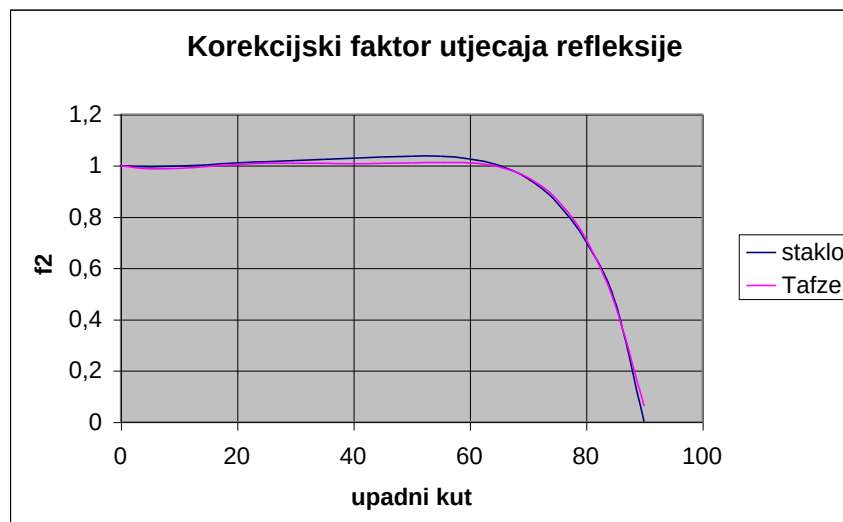
$$f_2(\theta) = B_0 + B_1\theta + B_2\theta^2 + B_3\theta^3 + B_4\theta^4 + B_5\theta^5. \quad (5.65)$$

Primjeri korekcijskih koeficijenata f_2 za tri različite modula i različita pokrove dani su u tablici 5.2.

Tablica 5.2 Koeficijenti korekcijskog polinoma f_2

koeficijenti	SM50	MSX60	US32
tip gornjeg pokrova	staklo	staklo	polimer Tafzel™
B_0	1	1	1
B_1	-0,0024	-0,0024	-0,005
B_2	0,000310	0,000310	0,000584
B_3	-1,2e-5	-1,2e-5	-2,3e-5
B_4	2,11e-7	2,11e-7	3,83e-7
B_5	-1,4e-9	-1,4e-9	-2,3e-9

Na slici 5.16 prikazani su korekcijski faktori za različite vrste pokrova.



Slika 5.16 Korekcijska funkcija utjecaja reflesije pokrova.

Konačno se fotogenerirana struja može izračunati na temelju sljedećeg poluemirijskog izraza:

$$I_L = I_{L0} \frac{E_{bn} \cos(\theta) f_2(\theta) f_1(m) + E_d + E_r}{E_O} [1 + \alpha_L (T - T_0)]. \quad (5.66)$$

5.2.1.2 Fizikalno objašnjenje modela dioda u analitičkom modelu fotonaponske ćelije

Zbog postojanja rekombinacije unutar osiromašenog područja u slučaju režima visoke injekcije, porast koncentracije manjinskih nosilaca uz rub pn prijelaza raste sporije nego što se to vidi iz Shocklyjeve jednadžbe. Uzimajući i te efekte u obzir, u jednadžbi diode pojavljuje se još jedna komponenta koja se odnosi na spomenute efekte [lit 6.], (5.51), (slika 5.14):

$$I_D = I_{d1} + I_{d2} = I_0 \left(\exp \left(\frac{q}{kT} (U_D) \right) - 1 \right) + I_w \left(\exp \left(\frac{q}{2kT} (U_D) \right) - 1 \right) \quad (5.67)$$

Nadomjesna shema strujnih gubitaka prema izrazu (5.67) su dvije paralelne grane. U prvoj grani je dioda sa strujom zasićenja I_0 a u drugoj grani su dvije identične diode sa strujama zasićenja I_w . Diodni napon se u drugoj grani dijeli na dva jednaka djela, tako da se $U_D/2$ nalazi na svakoj diodi.

Struja I_w je proporcionalna s intrističnom koncentracijom, dok je I_0 proporcionalna kvadratu intristične koncentracije. Prema [9] može se pisati:

$$I_0 = F_0 T^3 \exp \left(-\frac{E_g}{kT} \right), \quad I_w = F_w T^{\frac{3}{2}} \exp \left(-\frac{E_g}{2kT} \right) \quad (5.68)$$

Jednostavniji oblik modela se dobije uvođenjem faktora idealnosti n , a dvoekspencijalni izraz se zamjenjuje jednoekspencijalnim izrazom. Matematički izraz jednoekspencijalnog modela glasi:

$$I_D = F T^3 \exp \left(-\frac{E_g}{kT} \right) \exp \left(\frac{U_D}{nkT} \right). \quad (5.69)$$

U tom slučaju u analitičkom modelu umjesto dvije paralelne grane ostaje samo jedna s diodom idealnosti n . Faktor n ima vrijednosti od 1 do 2. Iznimka su fotonaponske ćelije od amorfno silicija gdje ovaj faktor može postići fizikalno nemoguće vrijednosti (> 4). Nepoznati parametri (F_0 , F_w ili F_0 , n) se određuju snimanjem tamne karakteristike fotonaponske ćelije.

Napon U_D je napon na prvoj grani. To je superpozicija vanjskog napona i pada napona zbog serijskom otporu.

5.2.1.3 Fizikalno značenje otpora R_s i R_p u modelu

U poglavlju 5.1.9 opisani su razlozi smanjenje struje zbog unutrašnje otpornosti. U stvarnosti to su distribuirani parametri ali se u modelu češće prikazuju kao diskretne komponente. Općenito to su temperaturno ovisni parametri, osobito to vrijedi za serijski otpor R_s . Serijski i paralelni nadomjesni otpor su teško mjerljivi parametri te se stoga često određuju regresijom na temelju snimljene karakteristike.

Zbog serijskog otpora napon na kontaktima fotonaponske ćelije manji je od napona na nadomjesnim diodama za pad napona. Dakle:

$$U_d = U + IR_s. \quad (5.70)$$

Zbog paralelnog otpora R_p teče poprečna struja I_p .

$$I_p = \frac{U_d}{R_p} = \frac{U + IR_s}{R_p} \quad (5.71)$$

5.2.2 Određivanje parametara analitičkog modela.

Analitički model fotoanponske diode glasi:

$$I = I_L - I_0 \left(\exp \left(\frac{q}{kT} (U + IR_s) \right) - 1 \right) + I_w \left(\exp \left(\frac{q}{2kT} (U + IR_s) \right) - 1 \right) - \frac{U + IR_s}{R_p}. \quad (5.72)$$

Struje zasićenja I_0 i I_w su definirane izrazima:

$$I_0 = F_0 T^3 \exp \left(-\frac{Eg_0}{kT} \right), \quad I_w = F_w T^{\frac{3}{2}} \exp \left(-\frac{Eg_0}{2kT} \right). \quad (5.73)$$

Fotogenerirana struja se obično mijenja sa strujom kratkog spoja:

$$I_L = I_{L0} \frac{E_{bn} \cos(\theta) f_1(m) f_2(\theta) + E_d + E_r}{E_o} [1 + \alpha_L (T - T_0)]. \quad (5.74)$$

Parametri modela su:

- koeficijenti funkcije f_1 ($A1, A2, A3$ i $A4$) prema (5.9)
- koeficijenti funkcije f_2 ($B1, B2, B3, B4$ i $B5$) prema (5.11)
- temperaturni koeficijent struje kratkog spoja α_L
- koeficijent u struju zasićenja I_0 F_0
- koeficijent u struju zasićenja I_w F_w

- nadomjesni serijski otpor R_s
- nadomjesni paralelni otpor R_p

Parametri analitičkog modela određuju se na temelju mjerenja. Primjenom nelinearne regresijske analize mogu se odrediti parametri koji najbolje prilagođavaju model mjerenim rezultatima za široko područje radnih uvjeta (ozračenje, spektralni sastav, upadni kut i temperatura).

Neovisno o drugim parametrima prvo se određuju funkcija fotostruje, tj. fotogenerirane struje. Vrlo često se može zanemariti razlika između fotostruje i struje kratkog spoja:

$$I_L = I_{KS} \left(1 + \frac{R_s}{R_p} \right) \approx I_{KS}. \quad (5.75)$$

Izraz (5.66) je oblik funkcijske zavisnosti fotostruje u ovisnosti o radnim uvjetima. Imajući to u vidu lako se nepoznati parametri mogu odrediti mjerenjem. Npr. pri stalnom spektralnom sastavu zračenja i upadnom kutu, pri istoj vrijednosti ozračenja promatra se promjena struje kratkog spoja s temperaturom. Iz dijagrama ovisnosti, linearnom interpolacijom lako se odredi temperturni koeficijent struje kratkog spoja. Na sličan način se određuju i drugi parametri.

Parametri koji opisuju utjecaj pn spoja na otpornosti materijala mogu se odrediti mjerenjem tamne karakteristike ($I_L=0$). Kod određivanja vrijednosti serijskog otpora R_s često se uzima linearna funkcija po temperaturi [lit. 9], [lit. 13].

Ovaj model je nepraktičan za simulacijsku metodu usprkos svojoj točnosti. Za potrebe računalne simulacije razvijeno je niz poluempirijskih i empirijskih modela koji proizilaze iz fizikalne slike odnosno analitičkog modela.

5.2.3 Empirijski model fotonaponske ćelije/modula

Za razliku od analitičkog modela, empirijski model je razvijen na temelju opažanja i parametri modela često nemaju fizikalan smisao ali dobro opisuju proces. Zbog svoje jednostavnosti, empirijski model se često koristi u simulacijskim programima (nema iteracijskih petlji).

Najčešći model koji se koristi ima oblik [lit 2.].

$$I = I_{ks} (1 - K_3 \exp(K_4 U^p) - 1), \quad (5.76)$$

pri čemu je:

$$K_6 \approx 4,46, \quad K_5 = \ln \left(\frac{1,01175 I_{KS} - I_m}{0,01175 I_{KS}} \right), \quad p = \frac{\ln \left(\frac{K_5}{K_6} \right)}{\ln \left(\frac{U_m}{U_{OK}} \right)}, \quad K_4 = \frac{K_6}{U_{OK}^p}. \quad (5.77)$$

Mjerenjem struje i napona u tri različita pokusa: pokus kratog spoja, pokus otvorenog kruga, pokus optimalne snage mogu se odrediti parametri modela. Pri promjeni vanjskih uvjeta temperature, ozračenja, spektralnog sastava, upadnog kuta dobivaju se različite vrijednosti napona i struje u sva tri pokusa. Ponekad se te ovisnosti opisuju linearnim funkcijama [lit. 14]:

$$\begin{aligned} I_{KS} &= a_1 E + b_1 T, \\ I_M &= a_2 E + b_2 T, \\ U_{OK} &= a_3 E + b_3 T + c_3, \\ U_M &= a_4 E + b_4 T + c_4. \end{aligned} \quad (5.78)$$

Koeficijenti $a_1, a_2, a_3, a_4, b_1, b_2, b_3, b_4$ se određuju metodom najmanjih kvadrata (linearna regresija).

Polazeći od fizikalne slike mogu se funkcije iz (5.78) zamjeniti nelinearnim funkcijama koje puno točnije odražavaju promjenu karakterističnih veličina s promjenom vanjskih parametara. Analizom na velikom broju različitih modula, pri različitim uvjetima rada [lit. 11] dobivene su funkcije koje opisuju karakteristične električne veličine (5.78).

Funkcija struje kratkog spoja je opisana u prethodnom poglavlju izrazom (5.66). Sve ostale električne veličine (U_{OK}, I_M, U_M) dobro su definirane poznavanjem ponašanja struje kratkog spoja pri različitim radnim uvjetima. To znači za zadanu vrijednost struje kratkog spoja i temperature ćelije, strujno naponska karakteristika je uvijek ista za bilo koju spektralnu raspodjelu odnosno upadni kut. S tim u vezi definira se relativno ozračenje:

$$g = \frac{I_{KS}(E, T = T_0, m, \theta)}{I_{KS}^0} = \frac{E_b f_1(m) f_2(\theta) + E_d + E_r}{E_0} \quad (5.79)$$

Kod dobro definiranih analitičkih modela promjena ostalih karakterističnih električnih veličina s uvjetima rada (T, E, θ i ξ) je indirektno određena samim modelom. Međutim, kod empirijskih modela ove promjene se direktno izražavaju funkcijama. Tako se prema [lit. 15] pretpostavljaju sljedeće empirijske formule:

$$\begin{aligned} I_M &= I_{M0} (C_0 g + C_1 g^2) (1 + \alpha_M (T - T_0)), \\ U_{OK} &= U_{OK0} + sc \frac{nKT}{e} \ln(g) + \beta_{OK} (T - T_0), \\ U_M &= U_{M0} + C_2 sc \frac{nKT}{e} \ln(g) + C_3 sc \left(\frac{nKT}{e} \ln(g) \right)^2 + \beta_M (T - T_0). \end{aligned} \quad (5.80)$$

Primjenom nelinearne regresijske analize dobivaju se koeficijenti C_0, C_1, C_2, C_3 . Za bolju određenost I - U karakteristike još se definiraju dvije dodatne točke:

$$\left(U = \frac{U_{OK}}{2}, I = I_X \right), \quad (5.81)$$

$$\left(U = \frac{U_M + U_{OK}}{2}, I = I_{XX} \right).$$

Struje u točkama $U_{OK}/2$ i $(U_M + U_{OK})/2$ imaju slične empirijske izraze kao i struja u optimalnoj točki:

$$I_X = I_{X0} \left(C_4 g + C_5 g^2 \right) \left(1 + \frac{\alpha_{KS} + \alpha_M}{2} \cdot (T - T_0) \right), \quad (5.82)$$

$$I_{XX} = I_{XX0} \left(C_5 g + C_6 g^2 \right) \left(1 + \alpha_M (T - T_0) \right).$$

Za računanje empirijskog modela prikazanog u ovom poglavlju dosta su četiri točke. Koeficijenti $C_0, \dots, C_7$, n itd. sistematizirani su istraživačkim radom Sandia Laboratorija i ti rezultati bit će ovdje korišteni. U dodatku 6.2 prikazani su primjeri strujno naponskih karakteristika simulirani koristeći empirijski model. Primjeri se odnose na module od kristaličnog, polikristaličnog i amornog silicija. Tablica 5.3 prikazuje ulazne podatke za tri karakteristična modula. Podaci se izvađeni iz baze podatka [lit. 16].

Tablica 5.3 Parametri modula za tri tipična modula

	Opis	SM50	MSX60	US32
I_{KS}	struja kratkog spoja	3,4	3,8	2,616
U_{OK}	napon otvorenog kruga	21,4	21,1	21,52
I_M	optimalan napon	3,05	3,5	2,122
U_M	optimalna struja	16,6	17,1	15,16
I_X	struja pri naponu $U_{OK}/2$	3,38	3,77	2,443
I_{XX}	struja pri naponu $(U_M + U_{OK})/2$	2,25	2,67	1,44
sc	broj serijski spojenih ćelija	36	36	11
pc	broj paralelno spojenih ćelija	1	1	1
α_{KS}	temp. koeficijent struje k.s.	0,0006	0,0005	0,0008
β_{OK}	temp. koeficijent napona o.k	-0,087	-0,081	-0,098
α_M	temp. koeficijent opt. struje	-8E-05	-0,0001	0,001
β_M	temp. koeficijent opt. napona	-0,089	-0,082	-0,05
n	faktor idealnosti diode	1,086	1,34	3,77
C_0	empirijski koeficijent za I_M	1,02	0,991	1,096
C_1	empirijski koeficijent za I_M	-0,02	0,09	-0,096
C_2	empirijski koeficijent za U_M	0,0882	0,1224	-1,142
C_3	empirijski koeficijent za U_M	-8,434	-7,074	-2,891
C_4	empirijski koeficijent za I_X	0,998	0,9856	1,044
C_5	empirijski koeficijent za I_X	0,002	0,0144	-0,044
C_6	empirijski koeficijent za I_{XX}	1,122	1,116	1,13
C_7	empirijski koeficijent za I_{XX}	-0,122	-0,116	-0,13

Konačno treba nešto reći i o utjecaju moduliranja više fotonaponskih ćelija na električna svojstva fotonaponskog modula. Općenito se iz prakse zna da je djelotvornost ćelije veća od djelotvornosti modula u kojemu se nalazi. Modul čine ćelije koje su u principu, približno istih električkih svojstava. Ta neprilagođenost nosi sa sobom izvjesne gubitke (mismatch loss). Međutim, mjerenjem električnih veličina na gotovom modelu i svođenjem istih na jednu ćeliju prema izrazu dobivaju se prosječne karakteristike ćelije.

$$I_{\text{ćelija}} = \frac{I_{\text{modul}}}{pc}, U_{\text{ćelija}} = \frac{U_{\text{modul}}}{sc}, \quad (5.83)$$

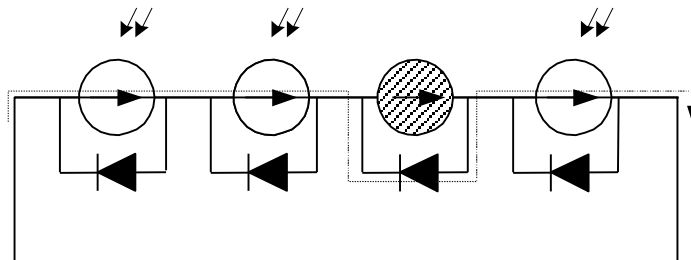
gdje su:

pc	broj ćelija spojenih paralelno
sc	broj ćelija spojenih serijski

Dva su značajna slučaja:

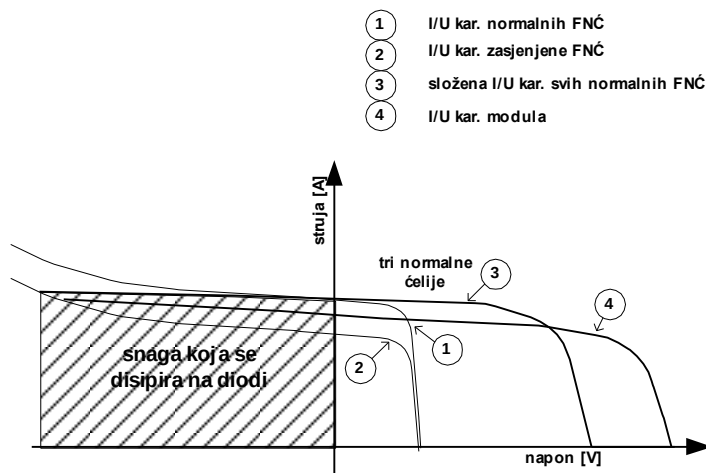
- u modulu se nalazi jedna ili dvije slabije ćelije
- parcijalno zasjenjenje modula.

Oba slučaja za posljedicu imaju lokalno pregrijavanje što može uzrokovati ozbiljna i nepopravljiva oštećenja na cijelom modulu. Pogotovo to vrijedi pri kratkom spoju. Naime, slaba ili zasjenjena ćelija reverzno je polarizirana djelovanjem ostalih modula, slika 5.17. Slika prikazuje slučaj kad je u modulu od četiri ćelije jedna ćelija zasjenjena odnosno pokvarena. Na slici je prikazana ćelija kao antiparalelan spoj strujnog izvora i diode. Ako strujni izvor ne daje struju u krug, struja od ostalih ćelija forsira se kroz diodu u zabranjenom smjeru. To dovodi do stvaranja velikog negativnog napona na ćeliji, odnosno do velike disipacije snage na ćeliji, tj. do pregrijavanja.



Slika 5.17 Primjer modula od četiri ćelije s jednom lošom ćelijom.

Strujno naponske prilike u ovom slučaju prikazanu su na slici 5.18.

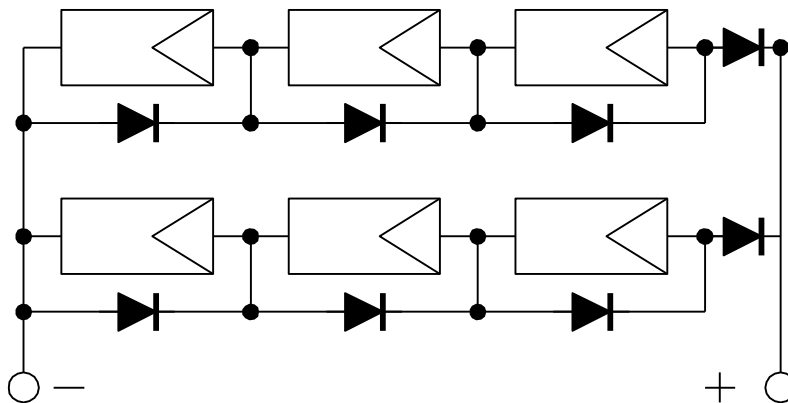


Slika 5.18 Strujno naponske prilike u modelu sa zasjenjenom ćelijom

Rješenje tog problema je *bypass dioda*, spojena antiparalelno svakoj ćeliji odnosno modulu. U slučaju zasjenjenja, struja će poteći bypass diodom a ne kroz fotonaponski modul. Često se u modeliranju fotonaponskog modula već računa s bypass diodom te se ona uključuje u model.

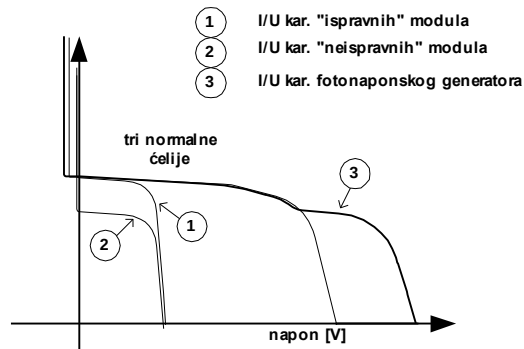
5.3 Modeliranje fotonaponskog generatora

Fotonaponski modul čini više fotonaponskih ćelija spojenih u serijsko paralelnu kombinaciju. Mjerenjem vanjskih karakteristika može se steći uvid o tehničkom stanju svih ćelija zajedno. Realno, fotonaponske ćelije nemaju identične karakteristike. Njihovim spajanjem u modul dolazi do strujno naponskih naprezanja na svakoj ćeliji. U slučaju kratkog spoja prema vani fotonaponski modul ne proizvodi snagu međutim unutar modula teku struje izjednačenja i na nekim (slabim) ćelijama disipira se snaga. Kao što je rečeno u prošlom poglavlju rješenje je bypass dioda. Slični odnosi nastaju kada se više modula spaja u fotonaponski generator ili polje (engl. array). Razlike između pojedinih modula dolaze više do izražaja. Zbog toga se već u proizvodnji modula, ugrađuje baypass dioda. Na slici 5.17 prikazan je primjer spajanja fotonaponskog generatora (polja).



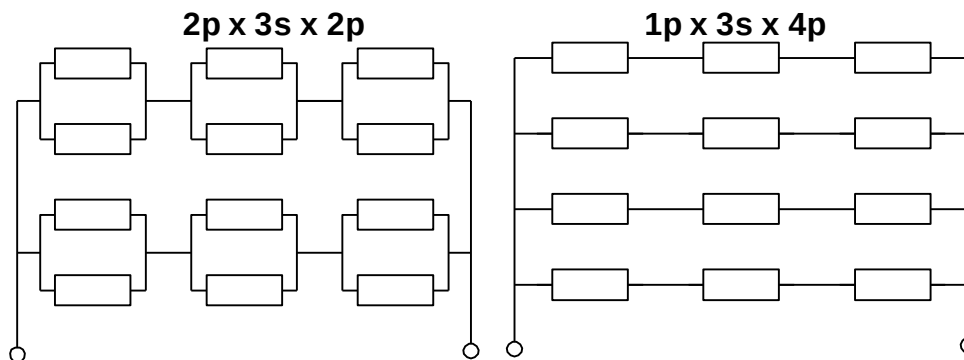
Slika 5.19 Primjena bypass dioda u fotonaponskom generatoru.

Strujno naponska karakteristika fotonaponskog modula s ugrađenom bypass diodom prikazana je na slici 5.20. Također je prikazana strujno-naponska karakteristika fotonaponskog generatora s jednim neispravnim modulom,



Slika 5.20 Strujno naponske prilike FNG s jednim "neispravnim" modulom.

Masovna proizvodnja fotonaponskih modula istih nazivnih parametara podliježe statističkoj raspodijeli pojedinog proizvoda. Stoga se može na temelju uzorkovanja naći vrijednost standardne devijacije fotonaponskih modula po određenim električnim parametrima. U [lit.17] je pokazano da se na temelju standardnih devijacija struje kratkog spoja i napona otvorenog kruga može odrediti optimalna konfiguracija fotonaponskog generatora s obzirom na relativne gubitke zbog neprilagođenosti.



Slika 5.21 Tipovi konfiguracija fotonaponskog polja

Slika 5.21 prikazuje dva tipična primjera različitih konfiguracija za isti generator. Primjenom statističke analize s obzirom na rasipanje električnih veličina istih modela dolazi se do zaključka da konfiguracija (1p x 3s x 4p) ostvaruje manje gubitke nego konfiguracija (2p x 3s x 2p). Iz slike je vidljivo značenje oznaka. 2px3sx2p označava konfiguraciju po 2 paralelne ćelije (2p) spojene su u seriju s još dva identična spoja, odakle ukupno ih je 3 (3s), a zatim je načinjen paralelni spoj s još jednom takvom konfiguracijom (2p).

5.4 Termički model fotonaponske ćelije

Jedan od najvažnijih faktora koji utječu na rad fotonaponske ćelije je temperatura. Sunčevo zračenje se većim djelom apsorbira u tijelo modula. Dio te energije pretvori se u električnu energiju i preda trošilu, dok se dio pretvara u unutrašnju energiju materijala od kojeg je napravljena ćelija te dolazi do povišenja temperature. Dio topline se gubi trima poznatim mehanizmima prijenosa topline (konvekcija, kondukcija i radijacija). Jednadžba koja opisuje prijenos topline:

$$C \frac{dT}{dt} = E_{aps} - q_V - q_D - q_R - P_{el}, \quad (5.84)$$

pri čemu je :

C	toplinski kapacitet materijala od kojeg je napravljen modul,
E_{aps}	ukupno ozračenje koje se apsorbira u ćeliji,
q_D	toplinski tok topline koja se odvodi kondukcijom,
q_V	toplinski tok topline koja se odvodi konvekcijom,
q_R	toplinski tok topline koja se odvodi zračenjem,
P_{el}	električna snaga trošila.

Apsorbirana snaga sunčevog zračenja proporcionalna je upadnom ozračenju E . S druge strane i električna energija je proporcionalna upadnom ozračenju.

$$E_{aps} - P_{el} = AE(\alpha_c - \eta(T)), \quad (5.85)$$

gdje je α_c - temperaturni koeficijent fotonaponske ćelije, η - djelotvornost, A - površina

Proces prijenosa topline je dosta složen i izrazito nelinearan. Kao što je rečeno, tri su temeljna načina prijenosa topline. Pri čemu se kondukcija obavezno zanemaruje u većini slučajeva. Razlog tomu je mala površina spojnih mjesta kojim se modul pričvršćuje za zid, krov ili neku samostojeću konstrukciju. Konvekcija je najčešći proces prijenosa topline. Razlikuju se dva slučaja: slobodna i prisilna konvekcija. Za oba procesa vrijedi izraz:

$$Q_V = \int q_V dt = -h_V A_V (T_m - T_a), \quad (5.86)$$

pri čemu je

h_V	koeficijent prijenosa topline [$Wm^{-2}K^{-1}$],
T_m	temperatura na površini ćelije,
T_a	temperatura okolnog prostora (zraka),
A_V	površina koja se hladi ($A_V=A$ ili $2A$).

Kad je riječ o konvekciji podrazumijeva se postojanje fluida koji ima ulogu prijenosnika topline. Sloj fluid uz toplinski izvor neposredno se zagrijava. Inherentno se zagrijani fluid giba prema području s nižom temperaturom a na njegovo mjesto dolazi hladni

fluid. Ako se fluid iz nekog drugog razloga giba onda je efekt odvođenja topline veći. Na proces odvođenja između ostalog utječu konfiguracija okolnog terena, temperature zraka, fizička svojstva fluida. Sva ova svojstva se ne mogu egzaktno izraziti analitičkim izrazom. U tu i slične svrhe razvijena je posebna inženjerska vještina ; dimenziona analiza koja fizikalne procese izražava bezdimenzionalnim veličinama. Relacije između tih veličina određuju se empirijski. Za opis procesa odvođenja topline koriste se izrazi:

$$\text{Re} = \frac{vL}{\nu}, \text{Nu} = \frac{hL}{\lambda_v}, \text{Gr} = \frac{g\beta_v L^3}{\nu^2} \Delta T, \text{Pr} = \frac{c\nu}{\lambda_v}, \quad (5.87)$$

gdje je: *Re*-Reinoldsov broj, *Nu*- Nuseeltov broj, *Gr*-Grshofov broj, *Pr*-Prandlov broj

Značenje veličina u izrazu (5.87) su:

v	brzina fluida	β_f	toplinski koeficijent širanj fluida
L	karakteristična linearna dužina	λ_v	koeficijent toplinske vodljivosti
ν	kinematički koeficijent viskoznosti fluida	g	ubrzanje zemljine teže
h_v	koeficijent konvekcije	ΔT	razlika temperatura
		c	specifična toplina fluida

S druge strane empirijski je utvrđeno da se za svaki karakterističan slučaj odvođenja topline može pisati:

$$h_v = \frac{\lambda_v}{L} \text{Nu} = \frac{\lambda_v}{L} f(\text{Re}, \text{Pr}, \text{Gr}). \quad (5.88)$$

Razlikuju se tri slučaja:

- prisilna konvekcija, turbulentno gibanje fluida (vjetar),
- prisilna konvekcija, laminarno gibanje fluida,
- slobodna konvekcija (brzina vjetra $W=0$).

Uzimajući u obzir da je u slučaju odvođenja topline rashladni mediji zrak, vrijedi:

$$\text{Pr} = 0.715, \quad \text{Gr} = 9,81 \frac{L^3 (T_m - T_a)}{T_a \nu(T_a)} \quad \nu(T_a) = (12 + 0.095(T_a - 253))10^{-6}. \quad (5.89)$$

<u>Slobodna konvekcija</u>		<u>Prisilna konvekcija</u>	
<i>Laminarno</i>	<i>Turbulentno</i>	<i>Laminarno</i>	<i>Turbulentno</i>
$h_v = \frac{\lambda_v}{L} 0.497 \text{Gr}^{1/4}$	$h_v = \frac{\lambda_v}{L} 0.125 \text{Gr}^{1/3}$	$h_v = \frac{\lambda_v}{L} 0.594 \text{Re}^{1/3}$	$h_v = \frac{\lambda_v}{L} 0.033 \text{Gr}^{0.8}$

S tim u vezi koeficijenti vođenja topline se računa prema sljedećim izrazima. Vrijednosti koeficijenta odvođenja topline s ravne plohe u zraku mogu se procijeniti za prosječne uvijete rada:

temperatura zraka $T_a = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 povišenje temperature površine ćelije $\Delta T = 20 \text{ K}$
 srednja kinematička viskoznost zraka pri $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ je $15.33 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$,
 sredni koeficijent toplinske vodljivosti pri $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ je 0.025 W/mK .

Kombinirajući prirodnu i prisilnu konvekciju te uvrštavanjem navedenih prosječnih vrijednosti za zrak u gornje izraze dobiva se:

$$h(v_w) \approx 4.45 + 5.86 v_w^{0.8}. \quad (5.90)$$

Gornji izraz je izveden uz niz pretpostavki i teško bi bio primjenljiv na širokom području radnih uvjeta. Bez obzira na to, izraz daje oblik empirijskog izraza do kojeg se dolazi mjerenjem. Tako se u [lit. 18] i flit. 19] navodi izraz koji vrijedi za brzine vjetra manje od 20 m/s i karakteristične dužine plohe već od 10 cm:

$$h(v_w) \approx 5.7 + 3.8 v_w. \quad (5.91)$$

Odvođenje topline radijacijom posljedica je zračenja svakog tijela na nekoj temperaturi. Pored topline koju fotonaponska ćelija prima treba uzeti u obzir i toplinu koju primi istim procesom od okolnog područja (atmosfera, zemlja). Gustoća toplinskog toka usljed termičkog zračenja proporcionalna je četvrtoj potenciji temperature. Ako je ploha fotonaponskog modula nagnuta prema zemlji, tada treba računati s termičkim zračenjem zemlje:

$$Q_R = A_R \varepsilon_{ef} \sigma \left[\frac{1 + \cos(\beta)}{2} (T_m^4 - T_n^4) + \frac{1 - \cos(\beta)}{2} (T_m^4 - T_z^4) \right]. \quad (5.92)$$

pri čemu je:

- ε_{ef} efektivna emisivnost (obično se uzima 0.88),
- σ Stefan-Boltzmanova konstanta $5.67 \cdot 10^{-11} \text{ W/mK}^4$,
- T_m temperatura površine ćelije,
- T_n temperatura neba¹,
- T_z temperatura zemlje,
- A_R radijacijska površina (= A ili 2A),
- β kut nagiba plohe prema horizontalnoj ravnini.

Radi jednostavnost često se uzima da je $T_n = T_z = T_a$ (temperatura zraka). Konačni izraz za određivanje temperature fotonaponske ćelije općenito nagnute prema plohi, pri nekoj brzini vjetra v_w je:

$$mc \frac{dT_c}{dt} = AE(\alpha_c - \eta(T_c)) - A_v h_v(v_w, L)(T_m - T_a) - A_R \varepsilon_{ef} \sigma (T_m^4 - T_a^4). \quad (5.93)$$

¹ Temperatura neba je ekvivalentna temperatura crnog tijela ($\varepsilon=1$) koje zrači toplinu jednaka toplini koju zemljina površina izrači prema nebu.

Temperatura ćelije se razlikuje od temperature površine ćelije za par stupnjeva. Razlika se mora uzeti u obzir ako se ne zanemari prijenos topline iz ćelije prema rubovima. Prijenos topline u ovom slučaju se opisuje na sličan način kao u prethodnom slučaju:

$$mc \frac{dT_c}{dt} = AE(\alpha_c - \eta(T_c)) - A\lambda_v \frac{(T_c - T_m)}{d}. \quad (5.94)$$

Toplinski tok koji se iz unutrašnjosti ćelije prenese do rubova ćelije jednak je toplinskom toku koji se sa ruba ćelije preda okolini konvekcijom i zračenjem. Dakle, vrijedi:

$$A\lambda_v \frac{(T_c - T_m)}{d} = A_v h_v (T_m - T_a) + A_R \varepsilon \sigma (T_m^4 - T_a^4). \quad (5.95)$$

Napredniji simulacijski programi koji vode računa o prijelaznim pojavama tijekom rada fotonaponskog sustava uzimaju u obzir diferencijalne jednadžbe (5.93) i (5.94). Egzaktno rješavanje je teško i nepotrebno. Numeričko rješavanje se svodi na Eulerovu metodu integracije. Pretpostavljajući da poznajemo strukturu ćelije broj i vrstu slojeva i debljinu lako se može izračunati ekvivalentni koeficijenti toplinske vodljivosti λ i specifičnog toplinskog kapaciteta c . Ovdje je prikazan kratak algoritam numeričkog rješavanja termičkog modela fotonaponske ćelije.

početni uvjeti: $T_c(t0) = T_m(t0) = T_a(t0)$

korak 1. $T_c(t1) = T_c(t0) + \frac{\Delta t}{mc} \{E[\alpha - \eta(T_c(t0))]\}$

korak 2. Na temelju temperature $T_c(t1)$ iz izraza (5.95) izračuna se $T_m(t1)$

korak 3. $T_c(t2) = T_c(t1) + \frac{\Delta t}{mc} \{AE[\alpha - \eta(T_c(t1))] - A_v h_v (T_m - T_a) - A_R \varepsilon \sigma (T_m^4 - T_a^4)\}$

korak 4. ponavlja se korak 2.

Međutim, računanje temperature prema opisanom algoritmu ovisi o simulacijskom programu odnosno o koraku uzorkovanja. Ako je vrijeme uzorkovanja jednako ili veće od vremenske konstante procesa prijenosa topline, onda nema smisla računati s prijelaznim pojavama, nego je dovoljno promatrati slijed **stacionarnih stanja**. To u mnogome olakšava računanje. Dobiva se transcendentni sustav s dvije nepoznanice T_c i T_m .

$$T_c - T_m = E \frac{d}{\lambda_v} (\alpha - \eta(T_c)) \quad (5.96)$$

$$AE(\alpha - \eta(T_c)) = A_v h_v (T_m - T_a) + A_R \varepsilon \sigma (T_m^4 - T_a^4) \quad (5.97)$$

Daljnje pojednostavljivanje problema slijedi ako se u obzir uzme mala debljina fotonaponskih ćelija odnosno ako se zanemari razlika temperature između tijela i površine ćelije. S tim u vezi dobiva se jednostavan izraz:

$$AE(\alpha_c - \eta(T_m)) \approx AE - Pel = A_v h_v (T_m - T_a) + A_R \sigma (T_m^4 - T_a^4). \quad (5.98)$$

S druge strane izrazi (5.96) i (5.98) upućuju da su razlike temperatura ($T_c - T_m$) i ($T_m - T_a$) proporcionalne ozračenju.

$$T_c - T_m = k_1 E \quad i \quad T_m - T_a = k_2 (v_w) E. \quad (5.99)$$

Ovi zaključci predstavljaju osnovu za eksperimentalno određivanje empirijskog modela. Mjerenjem na velikom broju modula postavljenih u okvir koji omogućuje obostrano hlađenje konvekcijom i radijacijom dobivene su sljedeće empirijske relacije:

$$T_c = T_m + \frac{E}{E_0} \Delta T, \quad (5.100)$$

$$T_m = T_a + E \exp(a + b v_w).$$

U izrazimm (5.100) su:

$E_0 = 1000 \text{ W/m}^2$	standardana ozračenost,
ΔT	temperaturna razlika između površine ćelije i same ćelije pri nazivnom, ozračenju od 1000 W/m^2 (2.5 K za većinu modula),
a, b	empirijski koeficijenti određeni za svaki tip modula,
v_w	brzina vjetra,
T_a	temperatura okoline,
E	ozračenje na plohu (W/m^2),

Primjer termalnog modela dan je u dodatku. S obzirom na usporedbu termičkog modela iz (5.98) i (5.100) dolazi se do zaključka da je dovoljno točno uzeti u obzir model (5.98), odnosno, temperatura fotonaponske ćelije uslijed zagrijavanja može se računati prema formuli:

$$T_c = T_a + g(\Delta T + E_0 \exp(a + b v_w)). \quad (5.101)$$

Empirijski parametri a i b za tri različita fotonaponska modula prikazani su u tablici:

Tablica 5.4 Parametri termičkog modela fotonaponske ćelije

	SM55	MSX60	US32
a	-3,56	-3,56	-3,58
b	-0,075	-0,075	-0,113

6. AKUMULATORske BATERIJE U FOTONAPONSKOM SUSTAVU

6.1 Spremanje energije – uvod

Najveći zapreka masovnom iskorištavanju obnovljivih izvora energije je mala pouzdanost energetske postrojenja na bazi obnovljivih izvora. Pouzdanost sustava se definira kao: *matematička vjerojatnost zadovoljavajućeg rada uz definirane radne uvijete u predviđenom radnom vremenu*. S druge strane važna karakteristika energetske sustava je *raspoloživost*, koja se definira kao dio radnog vremena nekog trošila u kojemu je sustav ispravan

U slučaju sunčevih energetske sustava (fotonaponski sustavi, fototermalni sustavi) uzrok smanjene raspoloživosti može se podijeliti na predvidivi i nepredvidivi uzrok. Predvidivi uzrok je *smjena dana i noće, smjena godišnjih doba*. On za modeliranje predstavlja manji problem nego ne predvidivi uzrok: *oblačnost, stanje atmosfere*. Poboljšanje raspoloživosti sunčevog energetske sustava postiže se uvođenjem spremnika energije u sustav. Uloga spremnika je da spremi višak proizvedene energije te da osigura potrošnju kada se proizvodi manje energije nego što se troši.

6.2 Spremanje električne energije

Električna energija je prijenosni oblik energije i svakom trenutku vrijedi da je proizvodnja električne energije jednaka potrošnji. Spremanje električne energije se zasniva na pretvorbi u druge oblike energije (mehaničke, kemijske oblike energije). Najpoznatiji oblik mehaničkog spremanja su reverzibilne hidroelektrane, gdje se električna energija pretvara u potencijalnu energiju vodene mase. Postoje i drugi oblici mehaničkih spremnika kao što su inercijski spremnici gdje se energija pretvara u kinetičku energiju rotirajućih masa. Ovim načinom se spremaju velike količine energije. Drugi način spremanja električne energije jest pretvorba u kemijsku energiju. U ovom poglavlju posebno će se obraditi kemijski izvori energije kao spremnici.

6.3 Teorija akumulatorske baterije

U ovom potpoglavlju se ukratko je prikazana teorija kemijske izvora električne energije. Poseban osvrt je na olovne akumulatorima, odnosno na matematičkom modelu olovnog akumulatora.

6.3.1 Kemijski izvori električne energije - BATERIJE

Kemijski izvori električne energije neposredno pretvaraju energiju kemijske reakcije u električnu energiju. U širem smislu, električnim baterijama se nazivaju i svi uređaji koji omogućavaju neposrednu pretvorbu unutrašnje energije u električnu energiju (solarne

baterije, nuklearne baterije i termoelement). U užem smislu pod baterijama se podrazumijeva električki element koji pretvara kemijsku energiju u električnu. Razlikuju se *primarne* i *sekundarne* električne baterije.

Primarne električne baterije su galvanski elementi. To su elementi koje čine dvije elektrode uronjene u elektrolit. Elektrode su vodljive ploče na kojima se događa elektrokemijska reakcije i preko kojih se odvodi stvoreni električni naboj. Elektroliti su tvari koje provode električnu struju pomoću iona, kada su otopljeni u vodi. Uloga elektrolita je da vodi struju kroz bateriju kao i da sudjeluje u kemijskoj reakciji. Za razliku od sekundarnih električnih baterija, kemijski procesi u primarnim baterijama su *ireverzibilni* što znači da se propuštanjem istosmjerne struje kroz članak, baterija ne može vratiti u prvobitno stanje. Princip rada primarnih električnih baterija je sličan principu rada sekundarnih (akumulatroskih) baterija u fazi pražnjenja te, se stoga to neće ovdje opisivati. S obzirom da primarne električne baterije nemaju nikakvu važnost za skladištenje sunčeve energije ovdje neće biti riječi o njima.

Sekundarne električne baterije su galvanski elementi gdje je elektrokemijski proces reverzibilan. S obzirom da je moguće propuštanjem istosmjerne električne energije kroz galvanski članak, dovesti članak u stanje da bude izvor električne energije može se reći da je električna energija spremljena odnosno *akumulirana*, pa se takvi galvanski elementi nazivaju *akumulatorskim baterijama*. Najvažniji tipovi akumulatora su:

olovni akumulator

alkalni akumulatori (NiCd, AgZn)

U sljedećoj točki ukratko su opisani kemijski procesi u akumulatorskoj bateriji.

6.3.2 Kemiski procesi u akumulatorskim baterijama: olovo-sumporna kiselina

Opis. Olovni akumulator je reverzibilni kemijski izvor električne energije. Sastoji se od elektroda i elektrolita. U napunjenom stanju pozitivna elektroda (katoda) je olovni dioksid, PbO_2 , a negativna elektroda je porozno olovo Pb . Elektrolit u klasičnim olovnim baterijama je razrijeđena sumporna kiselina H_2SO_4 . Elektrode pored poroznog olova, čini i nosači aktivnog materijala od običnog olova. Pražnjenjem olovo i olovni dioksid zamjenjuju se olovnim sulfatom $PbSO_4$. Elektrolit u olovnom akumulatoru igra dvostruku ulogu; prijenosnik je električne energije kroz akumulator putem iona i sudjeluje u kemijskoj reakciji. Gustoća elektrolita kod praznog akumulatora iznosi 1,11 do 1,14 kg/dm^3 a kod punog akumulatora iznosi oko 1,28 kg/dm^3 . Ove vrijednosti mogu biti veće ili manje ovisno o tipu akumulatorskih baterija. Pored elektroda i elektrolita tu je i *separator*, porozni izolator koji sprečava galvanski kontakt elektroda i propušta ione

Elektrodni potencijal. Ako se metal u kristalnom stanju uroni u otopinu, u rubnom sloju na metalu dolazi do procesa otapanja metala odnosno do ionizacije, odnosno veza slobodnih elektrona i metalnih iona slabi zbog elektrostatskog djelovanja otapala. Tako nastali ioni imaju tendenciju da prijeđu u otopinu. Ova tendencija se objašnjava razlikom koncentracija odnosno aktiviteta iona metala na površini metala i istih iona u otopini. Zbog većeg aktiviteta

iona u metalu, više će iona iz metala prijeći u otopinu nego obrnuto. To ima za posljedicu da metalna elektroda ima određeni negativni potencijal prema otopini. Novonastali negativni naboj na elektrodi sprečava daljnje otjecanja pozitivnih iona. Dakle proces prelaska iona metala iz kristalnog metala teče sve dok se ne izjednače suprotne tendencije: razlika koncentracija metalnih iona i elektrostatska sila. Drugim riječima na površini metala uspostavlja se dinamička ravnoteža:



gdje je

M	kemijska oznaka atoma koji ionizira.
z	broj elektrona koji se oslobađa.
aq	označava hidratizirano stanje iona metala.
s	označava kristalno stanje metala.

Koliki će biti iznos razlike potencijala metala i otopine ovisi o vrsti metala i temperaturi. S obzirom da se ova razlika potencijala ne može mjeriti, uvodi se standardna elektroda koju čine platinska elektroda, otopina HCl (1.35 mol/dm^3). Tako se za svaki metal definira njegov standardni elektrodni potencijal kao razlika potencijala između standardne vodikove elektrode i redoks-sustava odgovarajućeg metala (6.1). Elektrodni potencijal se javlja i kada metal ne reagira sa otopinom [lit. 23]. Ako u elektrolit uronimo dva različita metala (odnosno različiti redoks sustavi) između njih će se javiti razlika elektrodnih potencijala odnosno *elektromotorna sila*. Na katodi će se pojaviti proces oksidacije odnosno otpušta se višak elektrona koji se preko vodljivog spoja vežu na anodi gdje teče proces redukcije. Elektromotorna sila takvog galvanskog elementa dana je Nernstovom formulom [lit. 26] (vidi izvod u Dodatku).

$$E = E^{\circ} - \frac{RT}{zF} \ln \left(\prod a_i^{v_i} \right), \quad (6.2)$$

pri čemu je

E°	standardni elektrodni potencijal definiran za svaki redoks sistema,
$a_i^{v_i}$	aktivitet reaktanata reakcije podignut na potenciju odgovarajućih stehiometrijskih koeficijenata.

6.3.3 Kemijski procesi kod punjenja i pražnjenja olovnog akumulatora

Elektrokemijski proces kod olovnog akumulatora nije do kraja razjašnjen. Proces se najbolje objašnjava tzv. *dvostrukom sulfatizacijom*.

Procesi u elektrolitu. Elektrolit je razrijeđena sumporna kiselina gustoće 1,25 do 1,3 g/cm³. Elektrolit se u vodi disocira:

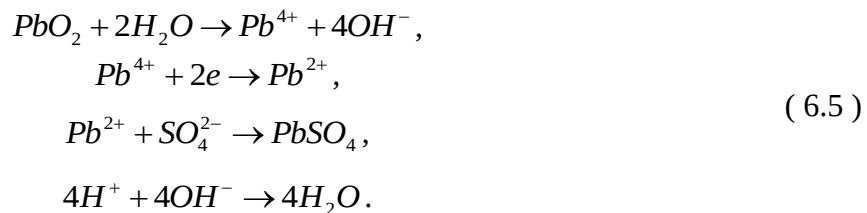


Proces pražnjenja na ANODI. Olovo u rubnom sloju oksidira pod utjecajem elektrolita, predajući dva elektrona. Ionoizirano olovo reagira sa SO₄ ionom pri čemu se na anodi izlučuje PbSO₄.



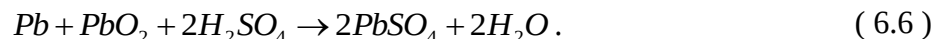
Standardni elektrodni potencijal ovog redoks sustava iznosi $E_A^0 = -0,356 \text{ V}$.

Proces pražnjenja na KATODI. Olovni dioksid na pozitivnoj elektrodi se otapa u vodi iz elektrolita i nastaje četvorovalentni ion olova i 4 OH ionizirane grupe. Četvorovalentno olovo reducira se s dva elektrona iz vanjskog električnog kruga. Tako nastaje divalentno olovo koje se na sličan način reducira pri čemu se na katodi taloži olovni sulfat. OH grupa iz ove reakcije reagira s vodikovim ionima nastalim kod elektrolitičke disocijacije molekule sumporne kiseline. Iz ove reakcije nastaje voda. Kemijske reakcije na katodi mogu se opisati na slijedeći način:



Standardni elektrodni potencijal ovog redoks sustava iznosi $E_C^0 = 1,685 \text{ V}$.

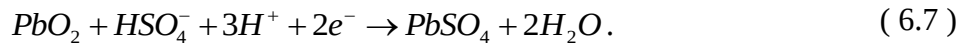
Sumarno gledano, na elektrodama aktivni materijal je zamijenjen olovnim dioksidom koji ima manju gustoću (6,3 kg/m³) i tako zauzima veći prostor. Elektrolit u olovnim akumulatorima sudjeluje u reakciji i troši se tijekom pražnjenja, odnosno sumpor iz otopine taloži na elektrodama. S druge strane, tijekom procesa pražnjenja na katodi se stvaraju se dodatne molekule vode, što dodatno smanjuje koncentraciju iona sumpornog oksida u elektrolitu (kiselinski ostatak). Konačno se ukupna kemijska reakcija može zapisati na slijedeći način:



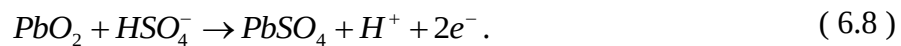
Standardna elektromotorna sila ovakvog galvanskog elementa iznosi: **2,044 V**. Proces punjenja obavlja se obrnutim slijedom.

Radi upotpunjenja fizikalne slike elektrokemijskog procesa na koji se temelji rad baterije, ukratko su prikazani kemijske reakcije s ionima HSO_4^- koji također doprinose stvaranju i održavanju e.m.s [lit. 28].

Na katodi:



Na anodi:



Ukupna reakcija:



Standardna elektromotorna sila ovakvog galvanskog elementa iznosi: **1,928 V**

Elektromotorna sila olovnog akumulatora može se izraziti korištenjem Nernstove formule za redoks elektrode [lit. 27]:

$$E = 1,87 + 0,000048T \ln \left(\frac{[\text{Pb}^{4+}]}{[\text{Pb}^{2+}]^2} \right) [\text{V}]. \quad (6.10)$$

pri čemu je pod logaritamska vrijednost jednaka omjeru koncentracija iona Pb^{4+} i kvadrata koncentracije iona Pb^{2+} . Ovaj izraz je neprikladan za praktičnu upotrebu. Dovoljno točno je koristiti Streinzovu formulu za nazivnu temperaturu [lit. 27]:

$$E = 1,85 + 0,917(\rho - 1) [\text{V}]. \quad (6.11)$$

gdje je ρ relativna gustoća unutrašnjeg elektrolita.

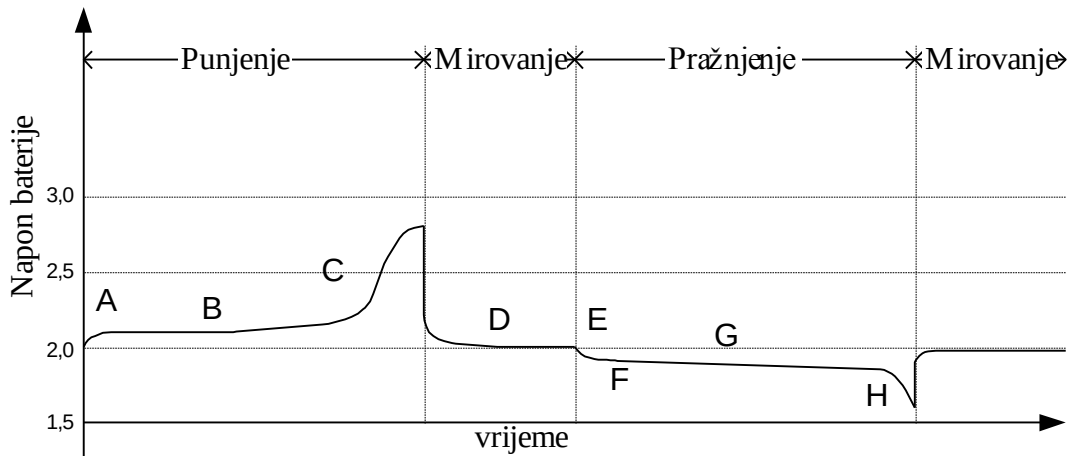
Iz priručnika o olovnim akumulatorima [lit. 28] uz potvrdu iz [lit. 29] može se interpolirati funkcija elektromotorne sile čelije akumulatora u ovisnosti o gustoći elektrolita odnosno masenom udjelu sumporne kiseline u vodi.

$$E = 0,866 + 0,986\rho = 1,85 + 0,73x [\text{V}], \quad (6.12)$$

gdje je x relativna gustoća unutrašnjeg elektrolita.

6.3.4 Napon i kapacitet akumulatora

Izraz (6.11) odnosi se na elektromotornu silu akumulatora u mirovanju, odnosno kada je struja baterije jednaka nuli. Međutim, u pogonu mijenja se elektromotorna sila a s njom i izlazni napon baterije. Uzroka promjeni napona na stezaljkama akumulatora ima mnogo. Najvažniji uzroci su: unutrašnji otpor elektroda i elektrolita, pojava polarizacije, elektroliza vode te isplinjavanje vodika i kisika.



Slika 6.1 Dijagram punjenja i pražnjenja olovnog akumulatora (jedna ćelija)

Punjenje akumulatora: U procesu punjenja olovnog akumulatora, događaju se kemijski procesi suprotni od opisanih kod procesa pražnjenja. U početnoj fazi punjenja, slika 6.1, u porama se olovni sulfat pretvara u spužvasto olovo ili u olovni dioksid ("A"). Pri tome se elektrolit obogaćuje molekulama sumporne kiseline. U ovoj fazi koncentracija sumporne kiseline značajnije raste jer još nije započela difuzija elektrolita izvan pora. To uzrokuje porast elektromotorne sile sukladno empirijskom izrazu (6.11). Nakon toga, ("B") započinje difuzija elektrolita i elektromotorna sila se stabilizira na vrijednost oko 2 V uvećanu za pad napona. U ovoj fazi napon na stezaljkama lagano raste do vrijednosti oko 2.4 V. Razlog tomu je jer se pretvaranjem olovnog sulfata u aktivni materijal povećavaju pore u elektrodama i proces difuzije se olakšava. Kad je skoro sav aktivni materijal ponovno aktiviran, napon na stezaljkama akumulatora naglo raste do vrijednosti 2,75 V po ćeliji. Naime, elektrolit povećava koncentraciju sumporne kiseline sve dok na elektrodama ima olovnog sulfata. Nakon toga započinje elektroliza vode ("C") i nastaje praskavi plin $H_2 + O_2$ čiji prenapon na elektrodama povećava napon na akumulatoru. Treba naglasiti da napon akumulatora nije mjerodavan pokazatelj napunjenosti akumulatora nego je to koncentracija elektrolita.

Pražnjenje akumulatora. Nakon prestanka punjenja akumulatorske baterije, napon naglo pada za iznos pada napona na unutrašnjem otporu ($I = 0$ A). Tek nakon dužeg mirovanja, dolazi do potpunog izjednačavanja koncentracija sumporne kiseline u porama i vanjskom elektrolitu pa se i napon približava nominalnoj vrijednosti od oko 2 V po ćeliji ("D"). U početku pražnjenja, slika 6.1, dolazi do naglog pada napona ("E"). Uzrok ovom pada u je pad koncentracije sumporne kiseline u otopini jer još nije započela difuzija iz "vanjskog elektrolita". Nakon uspostavljanje difuzije napon se duže vremena zadržava na gotovo istoj vrijednosti jednakoj elektromotornoj sili umanjenoj za pad napona na unutarnjem otporu

("F"). Vremenom unutarnji otpor raste jer se mijenja struktura elektroda, olovo je zamijenjeno slabo vodljivim olovnim sulfatom ("G"). Pri kraju pražnjenja, difuzija elektrolita je značajno otežana zbog zatvaranje pora (olovni sulfat zauzima veći prostor od olova ili olovnog dioksida). Zbog toga napon počinje jače padati ("H"). Teoretski, napon bi mogao padati do 0 V ali se pražnjenje prekida pri naponu 1,75 V.

Polarizacija (prenapon). Kada u vanjski krug poteče električna struja, elektromotornoj sili se suprotstavlja tendencija smanjivanja potencijala elektroda što se naziva *polarizacija*. Npr. ako se olovo na elektrodi brže topi ($Pb \rightarrow Pb^{2+} + 2e^-$ ili $PbO_2 + 4H^+ + 2e^- \rightarrow Pb^{2+} + 2H_2O$) nego što se pretvara u električki neutralan $PbSO_4$, uz elektrodu će porasti koncentracija pozitivnih iona olova iznad ravnotežne. Ovaj proces je neizbježan jer samo razlika u koncentracijama iona može "pokrenuti" difuzije i izlučivanje sulfata. Porast pozitivnog naboja na elektrodama formira električno polje suprotnog usmjerenja od elektromotorne sile. Sličan efekt nastaje kada se na anodi razvija H_2 . Djelovanje polarizacije slično je kao kapacitivno djelovanje elektroda koje se nabiju uslijed protjecanje električne struje. U slučaju sekundarnih galvanskih elemenata, kakav je i olovni akumulator kada elektrolit sudjeluje u reakciji, polarizacija je neizbježna (jer otopljeni ioni aktivnog materijala moraju *difundirati* u elektrolit da bi u reakciji s njim došlo do taloženja produkta). Kada je akumulator van pogona, utjecaj polarizacije na napon nestaje (oporavljanje). Razlikujemo dvije vrste prenapona : aktivacijski i koncentracijski. **Aktivacijski** prenapon je višak potencijala koji se mora primijeniti da bi reakcija uopće započela- aktivirala se. S druge strane, kod pražnjenja baterije taj napon je potreban da bi se održao kontinuitet kemijske reakcije sukladan protoku struje. **Koncentracijski** prenapon je vezan za prijenos iona. To je zapravo posljedica uspostavljanja razlike koncentracija iona kod difuzije odnosno toka električne energije elektrolitom. Prenapon je dakle odstupanje elektrodnog potencijala kod protjecanja struje od vrijednosti kada protjecanja struje nema.

Butler i Volmer su izveli jednadžbu za aktivacijski prenapon na temelju teorije dvosloja na granici elektroda elektrolit (dodatak):

$$j = j_o \left[\exp\left(\frac{(1-\beta)F\eta_{act}}{RT}\right) - \exp\left(\frac{\beta F\eta_{act}}{RT}\right) \right], \quad (6.13)$$

gdje je:

j	gustoća struje elektrode,
j_o	gustoća struje izmjene,
β	konstanta,
F	Faradejeva konstanta,
η_{act}	aktivacijski prenapon elektrode $\eta_{act} = E_e(j=0) - E_e(j)$.

Koncentracijski prenapon se može izraziti formulom:

$$j = -j_g \left[\exp\left(\frac{zF\eta_{act}}{RT}\right) - 1 \right], \quad (6.14)$$

gdje je j_g granična vrijednost struje kroz elektrodu.

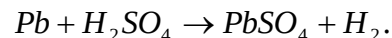
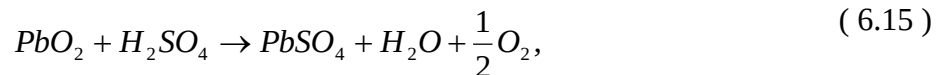
Unutrašnji otpor. Kao što je već u uvodu rečeno, električna struja prolazeći kroz sam akumulator ostvaruje izvjesni pad napona zbog omskog otpora strukture. Pri pražnjenju struja ulazi kroz stezaljku negativne elektrode, prolazi dijelovima elektrode (spojnica, zastavica, rešetka, aktivna masa i elektrolit u porama) zatim prolazi kroz sam elektrolit, separator, i kroz pozitivnu elektrodu vraća se u električni krug. Treba naglasiti da su za vođenje električne struje kroz elektrode odgovorni elektroni (dva elektrona u prosijeku po jednom molu izreagirano olova) a kroz otopinu tu su ioni vodika (H) i hidroksilne (OH) grupe. Unutrašnji otpor se dakle može podijeliti na tri dijela: *otpor anode, otpor katode i otpor elektrolita*.

Otpor elektrolita se vremenom mijenja. Pun akumulator na katodi ima olovni sulfat a na anodi spužvasto olovo. Pražnjenjem aktivni materijal se mijenja sa olovnim sulfatom koji ima manju vodljivost, o znači da se pražnjenjem povećava otpor elektroda. Razrijeđena sumporna kiselina kao elektrolit ima najniži specifični otpor pri gustoći $1,26 \text{ g/cm}^3$ (35 % H_2SO_4 u ukupnoj masi elektrolita) pri 25°C i iznosi oko $1 \Omega\text{cm}$. Razrjeđivanjem odnosno pražnjenjem akumulatora specifična otpornost raste do $2 \Omega\text{cm}$. Unutrašnji otpor između ostalog raste zbog starosti. Ukupni omski otpor se normira prema pet-satnom kapacitetu Q_5 i kreće se od $0.1/Q_5 \Omega$ do $0.2/Q_5 \Omega$.

Samopražnjenje. To je pojava pretvaranje aktivne mase u olovni sulfat bez vodljivog kontakta elektroda. Odnosno to je gubitak kapaciteta uz otvoreni vanjski krug. Uzroci samopražnjenja su:

- *postojanje lokalnih kratkospojnih putova zbog nečistoća unutar elektroda*
- *Zagađenost elektrolita metalnim česticama i štetnim kiselinama i solima*
- *Lutajući metali u elektrolitu*
- *porast temperature*

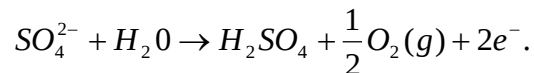
Reakcije samopražnjenja su spore i iznosi do od **0,2% do 1% punog kapaciteta dnevno**. Olovo i Olovni dioksid su termodinamički nestabilni i nakon dužeg vremena mirovanja uz prisustvo sumporne kiseline, sulfatiziraju uz oslobađanje plinova kisika i vodika kako je prikazano sljedećim reakcijama:



pored toga prisustvo iona metala u elektrolitu ubrzava reakciju u kojoj se elektroni izmjenjuju između elektroda "kroz unutrašnji električni krug". Tako npr. standardom je definiran najveći sadržaj željeza u koncentriranoj sumpornoj kiselini u iznosu od 0,004%. Usprkos tako maloj količini događaju se kemijske reakcije u kojoj nestaje aktivni materijal i smanjuje se gustoća elektrolita a samim tim i pad elektromotorne sile ćelije akumulatora.

Suflatizacija. Ovo je proces nepovratnog smanjenja kapaciteta zbog kristalizacije olovnog sulfata. Proces se događa kada akumulator stoji duže vremena nenapunjen. Formirani kristali sulfata olova zatvaraju pore na elektrodama i sprečavaju prodor elektrolita.

Isplinjavanje i gubici u akumulatoru. Tijekom punjenje akumulatora, na anodi se događa proces redukcije a na katodi proces oksidacije. Kada se sav olovni sulfat pretvori u aktivni materijal, daljnje dovođenje struje vrši elektrolizu vode. Nastaje praskavi plin; mješavina molekula vodika i kisika ($H_2 + O_2$). Dakle dio naboja koji se predaje bateriji troši se na elektrolizu vode odnosno na isplinjavanje vodika na anodi i kisika na katodi.



Pokazano je da i u reakcijama samopražnjenja nastaju plinovi vodik i kisik. S obzirom da su vjerojatnosti za tu reakciju male, isplinjavanje je zanemarivo kod samopražnjenja. S druge strane aktivacijski prenapon nastajanja vodika i kisika je veći od istog za pretvaranje olovnog sulfata u olovo i olovni dioksid zbog toga je i porast napona na stezaljkama akumulatora veći. Prema tome kada tijekom punjenja napon punjenja počne brže rasti došlo je do isplinjavanja. Isplinjavanje počinje i prije kraja punjenja (2,4 V/ćeliji) te se stoga ne prekida punjenje. Tek kada gustoća elektrolita ne mijenja svoju vrijednost duže vremena punjenje se prekida. Dio elektriciteta koji se predaje reakciji isplinjavanja predstavlja gubitak. Kada se govori o gubitcima u akumulatoru treba spomenuti i gubitke snage zbog razvijanja Julove topline na unutrašnjem omskom otporu.

Procesi isplinjavanja vodika i kisika se promatraju odvojeno. Tako je ustanovljeno da isplinjavanje vodika počinje pred sam kraj punjenja u malim količinama naročito pri višim temperaturama. S druge strane isplinjavanje kisika započinje gotovo kada i proces punjenja i značajno ovisi o temperaturi. Efekt isplinjavanja se opisuje strujnom ili ampersatnom djelotvornošću punjenja.

$$\eta_{Ah} = \frac{I_B - I_{gas}}{I_B}. \quad (6.17)$$

pri čemu je I_B struja baterije a I_{gas} struja punjača koja rezultira isplinjavanjem vodika i kisika. Struja isplinjavanja I_{gas} [lit. 31] može se prikazati izrazom:

$$I_{gas} = \frac{Q_{10}}{Q_n} I_{g0} \exp(C_V(V - 2,23)) \exp(C_T(T - 20)). \quad (6.18)$$

Tipične vrijednosti koeficijenata su: $C_V = 10 V^{-1}$, $C_T = 0,06 K^{-1}$ i $I_{g0} = 0,036 A$.

Kapacitet akumulatora je količina naboja koju može predati trošilu dok napon na otvorenim stezaljkama ne padne na utvrđenu vrijednost (vidi dodatak). Pun akumulator ima napon otvorenog kruga (standardna elektromotorna sila) od 2,1 V do 2 V. A ispražnjen akumulator ima vrijednost od oko 1,83 V po ćeliji. Kapacitet akumulatora je redovno manji od kapaciteta

aktivnog materijala. Kapacitet akumulatora ovisi o struji kojom se prazni. Jače pražnjenje vodi bržem stvaranju molekula olovnog sulfata koji brzo formiraju barijeru koja sprečava prodor vanjskog elektrolita prema unutrašnjosti gdje još ima aktivnog materijala. Tako se kod brzog pražnjenja akumulatorske baterije ustvari iskoristi samo površinski sloj aktivnog materijala dok unutrašnji sloj ostaje ne iskorišten. Ovisnost kapaciteta akumulatora o vremenu pražnjenja dobro se opisuje Peukert-vom jednadžbom:

$$I_B^n t = K \Rightarrow Q_{t_1} = Q_{t_2} \left(\frac{t_1}{t_2} \right)^{\frac{n-1}{n}}, \quad (6.19)$$

pri čemu je :

Q_{t1}, Q_{t2} kapacitet akumulatora pri pražnjenju konstantnom strujom kroz vrijeme t_1 odnosno t_2 ,
 t_1, t_2 vrijeme pražnjenja akumulatora,
 n koeficijent koji za olovni akumulator iznosi oko **1,4**. (Peukertova konstanta).

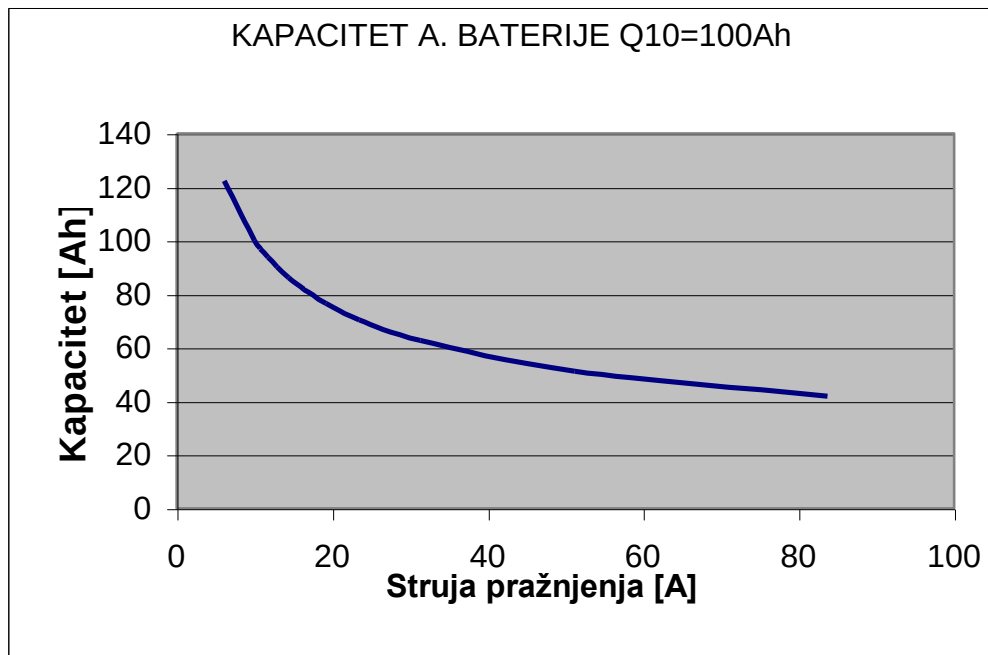
Kapacitet se obično normira prema iznosu naboja koje može dati akumulator ako se isprazni kroz 10 sati. Pored toga često se navode vrijednosti 5-satnog i 1-satnog kapaciteta. Važno je spomenuti da izvedeni izraz vrijedi pri nazivnoj temperaturi. Već je spomenuto da porast temperature ubrzava reakcije u galvanskom elementu, smanjuje gubitke zbog isplinjavanja ali i povećava samopražnjenje. S porastom temperature raste viskozitet elektrolita, pospješuje se difuzija. Stoga se uvodi temperaturni koeficijent promjene kapaciteta:

$$Q_{t_1}(T) = Q_{t_2}(T_0) \left(\frac{t_1}{t_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} [1 + \alpha_{Qb}(T - T_0)], \quad (6.20)$$

gdje je:

t vrijeme pražnjenja akumulatorske baterije,
 α_{Qb} temperaturni koeficijent promjene kapaciteta ($1,2$ do $1,6 \cdot 10^{-2}$ iAh/°C),
 T Temperatura akumulatora.

Inače Peukert-ova jednadžba se odnosi na svaku elektrodu zasebno kada se u obzir uzima i utjecaj debljine svake elektrode, ali je takav zapis nepraktičan. Jednadžba nije primjenjiva za vrlo velike i vrlo male vrijednosti struja pražnjenja. Naime za vrlo velike struje koeficijent n poprima vrijednost približno $n=2$. Za male struje koeficijent n teži jedinici: $n=1$.



Slika 6.2 Kapacitet akumulatorske baterije u ovisnosti o struji pražnjenja

Pored utjecaja temperature na kapacitet značajno utječe gustoća elektrolita. Ukratko će se prikazati veza između gustoće odnosno koncentraciji i teoretskog kapaciteta olovnog akumulatora. U kemijskoj reakciji kojima je opisan proces u olovnom akumulatoru vidi se da 1 mol olova reagira s 2 mola H_2SO_4 pri čemu se izmjene $2F$ C naboja (53,6 Ah). Dakle 1 mol sumporne kiseline ima energetske ekvivalent od 26,8 Ah. Da se dobije elektrolit gustoće 1,2 g/ml, potrebno je pomiješati 332,4 g H_2SO_4 odnosno 357,4 g 93% sumporne kiseline (industrijska koncentracija) sa 842,6 g vode u jednoj litri. Koncentracija sumporne kiseline iznosi 27,7 %. U takvoj otopini ima 3,324 mola sumporne kiseline. Prema tome 27,7%-tna otopina sumporne kiseline ima energetske vrijednost: 90 Ah. Naravno podrazumijeva se da sva ona izreagira odnosno da koncentracija elektrolita padne na nulu. Koristeći se prethodnim algoritmom može se izvesti izraz za teoretsku energetske vrijednost [Ah] elektrolita gustoće ρ_{el} . Izraz je kvadratna jednadžba koja se prema [lit. 28] može aproksimirati pravcem:

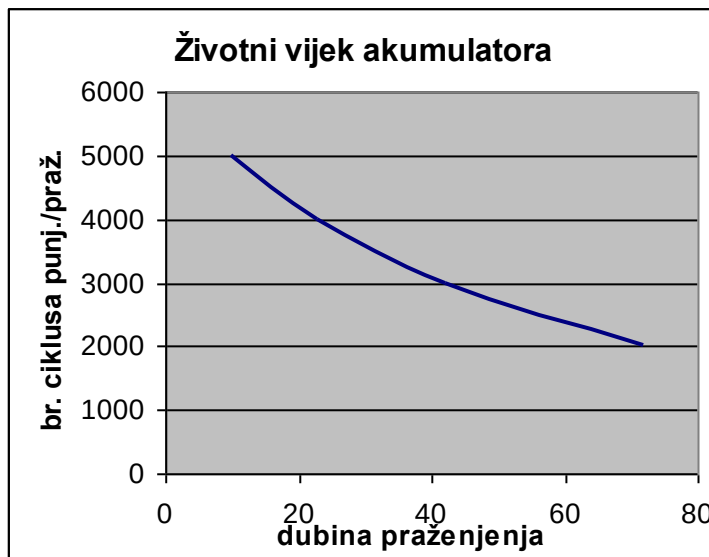
$$q_{el}^T = 4865,29\rho - 490,24 \text{ Ah/l}, \quad (6.21)$$

pri čemu je ρ_{el} gustoća elektrolita u [g/ml].

Pun akumulator ima napon otvorenog kruga od 2,1 do 2,2 V a smatra se da je ispražnjen kad napon ćelije padne na oko 1,8 V. Ovaj pad napona otvorenog kruga odgovara smanjenju gustoće elektrolita od 1,26 g/ml do oko 1,04 g/ml. Dakle gustoća se promijenila za oko 0,2 g/ml a to ima energetske vrijednost od oko 100 Ah po litri elektrolita. Praktična vrijednost energetske ekvivalenta potrošene sumporne kiseline manji je 2 do 5 puta.

Na kraju treba naglasiti da se u realnim situacijama, akumulator nikad ne prazni do kraja. Bez obzira što u nominalnim uvjetima struje pražnjenja, temperature *je to moguće*, ali se ne *preporučuje* jer se tako smanjuje **životni vijek** akumulatora. Naime životni vijek akumulatora je ograničen i izražava se brojem *ciklusa punjenja i pražnjenja punog kapaciteta*

Životni vijek ovisi o konstrukciji, namjeni akumulatora i odstupanju od propisanih uputa o rukovanju. Ponajviše životni vijek ovisi o dubini pražnjenja. Na slici 6.3 prikazan je odnos životnog vijeka i dubine pražnjenja.



Slika 6.3 Primjer ovisnosti životnog vijeka o dubini praž. stacionarnih akumulatora

Važno je uočiti da je ukupni naboj što ga kroz život "prođe" kroz akumulator veći što je dubina pražnjenja manja.

Konstrukcija elektrodnih ploča. Intezitet kemijske reakcije, između ostalog ovisi o dodirnoj površini aktivnog materijala. To je postignuto korištenjem poroznog olova (spužvasto olovo). Aktivni materijal se dobiva procesom *formiranja*. Pozitivna ploča aktivnog materijala je olovni oksid. Taj materijal se ne odlikuje velikom čvrstoćom a i zauzima veliki prostor. To je je uzrok velikih problema kod dubinskog pražnjenja kada se veliki dio olovnog oksida pretvorio u olovni sulfat. Zbog male čvrstoće i velikog volumena olovnog sulfata, aktivni materijal može jednostavno otpasti sa elektrode čime je *nepovratno izgubljen* kapacitet. Ovaj efekt je izraženiji kod ploča sa debljim slojem aktivnog materijala. U daljnjem tekstu će se pokazati da je upravo čvrstoća aktivnog materijala i debljina sloja razlikovna karakteristika između raznih tipova baterije.

Negativna ploča je napravljena od spužvastog ili čvrstog olova i uglavnom nema ovakvih problema. Stoga su se kroz povijest razvijali razni oblici pozitivnih ploča. Tako uglavnom postoje osnovne tri izvedbe pozitivne elektrode:

1. **Elektrode velike površine** (Plantéove ploče). Na olovni nosač nanoseno je mekano olovo koje se zatim nagriza određenom kiselinom, nakon čeka se stvore rebra na ploči. Na ovaj način povećana je dodirna površina i do 12 puta. Zatim se procesom *formiranja* [lit 28.] stvara aktivni olovni oksid.
2. **Rešetkaste elektrode ili pastirane** (Flat plate). Od tvrdog olova napravljeni su pravokutni otvori u koje se "ulijeva" pasta od aktivnog materijala. Nakon formiranja, ploče su spremne za eksploataciju.
3. **Oklopljenje ili cjevaste elektrode (tubular)** Aktivni materijal je u obliku tankih cjevčica kroz koje prolazi nosač od tvrdog olova. Oko cijevi nalazi se tanak sloj

izolacijskog materijala koji čvrsto "drži" aktivni materijal te na taj način povećava čvrstoću. Obloženi izolacijski materijal je polupropustan za elektrolit koji lako difundira u aktivni materijal.

Važno je spomenuti da je negativna ploča uglavnom napravljena kao rešetkasta elektroda. S obzirom da aktivno olovo tvori čvrstu strukturu sa nosećim olovom nema potrebe za dodavanjem antimona ili kalcija kao legure. Za razliku od negativne elektrode, pozitivnoj elektrodi se u procesu proizvodnje dodaju određene primjese s ciljem poboljšavanja mehaničkih karakteristika. Tako se npr. pozitivnoj elektrodi dodaje **antimon** u različitim postocima (od 1 do 11%). Dodavanjem antimona značajno se poboljšava sposobnost za duboka pražnjenja gotove elektrode jer aktivni materijal čini postojanim. Međutim antimon se relativno lako difundira do negativne elektrode gdje povećava isplinjavanja kisika i smanjuje djelotvornost punjenja, povećava samopražnjenje. Alternativna primjesa **kalcij** dodaje se s istim ciljem umjesto antimona. Kalcij gotovo ne izaziva negativne efekte na djelotvornost ali nema dobre osobine naspram mogućnosti dubokog pražnjenja kao antimon.

Elektrolit. Kao što je to gore navedeno elektrolit je razrijeđena sumporna kiselina. U punom akumulatoru, u masi elektrolita sumporna kiselina sudjeluje s 27 do 35% mase. S obzirom na fizička svojstva elektrolita, akumulatori se dijele na:

1. **Mokre (flooded).** To je klasični tip akumulatorskih baterija kod kojih je elektrolit u tekućem stanju. Ove baterije namijenjene su za rad u uspravnom stanju. Tijekom punjenja dolazi do isplinjavanja kisika i vodika iznad elektroda. Akumulatorske baterije ovog tipa pojavljuju se u dvije izvedbe: sa pokretnim čepovima (*non vented*) i sa nepokretnim odušcima (*vented*). U oba slučaja omogućen je izlaz plinovima tijekom punjenja s tom razlikom da se u prvom voda može dodavati elektrolitu i tako produžiti životni vijek. Baterije drugog tipa nazivaju se i akumulatorske baterije bez održavanja (*maintenance free*)
2. **Baterije sa želatiziranim elektrolitom (gelled).** Pojava plinova prilikom punjenja je neizbježna osobito ako je pozitivna ploča formirana s antimonom. Isplinjavanje se može reducirati redukcijom kisika na negativnoj elektrodi. S obzirom da se kisik ne otapa u elektrolitu njegov transport mora biti u plinovitoj fazi. Ovo je riješeno zgušnjavanjem elektrolita dodavanjem primjese SiO_2 . U želatiziranom elektrolitu nastaju mikropukotine kojima se kisik transportira na negativnu elektrodu gdje se reducira s vodikom.
3. **Baterije sa elektrolitom apsorbiranim u separator (AGM).** Za apsorpciju koristi se fina vlaknasta struktura na bazi bor-silikon masa. Kisik u ovim uvjetima može u plinovitoj fazi difundirati do negativne elektrode gdje se rekombinira s vodikom.

O podijeli akumulatora s obzirom na konstrukciju biti će govora u sljedećem poglavlju.

6.3.5 Tipovi akumulatorskih baterija

Akumulatorske baterije se mogu razvrstati prema *namjeni* i prema *konstrukciji*. S obzirom na namjenu akumulatorskih baterija uvažena je podjela na četiri glavne grupe:

1. Starterske ili automobilske

2. Trakcijske
3. Stacionarne
4. Specijalne

S obzirom na konstrukciju akumulatorskih baterija:

• s obzirom na elektrolit	• s obzirom na održavanje	• konstrukcija pozitivne elektrode
mokre(<i>flooded</i>) želatizirane (<i>gelled</i>) absorb. u separatoru(AGM)	1. otvorene(<i>standard</i>) 2. poluzatvorene 3. zatvorene s oduškom (<i>Sealed & vented</i>) 4. zatvorene s regulacijskim ventilom (VRLA)	velike površine (Planté) oklopljene (Tubular) pastirane (Flat)

Solarne baterije. Posebnu kategoriju *specijalnih* akumulatorskih baterija čine tzv. *solarne baterije* koje su ujedno ovdje od najvećeg značaja. Solarne baterije su spremnik energije u fotonaponskim sustavima. Funkcija im je spremati višak sunčeve energije za period kada nema dovoljno sunčeve energije da pokrije potrebe za električnom energijom. Spremanja energije je punjenje akumulatora a predaja je pražnjenje. S obzirom na karakter sunčeve energije kao izvora lako se može uočiti da ciklus solarnih baterija ima dva perioda: *period dan-noć, sezonski period*. Dnevno noćni ciklus implicira na plitke dnevne cikluse punjenja i pražnjenja. Uslijed sezonske promjene dozačene sunčeve energije, dnevna potrošnja postaje veće od dnevne proizvodnje, te se iz dana u dan srednje stanje napunjenosti smanjuje. Dakle duboki ciklusi punjenja i pražnjenja događaju se kroz vrijeme od nekoliko dana ili tjedana pa čak i mjeseci. Proučavanjem ovih uvjeta a i drugim mogućih scenarija dolazi se do zaključka o traženim svojstvima solarnih baterije [lit. 32]:

- dug životni vijek pri dubokim pražnjenima
- neznatni zahtjevi za održavanjem
- visoka efikasnost punjenja i pražnjenja
- sposobnost "preživljavanja" stanje potpune ispražnjenosti
- nizak stupanj samopražnjenja
- pouzdanost
- male promjene svojstava preko radnog temperaturnog opsega

Postoje dva osnovna tipa solarnih baterija:

Akumulatorske baterije s malo primjese antimona, te pokretnim čepovima za dopunjavanje. Osnovna svojstva baterije su:

- Ima pokretne čepove/oduške kojima se dozvoljava dopunjavanj elektrolita.
- Pozitivna ploča je napravljena s malo antimona 1-3%,
- Debljina aktivnog materijala na pločastoj elektrodi iznosi 2.5 do 3 mm.
- Tijelo baterije napravljeno je o prozirnog materijala.

- Veliki prostor iznad i ispod elektroda.

Prisustvo antimona u smanjenom postotku s jedne strane osigurava sposobnost za duboka pražnjenja dok s druge smanjuje isplinjavanje i povećava životni vijek. Providno kućište olakšava nadzor elektrolita. Daljnje smanjenje isplinjavanja postignuto je umetcima s katalitičkim djelovanjem na rekombinaciju plinovitog vodika i kisika u vodu. Izgubljena količina vode lako se može nadomjestiti kroz servisne otvore na vrhu akumulatora.

Drugi tip solarne baterije je **akumulatorska baterija s kalcijevim elektrodama bez održavanja**. Umjesto antimona pozitivnoj elektrodi dodaje se mala količina kalcija. Ove baterije imaju značajno smanjenu potrebu za održavanjem te se zbog toga često izvode kao poluzatvorene ili zatvorene. Ipak legura kalcija nema tako dobra svojstva s obzirom na duboko pražnjenje kao što imaju baterije s legurom antimona. Zatvorenost loše utječe na transport akumulatorskih baterija koje se isporučuju gotovo napunjene, za razliku od otvorenih baterija ove se mogu transportirati u suhom stanju. Ovaj tipa baterija ima općenito duži životni vijek ali nemaju duboke cikluse kao antimonске.

Automobilske baterije (SLI) služe za opskrbu električnom energijom u vozilima za startanje motora i za rasvjetu. Proizvode se kao baterije s rešetkastim elektrodama i imaju malu debljinu aktivnog materijala (1,5 do 2,5 mm). Mala debljina aktivnog materijala nije pogodno za duboka pražnjenja (samo 5-20 % punog kapaciteta) te se ne preporučuje korištenje SLI baterija u solarnim primjenama. Baterije imaju sposobnost davanja velike struje u kratkom vremenu bez oštećenja ploča (visok postotak antimona, do 11%). Visok postotak antimona smanjuje životni vijek uslijed samopražnjenja i isplinjavanja i ograničen je od 1 do 3 godine. Broj punih ciklusa je od 150 do 300. Kapacitet se kreće oko $C_{10}=100$ Ah. Automobilske baterije koje se koriste u kamionima i traktorima s obzirom na zahtjeva za solarne baterije bolje su nego obične automobilske. Naime tu su povećani zahtjevi za izdržljivošću i dubljim pražnjenjem. Debljina aktivnog materijala kreće se od 2,5 do 3 mm. Postoje izvedbe kamionskih (može se uvjetno nazvati ovaj tip baterija) s oklopljenom pozitivnom elektrodom. Pored ovog mogu se susresti automobilske baterije sa smanjenom količinom antimona ili bez njega (dodaje se kalciji) te kao poluzatvorene ili zatvorene baterije. U ovom posljednjem slučaju elektrolit je zgusnut u formu gela ili je apsorbiran u vlaknastu strukturu separatora. Za razliku od klasičnih automobilskih, kamionske baterije mogu se koristiti kao solarne baterije (deblje ploče, dublje pražnjenje).

Trakcijske akumulatorske baterije koriste se za električnu vuču. Najčešće se koristi za pogon skladišnih vozila, viličara, rudničkih vozila, električnih podmornica, manjih brodova. Često se trakcijske baterije za pogon brodova izdvajaju u posebnu kategoriju tzv. brodskih baterija. Po nekim karakteristikama brodske baterije su bliže automobilskim a po nekim klasičnim trakcijskim. Debljina ploča kod ovih baterija kreće se od 3 do 6 mm i izvode se kao rešetkaste ili oklopljene². Sadržaj antimona u pozitivnim elektrodama smanjen je na 4 – 8 mm što osigurava dubinu pražnjenja do 80% . Samopražnjenje kod ovih baterija nije velik problem jer se baterije pune gotovo svaku noć a preko dana se zahtijeva sposobnost opskrbe velike količine energije. Broj ciklusa kreće se od 1000 do 1500. Trakcijske baterije imaju potrebne reference (pogotovo brodske) za solarne primjene ali su skupe.

² Oklopljena izvedba dodatno poboljšava sposobnost dubokog pražnjenja

Stacionarne baterije se koriste kao pomoćni izvor napajanja ili napajanje u nuždi. koriste se u telefonskim centralama, u bolnicama, za napajanje alarma. Prirodni režima rada podrazumijeva da baterije stoje u stanju pripravnosti te se cijelo vrijeme dopunjavaju. U posljednjoj deceniji sve se više koriste akumulatorske baterije za tzv. besprekidno napajanje računalnih sustava. Osnovni tehnički zahtjevi koji stavljanju pred stacionarne baterije su:

- pouzdanost
- nizak stupanj samopražnjenja
- dug životni vijek (>10 godina).

Pozitivne ploče mogu biti izvedena kao oklopljene ili kao ploče velike površine s debelim slojem aktivnog materijala (6 mm) s malo (do 3%) ili nimalo (koristi se kalciji) postotaka antimona. Stacionarne baterije imaju dubinu pražnjenja do 40 do 50 % punog kapaciteta i tako postižu i preko 3000 punjenja i pražnjenja. Iz razloga pouzdanosti i smanjenog samopražnjenja a na račun dubine pražnjenja češće se pozitivne ploče izrađuju s primjesom kalcija (baterija manjeg kapaciteta). Stoga se u posljednje vrijeme sve više pojavljuju zatvorene izvedbe stacionarnih baterija s regulacijskim ventilima. Ovaj tip baterija često se koristi kao solarna baterija posebno one sa smanjenim postotkom antimona i oklopljenim elektrodama.

Na kraju treba spomenuti baterije potpuno **zatvorenog** tipa kao najčešći slučaj baterija koje se koriste u fotonaponskim sustavima s tim da su one puno skuplje od ostalih tipova. Baterije imaju minimalno održavanje, prikladnu dubinu pražnjenja, dug životni vijek. Važno je napomenuti da usprkos tomu što se puno češće koristi kalcij nego antimon kao legura za čvrstoću aktivnog materijala, ista je osigurana gustim pakiranjem elektroda, koje su praktički učvršćene zgusnutim elektrolitom. Ove baterije zauzimaju manji prostor od poluzatvorenih ili otvorenih. Kod svih tipova baterija važnu pozornost u eksploataciji treba obratiti prema krajnjem naponu kako kod punjenja tako i kod pražnjenja. Osobito to vrijedi za zatvoreni tipa baterija. Stoga je važno poznavati proceduru punjenja za svaki tip baterije.

6.3.6 Metode punjenja akumulatorskih baterija

U poglavlju 6.3.4 opisani su procesi punjenja i pražnjenja u akumulatorskim baterijama. Životni vijek, djelotvornost prijenosa spremanja električne energije i druga svojstva jako su ovisna o načinu rukovanja s akumulatorskim baterijama tijekom punjenja i pražnjenja. Pogotovo se to odnosi na *punjenje* baterija. Naime teško je izmjeriti kapacitet akumulatorske baterije a još teže reći kada je ona puna. Tijekom punjenja, aktivni materijal se regenerira i pri tom se gustoća elektrolita povećava. Kada se sav aktivni materijal regenerira nema više prirasta gustoće elektrolita. Upravo ova fizikalna pojava je jedino relevantno mjerilo stanja napunjenosti. Dakle mjerenjem gustoće elektrolita može se utvrditi stupanj napunjenosti. Pri tom treba imati naumu da gustoću treba mjeriti i do sat vremena nakon prestanka punjenja. Ovaj postupak je nepraktičan stoga se napunjenost akumulatorske baterije utvrđuje posredno preko napona na stezaljkama akumulatora. Sa stajališta životnog vijeka akumulatorske baterije važno je napuniti bateriju a da pri tome isplinjavanje bude svedeno na minimum. S

druge strane u procesu pražnjenja treba voditi računa da se akumulatorska baterija ne isprazni ispod granične vrijednosti.

Za različite svrhe primjenjuju se različite metode punjenja [lit. 28]. Punjači su uređaji koji su namijenjeni punjenju akumulatorskih baterija. Regulatori punjenja su uređaji kojima se regulira punjenje baterija kada su one paralelno spojene na trošila. Razlikujemo tri osnovna načina punjenja s obzirom na primjenu:

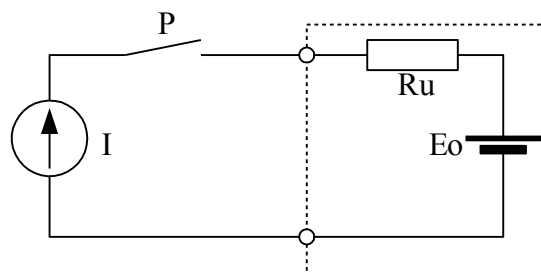
1. Ciklično punjenje baterija. (baterije se pune do kraja)
 - a. Punjenje konstantnom strujom (I metoda, I_{oIa} metoda)
 - b. Punjenje konstantnim naponom (U)
 - c. Punjenje s padajućom strujom (W_a , W_oW_a)
 - d. Kombinirano punjenje (IUI_a , IU)
 - e. Pulsno punjenje
2. Punjenje za održavanje
3. Izravnavajuće punjenje
 - a. Punjenje konstantnom strujom
 - b. Punjenje konstantnim naponom

Ciklično punjenje se odnosi na slučaj kada se akumulatroska baterije opetovano puni i prazni. **Punjenje za održavanje** odnosi se na slučaj da se trošilo normalno napaja iz čvrstog izvora napajanja a baterije se drži u tzv pripravnosti. **Izravnavajuće punjenje** se koristi da se smanje razlike u napunjenosti pojedinih ćelija.

Ovdje će biti predstavljeni osnovni algoritmi punjenja. Uređaji kojima se regulira punjenje nazivaju se *punjači*, o njima i drugim uređajima biti će govora u poglavlju 7.

6.3.6.1 Punjenje konstantnom strujom

To je najjednostavniji algoritam punjenja. Izvodi se izvorom konstantne struje. Vrijednost struje punjenja ovisi o kapacitetu i vrsti baterije. Obične mokre baterije s kapacitetom Q_t (t: nazivno vrijeme pražnjenja; 5, 10 ili 30 sati) pune se strujom inteziteta $Q_5/5$.



Slika 6.4 Punjenje konstantnom strujom

Mokre baterije se pune s $2,5 I_n$, želatizirane s I_n a AGM baterije sa $5I_n$. Pri čemu je I_n nazivna struja pri pražnjenja.

Za solarne baterije i za većinu stacionarnih baterija kapacitet se normira prema 20-satnom pražnjenje. To znači da akumulator može davati $Q/20$ ampera kroz 20 sati. Kod

trakcijskih baterija ponekad je nazivni kapacitet normiran prema 6-satnom pražnjenju a kod nekih stacionarnih čak i prema 100 satnom kapacitetu. Punjenje po ovoj metodi je najbrže i primjenjuje se za jednokratna punjenja manjih baterija. Kod punjenja se razvijaju plinovi odnosno nužno je prepunjavanje što nije preporučljivo za baterije s želatiziranim elektrolitom. Ne preporučuje se u paralelnom radu punjač, baterija trošilo.

Završni napon punjenja U_{max} je napon punjenja na stezaljkama akumulatora na kraju punjenja (prema gore definiranom uvjetu). Ovaj napon ovisi o struji punjenja. Veća struja punjenja traži veći završni napon punjenja (vidi dodatak). Donekle ovo je vidljivo iz izraza za napon punjenja konstantnom strujom:

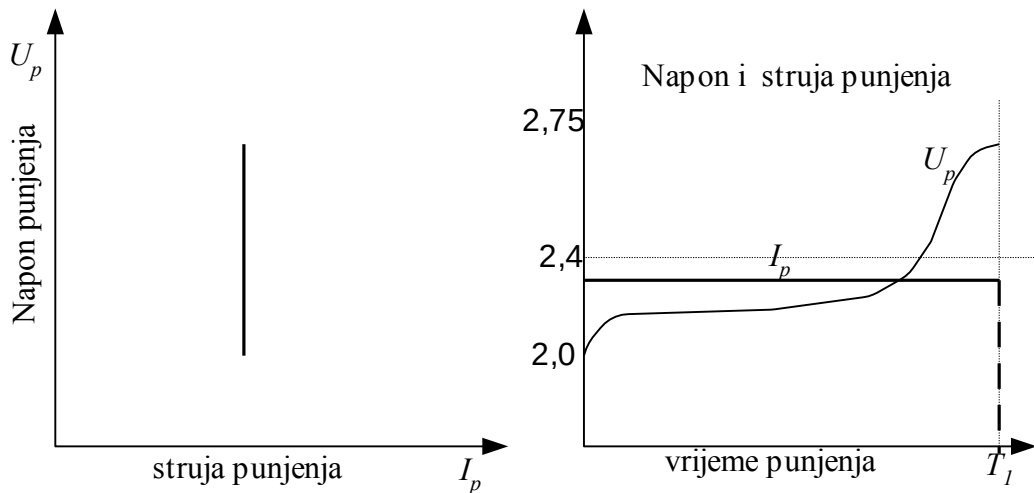
$$U_p = U_{OK}(Q) + R_u(Q)I_p, \quad (6.22)$$

gdje je

U_p	napon punjenja,
U_{OK}	napon otvorenog kruga odnosno elektromotorna sila,
R_u	unutrašnji otpor,
I_p	struja punjenja.

Unutrašnji otpor u ovom nadomjesnom (pojednostavljeni Theveninov) modelu je nelinearan i raste s strujom i stanjem napunjenosti.

Dozvoljeni završni napon punjenja za razliku od završnog napona punjenja koji je fizikalna vrijednost nekog procesa, je propisana vrijednost najviše dozvoljenog završnog napona punjenja. Dakle, ma kako punili napon punjenja ne smije preći tu vrijednost. Za olovne akumulatora ta vrijednost iznosi od 2,6 do 2,7 V/čeliji. Na slici 6.5 prikazane su strujno-naponska i vremenska karakteristika punjenja prema konstantnoj struji. Struje punjenja za pojedine vrste akumulatora dane su u tablici.



**Slika 6.5 Punjenje konstantnom strujom a) Strujno-naponska karakteristika
b) Vremenska karakteristika**

Punjenje ovom metodom je praktično za male akumulatorske baterije. Treba naglasiti da se ovakvim punjenjem nikad ne postiže 100% kapacitet. Razlog tomu je što se napon punjenja ograničava ispod U_{max} radi smanjenja isplinjavanja. Kod želatiziranih baterija mora se strogo voditi računa o prepunjavanju jer se lako mogu trajno oštetiti.

6.3.6.2 Punjenje konstantnim naponom

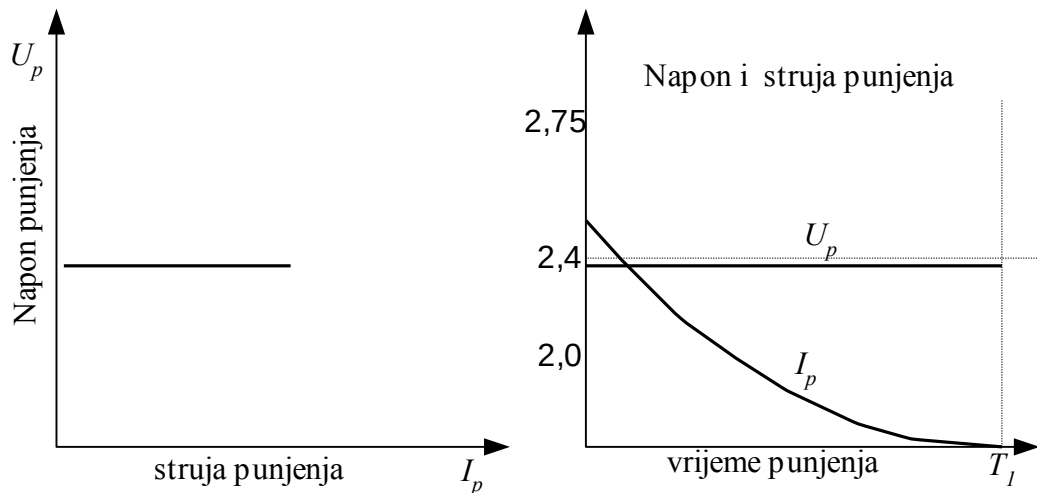
Napon punjenja se odabire tako da je isplinjavanje minimalno. I u ovoj metodi brzina punjenja isključuje isplinjavanje i obrnuto. Za razliku od predhodne metode ovdje brzina punjenja (%/min) opada prema kraju. Napon punjenja je cijelo vrijeme stalan i ako je njegova vrijednost manja od 2,4 V po ćeliji onda tijekom punjenja nema isplinjavanja. S druge strane brzina punjenja (proporcionalno struji) opada eksponencijalno. To je vidljivo iz izraza za struju punjenja pri konstantnom naponu:

$$p = \frac{U_p - U_{OK}(Q)}{R_u(Q)}, \quad (6.23)$$

pri čemu je:

I_p	struja punjenja,
U_p	napon punjenja,
R_u	unutrašnji otpor,
U_{OK}	elektromotorna sila članka odnosno napon otvorenog kruga,
Q	trenutni Kapacitet akumulatora.

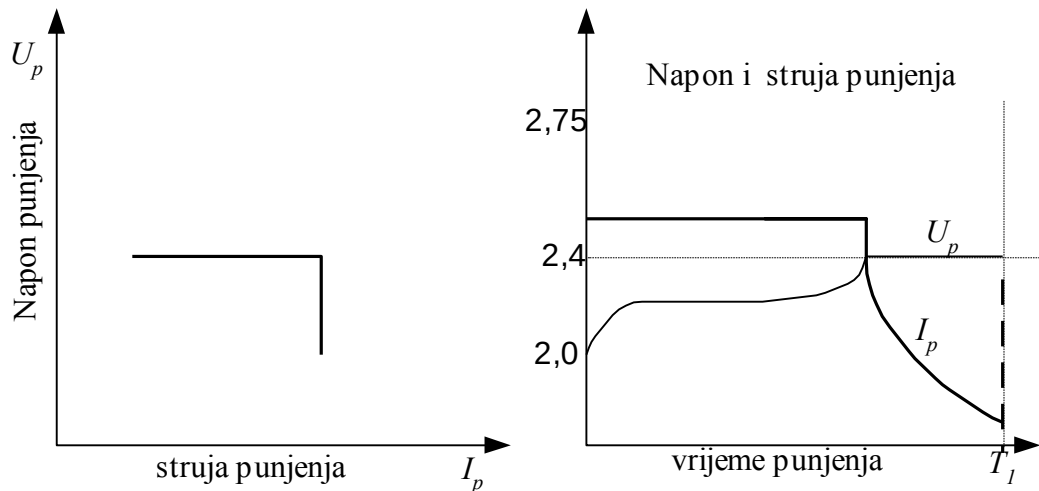
S obzirom da otpor raste sa stupnjem napunjenosti isto kao i E_0 , punjenje stalnim naponom nije dobro za puno punjenje akumulatora iz razlog što dugo traje. S druge strane ovim metodom se brzo baterija djelomično napuni i pogodno je za održavajuće punjenje.



Slika 6.6 Punjenje konstantnim naponom A) Strujno-naponska karakteristika B) Vremenska karakteristika

6.3.6.3 Punjenje prema IU karakteristik

Ova metoda je kombinacija dvije prethodno opisane metode. Često se naziva i dvostupanjska metoda. Sastoji se od toga da se akumulator prvo puni konstantnom strujom dok napon punjenja ne dostigne napon isplinjavanja $U_p = U_g = 2,4 \text{ V/ćeliji}$. Zatim se punjenje nastavlja konstantnim naponom. Na slici 6.7 prikazane su strujno naponske karakteristike punjenja prema IU karakteristici.



Slika 6.7 Punjenje IU karakteristikom A) Strujno-naponska karakteristika B) Vremenska karakteristika

Punjenje prema UI karakteristik se koristi u slučaju kada je baterije paralelno priključena na trošilo i neki drugi izvor energije posredno preko punjača. Upravo punjenje solarnih baterija odvija se korištenjem ove metode. Naime, prva faza osigurava gotovo 80-90 % kapaciteta, dok druga faza (konstantni napon) preostali dio bez isplinjavanja. Preciznije govoreći, punjenje solarnih baterija ima još jednu fazu: punjenje za održavanje.

6.3.6.4 Punjenje za održavanje

Ova vrsta punjenje akumulatorskih baterija se uglavnom koristi kada akumulatorska baterija radi paralelno sa trošilom i punjačem i dugo vremena stoji u pripravnosti. Baterija koja dugo stoji napunjenja gubi svoj kapacitet samopražnjenja. Ovo se osobito tiče mokrih akumulatorskih baterija (0,1-1% dnevno). Punjenje za održavanje može se izvesti na dva načina. U jednom slučaju nakon što je baterija napunjena nastavlja se punjenje sa malom strujom $Q/100 \text{ A}$. na taj način se održava napon ispod granice isplinjavanja. Drugi način, umjesto strujno, akumulator se nastavlja puniti konstantnim naponom 2,2 do 2,25 V po ćeliji. Ovo punjenje se često koristi kao treća faza u punjenju/održavanju solarnih baterija.

6.3.6.5 Punjenje za izravnavanje kapaciteta

Ovo punjenje se obavlja samo kada baterija nije priključena na trošilo. To je tzv. Servisno punjenje naponom većim za 10 % od normalnog. U stvari baterija se namjerno prepunjava. S obzirom da bateriju čine ćelije koji redovno nemaju identična svojstva, vremenom se događa da neke ćelije budu više a neke manje napunjene. Prepunjavanje uzrokuje intenzivnu pojavu

mjehurića koji miješaju elektrolit tako se sprečava zgušnjavanje elektrolita. Izravnavajuće punjenje kod mokrih baterija preporučuje se jednom mjesečno dok kod želatiziranih i AGM tipa baterija jedanput do dvaput godišnje.

6.4 Matematički model akumulatorske baterije

U ovom poglavlju razmatrane su fizikalne pretpostavke rada akumulatorske baterije. Konačni cilj ovog izlaganja je objašnjenje matematičkog modela koji će se u konačnici koristiti u simulacijskom programu fotonaponskog sustava. Pod matematičkim modelom rada akumulatorske baterije podrazumijeva se **strujno - naponska karakteristika**. Već na prvi pregled principa rada jasno je da se strujno naponska karakteristika značajno mijenja s vremenom odnosno sa stanjem napunjenosti. Razvijeno je niz matematičkih modela. Neki od njih će ukratko biti ovdje prikazani.

Modeli akumulatorske baterije mogu predstavljati stacionarnu karakteristiku ali mogu uzimati u obzir i neke tranzijente. Odnosno model može biti baziran na elektrokemijskim ili na termodinamičkim procesima. U svakom slučaju (što je u većini i slučaj) model akumulatorske baterije prikazuje se sljedećim setom jednadžbi:

$$U_B = U_{OK}(f) - E_p(f) - R_u(f)I_B, \quad (6.24)$$

pri čemu su:

U_B	napon na vanjskim stezaljkama akumulatorske baterije,
U_{OK}	napon otvorenog kruga, odnosno elektromotorna sila,
E_p	prenapon (vidi Dodatak),
R_u	unutrašnji otpor,
I_B	struja baterije,
f	stanje napunjenosti.

Napon otvorenog kruga, prenapon kao i unutrašnji otpor općenito ovise o niz drugih električkih i neelektričkih parametara:

Stanje napunjenosti	f ,
Kapacitet akumulatora	Q ,
Intezitet struje punjenja odnosno pražnjenja	I_{pu}/I_{pr} ,
Temperatura,	
Starost akumulatorske baterije.	

6.4.1 Shephardov model

Ovo je jedan od najpoznatijih i najupotrebljivanijih modela. Najvažnije pretpostavke u ovom modelu su : konstantna struja punjenja, odnosno pražnjenja, zatim ukupni pad napona razdijeljen je na pad napona na unutrašnjem omskom otporu i pad napona zbog polarizacije.

Unutrašnji omski otpor čini otpor elektroda, i otpor elektrolita. Otpor elektroda raste s povećanjem izlučenog naboja. Općenito se uzima da vrijednost omskog otpora opada eksponencijalno sa stanjem napunjenosti.

Polarizacija je opisana u dodatku. U ovom modelu se uzima linearna funkcija prenapona od struje akumulatora. S tim da se koeficijent linearnosti sa mijenja s stanjem napunjenosti f .

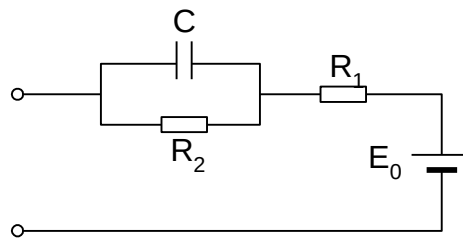
Ovaj model uzima u obzir tranzijente u početku punjenja i pražnjenja koji nastaju uslijed difuzije elektrolita. Ali ne računa s promjenom elektromotorne sile s pražnjenjem. Jednadžba koja opisuje napon akumulatorske baterije tijekom pražnjenja odnosno punjenja prikazana je slijedećom jednadžbom:

$$U_B = U_{OK} \pm K \left(\frac{Q}{Q - I_B t} \right) I_B \mp R I_B \pm A \exp \left(- \frac{B I_B t}{Q} \right), \quad (6.25)$$

pri čemu su A , B , Q , R , E_0 i K koeficijenti modela koji se određuju nelinearnom regresijom.

6.4.2 Ekvivalentni strujni krug

Modeliranje pomoću električnih krugova često se koristi u elektrotehnici. Najjednostavniji model tzv. Theveninov model prikazan je na sljedećoj slici:



Slika 6.8 Theveninov nadomjesni model akumulatorske baterije

Značenja pojedinih komponenti:

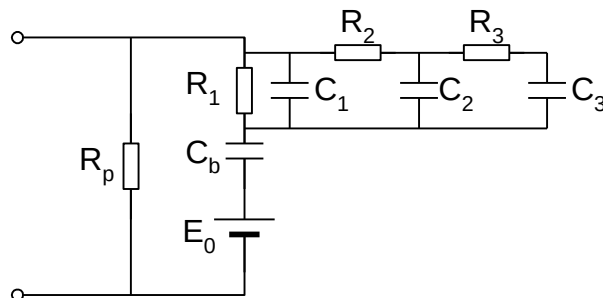
R_1	unutrašnji otpor akumulatorske baterije
R_2	omski udio u prenaponskom otporu
E_0	napon otvorenog kruga odnosno elektromotorna sila
C	kapacitivni udio u prenaponskom otporu

Paralelna veza RC-a predstavlja prenaponski otpor. U dodatku je opisan mehanizam djelovanja prenapona (aktivacijskog i koncentracijskog). Može se pokazati [lit. 33] da je za male vrijednosti struja, aktivacijski prenapon proporcionalan struji. Ovaj odnos je zadovoljen RC vezom. Model ne uzima u obzir unutrašnje gubitke. Točnost modela dolazi u pitanje zbog toga što vrijednosti električnih elemenata ovise o stanju akumulatorske baterije (temperatura, dubina ispražnjenosti, starost itd. ...)

6.4.3 Linearni električki model

Za razliku od Theveninovog modela, ovaj model ima linearne komponente, čija se vrijednost ne mijenja. Paralelno priključnicama spojen je nadomjesni otpor koji predstavlja unutrašnje gubitke. Prenapon je opisan serijsko paralelnom kombinacijom kondezatora i omskih otpora. U seriju sa izvorom E_0 spojen je kondezator koji predstavlja kapacitet akumulatora. Pri tom treba imati na umu da struja pražnjenja nikada nije potpuno konstantna, nego lagano opada kako se kondezator izbiju C_b i kada se potpuno isprazni, struja prestane teći. S druge strane, dok struja teče nadomjesni prenaponski blok zadržava dio potencijala. Prestankom toka struje, kondezatori se prazne preko otpornika R_1 , R_2 , R_3 , što predstavlja tranzijent napona zbog difuzije elektrolita iz unutrašnjosti i porast napona.

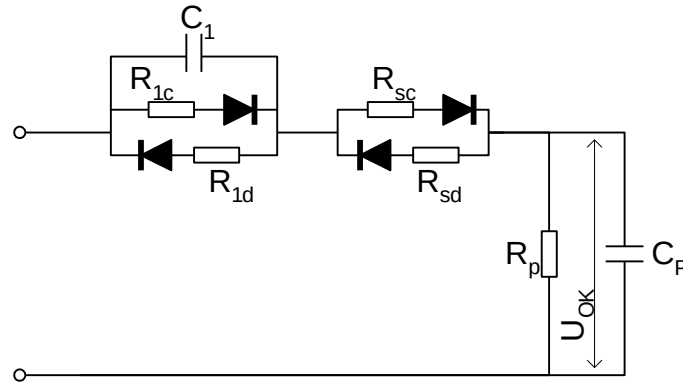
Na slici 6.9. prikazan je nadomjesni električni krug.



Slika 6.9 Linearni električni model

6.4.4 Nelinearni električni model

Za razliku od linearnog, ovaj model ima nelinearne komponente. Model razlikuje proces punjenja od procesa pražnjenja, što je prikazano pomoću idealnih dioda koje preusmjeravaju tok struje na odgovarajuće omske otpore. Topologija nelinearnog modela podsjeća na Theveninov model s tim da je dodan paralelni otpor kao otpor unutrašnjih gubitaka struje zbog samopražnjenja.



Slika 6.10 Nelinearni električni model

Kao što se vidi sa slike nelinearni model *nema* idealnog naponskog izvora koji predstavlja elektromotornu silu. Za zamjenu u ovom modelu koristi se vrlo velik kapacitet. U stanju mirovanja odnosno kada je $I_B = 0$ A kondenzator se izbija vrlo sporo preko otpora R_p dok se uslijed samopražnjenja potpuno ne isprazni.

Značenje električkih komponenti:

R_{1c}, R_{1d}	prenaponski otpor za vrijeme punjenja odnosno pražnjenja
R_{sc}, R_{sd}	unutrašnji otpor za vrijeme punjenja odnosno pražnjenja
C_1	prenaponski kapacitet
R_p	omski otpor uslijed samopražnjenja
C_p	kapacitet baterije

Sve električne komponente u ovom modelu imaju istu nelinearnu funkcijsku ovisnost o srednjem naponu:

$$BK = k_i \exp[wf(U_{sr} - U_{OK})]^{ff}, \quad (6.26)$$

gdje je :

BK	Nelinearni element koji se modelira,
k_i	pojačanje (jednako vrijednosti elementa pri srednjem naponu , jednakom U_{OK}),
wf	faktor eksponencijalne funkcije,
U_{sr}	srednji napon baterije,
ff	korekcijski faktor.

Parametri modela određuju se nelinearnom regresijskom analizom.

6.4.5 Hymanov model akumulatorske baterije

Ovaj model je korišten u simulacijskom programu, te će stoga ovdje biti detaljno obrađen. Hymanov model je modificiran Shephardov model. Za razliku od tog modela, polarizacijski pad napona je predstavljen Zimmerman-Petersonovom diodom dok je tranzijent napona baterije na početku rada izuzet iz modela. Može se reći da je model polu empirijskog tipa s jednadžbama:

$$U_B = U_{OK}(f) \mp U_d(I_B) \mp I_B R_{qc}(f). \quad (6.27)$$

Prvi znak (-) se odnosi na proces pražnjenja a drugi (+) na proces punjenja.

Prvi član predstavlja napon otvorenog kruga odnosno elektromotornu silu koja se linearno mijenja s dubinom pražnjenja. Ovaj zaključak se dosta dobro slaže s teorijom imajući u vidu linearnu ovisnost elektromotorne sile galvanskog elementa o gustoći elektrolita kao i teoretsku linearnu ovisnost predanog kapaciteta (Ah) i promjene gustoće elektrolita. Model uzima da se napon otvorenog krug U_{OK} u izrazu (6.27) razlikuje u procesu punjenja e_{0c} od istog u procesu pražnjenja e_{0d} . Ove vrijednosti nemaju fizikalno značenje nego predstavljaju ekstrapolirane vrijednosti napona otvorenog kruga kod snimanja poluempirijske karakteristike.

Punjenje akumulatora:

$$U_{OKc} = e_{0c} + g_{0c} f. \quad (6.28)$$

Pražnjenje akumulatora:

$$U_{OKd} = e_{0d} + g_{0d} f, \quad (6.29)$$

gdje su

- | | |
|----------|--|
| f | stanje napunjenosti ($f = 1$ kada je akumulator 100% pun), |
| g_{0c} | koeficijent u linearnoj vezi između $U_{OK}=F(f)$ za vrijeme punjenja, |
| g_{0d} | koeficijent u linearnoj vezi između $U_{OK}=F(f)$ za vrijeme pražnjenja. |

Drugi član predstavlja promjenu elektrodnih potencijala a time i napona akumulatora zbog polarizacije. U dodatku je opisana fenomenologija prenapona (promjena elektrodnog potencijala zbog polarizacije). Prenapon je logaritamska funkcija struje. Pri tom je struja galvanskog elementa ograničena maksimalnom difuzijom elektrolita. Ovaj član je nadomješten tzv. Zimmerman - Petersonovom diodom. Model ne uzima u obzir maksimalnu struju pražnjenja (dodatak) koja je ograničena difuzijom iona iz elektrolita (pri čemu je napon elektrode = 0V). Napon ZP diodi (Zimmerman-Petersonova dioda) definiran je sljedećim izrazom:

$$U_d(I) = \frac{1}{K_{ZP}} \ln \left(\frac{|I_B|}{I_{ZP}} + 1 \right). \quad (6.30)$$

Treći član izraza predstavlja pad napona na unutrašnjem otporu. Ovaj parametar također ima dvije vrijednosti ovisno o procesu u toku. Tako imamo za proces punjenja:

$$R_c = r_c \left(1 + \frac{m_c(1-f)}{\frac{Q_c}{Q_n} + f - 1} \right). \quad (6.31)$$

Odnosno u procesu pražnjenja:

$$R_d = r_d \left(1 + \frac{m_d(1-f)}{\frac{Q_d}{Q_n} + f - 1} \right). \quad (6.32)$$

Strujno naponska karakteristika se može napisati i u slijedećem obliku:

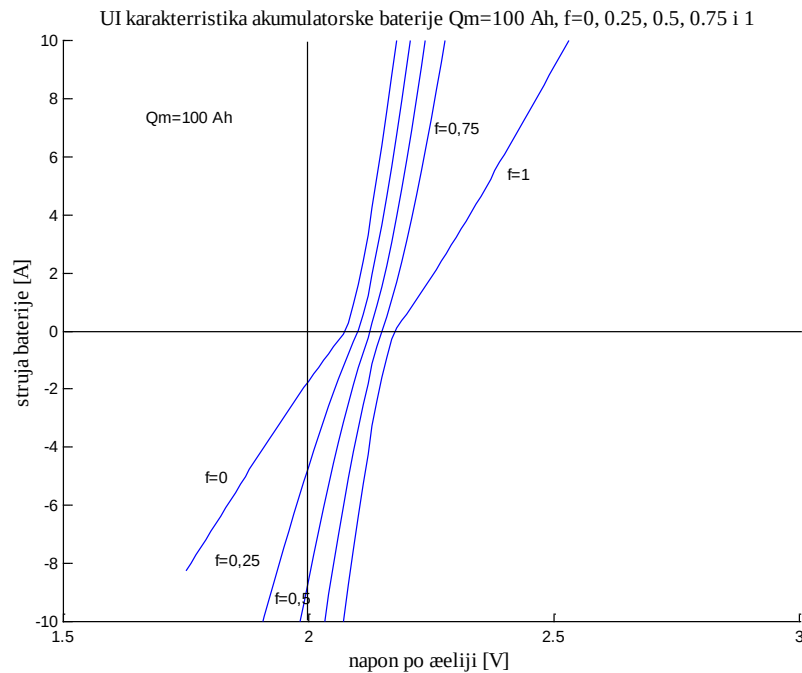
$$U_B = U_{OK} + \frac{1}{K_{ZP}} \ln \left(\frac{|I_B|}{I_1} + 1 \right) + I_B R. \quad (6.33)$$

Pri čemu je postularno uzeto da struja ima pozitivni predznak u procesu punjenja a negativni u procesu pražnjenja (kao trošilo). Koeficijenti modela ovise o smjeru struje, stanju napunjenosti temperaturi itd. ... U ovom modelu se zanemaruje temperaturna ovisnost. Kako je već naglašeno parametri strujno naponske karakteristike ovise o stanju napunjenosti. Ovaj parametar je definiran izrazom:

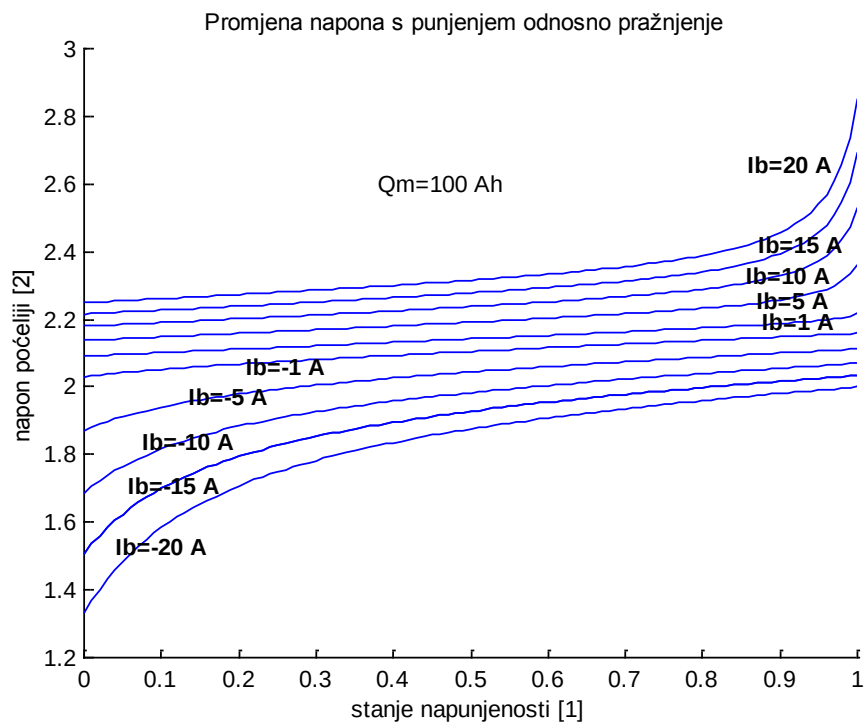
$$f = \frac{Q}{Q_n}, \quad (6.34)$$

pri čemu je Q trenutno raspoloživ kapacitet a Q_n nazivni kapacitet. Tijekom punjenja i pražnjenja javljaju se gubici kapaciteta koji utječu na promjenu kapaciteta akumulatora. Za razliku od Shephardovog modela, Hymanov model je prikladan za simuliranje. Model ne uzima u obzir prijelazne pojave na kraju i na početku pražnjenja. Za simulacijski program koji se ovdje razmatra te pojave nisu ni bitne. Naime simulacija početnog naponskog tranzijenta nije bitna jer je vremenski korak simuliranja red veličine vremenske konstante te pojave. Sa druge strane, akumulatorske baterije u fotonaponskim sustavima se obavezno koriste u sprezi s regulatorom koji isključuje bateriju pri niskim naponima tako da se to naponsko područje uopće ne pojavljuje. Na slikama 6.11 i 6.12 prikazan je Hymanov model akumulatorske baterije.

Ostali parametri modela su: $q_{0d} = q_{0c} = 0,1$ $e_{0c} = 2,25$ $e_{0d} = 2,1$ $m_c = 0,864$ $m_d = 1,0$,
 $Q_c = -0,0035Q_n$, $Q_d = Q_n/0,864$ $r_c = 3/Q_n$ $r_d = 0,5/Q_n$ $I_{ZP} = 2,5$ $K_{ZP} = 2,5$



Slika 6.11 UI karakteristika akumulatorske baterije za različita stanja napunjenosti



Slika 6.12 Promjena napona sa stanje baterije za različita stanja napunjenosti

Modeliranje gubitaka u procesu punjenja. Gubici tijekom punjenja su najčešće i jedini gubici koji se razmatraju. Tijekom punjenja, punjač mora predati višak amper sati da se ostvari potpuno punjenje. Višak amper sati podmiruje proces samopražnjenja i isplinjavanja. Dok se samopražnjenje uvijek događa, isplinjavanje se pojavljuje kod punjenja kada napon preraste određenu vrijednost. Prema [lit. 31] gubici tijekom punjenja opisani su izrazom (6.17). Stoga se stanje napunjenosti u procesu punjenja može izraziti:

$$\frac{df}{dt} = \frac{I_B(t) - I_{gas}(t)}{Q_{Bn}}. \quad (6.35)$$

Ako je vremenski korak simuliranja veći od nekoliko minuta što je ovdje i slučaj, uzima se da je struja punjenja **konstantna** tijekom tog vremenskog intervala. U tom slučaju stanje napunjenosti se računa prema:

$$f(t) = f(t-1) + \frac{(I_B - I_{gas})\Delta t}{Q_{Bn}}. \quad (6.36)$$

Struja isplinjavanja je najčešće glavni uzrok gubicima tijekom punjenja pa se ujedno i poistovjećuju sa strujom samopražnjenja. Ako nema potrošnje akumulatorske baterije, izraz (6.36) predstavlja promjenu stanja napunjenosti usljed *samopražnjenja*. U ovom modelu koristit će se sljedeći izraz za struju gubitaka:

$$I_g = I_{g0} f \exp[b(U1 - 2,23V)]. \quad (6.37)$$

pri čemu je $U1$ napon jedne ćelije akumulatorske baterije,
 f stanje napunjenosti,
 b konstanta. Prema [lit. 31] $b = 10 \text{ V}^{-1}$,
 I_{g0} struja gubitaka pri $f=1$ i $U1=2,23 \text{ V}$.

Proizvođači solarnih baterija obično navode vrijednost samopražnjenja sp izraženu u %/dan ili % (punog kapaciteta)/mjesec pri punom kapacitetu. Kada je baterija van pogona, napon ćelije je $U \approx 2 \text{ V}$. U tom slučaju struja gubitaka pri punom kapacitetu ($f=1$) iznosi približno:

$$I_g(Ib = 0, f = 1) \approx 0,1 I_{g0}. \quad (6.38)$$

Baterija s nazivnim kapacitetom Q_n i brzinom samopražnjenja od sp [%/dan]. Struja gubitaka kapaciteta I_g se prema tome može izračunati kao:

$$I_g(Ib = 0, f = 1) = \frac{Q_{Bn} \cdot sp}{2400} \approx 0,1 I_{g0}. \quad (6.39)$$

Dakle koeficijent I_{g0} iz jednadžbe (6.37) se može približno odrediti:

$$I_{g0} \approx \frac{Q_{Bn} \cdot sp}{24000}. \quad (6.40)$$

Napokon se dobiva stanje napunjenosti akumulatorske baterije:

$$f(t) = f(t-1) + \frac{I_B - I_{g0} f(t-1) \exp[C_V(U(t-1) - 2,23) + C_T(T - 20)]}{Q_{Bn}} \Delta t. \quad (6.41)$$

Modeliranje gubitaka u procesu pražnjenja. U procesu pražnjenja, gubici kapaciteta su drugačije prirode nego kod punjenja. Ovi gubici su neposredno prikazani Peukertovom formulom. Prema tome, promjena stanja napunjenosti u procesu pražnjenja iznosi:

$$f(t) = f(t-1) + \frac{I_B^n}{Q_{Bn} I_{Bn}^{n-1}} \Delta t. \quad (6.42)$$

Gdje je:

Q_{Bn}	nazivni kapacitet akumulatorske baterije
I_{Bn}	nazivna struja akumulatorske baterije
I_B	struja pražnjenja akumulatorske baterije
Δt	vremenski korak simulacije
f	stanje napunjenosti akumulatorske baterije
n	Peukertov koeficijent vidi (6.19)

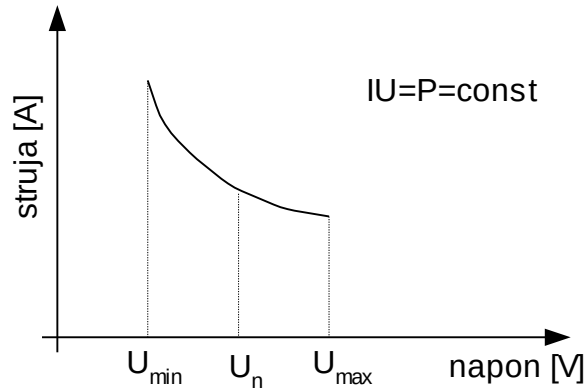
6.4.6 Primjer modeliranja punjenja i pražnjenja akumulatorske baterije

U ovom poglavlju je prikazan primjer simulacije rada tipične akumulatorske baterije na bazi olovo-sumporna kiselina u različitim prilikama tijekom punjenja i pražnjenja. Kapacitet baterije iznosi 100 Ah za 20-satno pražnjenje. Simuliran je vremenski period od 68 h što odgovara 1000 simulacijskih koraka po 4 minute. Simulacija obuhvaća punjenje i pražnjenje akumulatorske baterije u različitim situacijama prema sljedećem programu, a rezultati su prikazani u dodatku:

Tablica 6.1 Program punjenja i pražnjenja akumulatora

Oznaka na slici	Vremenski. Korak x 4 min	Vrsta sučelja	Nazivna vrijednost
I	0-200	Punjenje konstantnom strujom	4 A
II	200-240	Mirovanje	
III	240-300	Punjenje konstantnim naponom	13 V
IV	300-500	Pražnjenje preko konstantnog otpora	4 Ω
V	500-600	Mirovanje	
VI	600-800	Pražnjenje trošilom snage	100 W
VII	800-1000	Punjenje realnim izvorom	10 A

Na slici 6.1 prikazana strujno naponska karakteristika trošila snage 100W. Minimalni dozvoljeni napon je 10 V, maksimalni 14 a nazivni napon je 12 V.

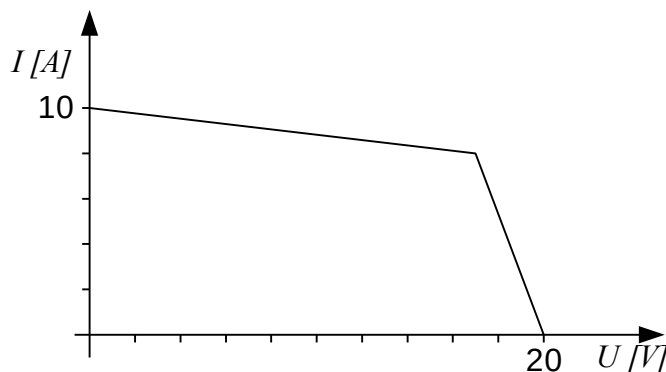


Slika 6.13 Strujno naponska karakteristika trošila snage

Na slici 6.14 je prikazana strujno naponska karakteristika realnog strujnog izvora. Ovaj izvor predstavlja grubo pojednostavljeno fotonaponskog modula. Strujno naponska karakteristika realnog strujnog izvora može se izraziti sljedećim izrazima:

$$I = 10 - \frac{2}{17}U \quad 0 < U < 17V \quad (6.43)$$

$$I = \frac{8}{3}(20 - U) \quad 17 < U < 20V$$



Slika 6.14 Strujno naponska karakteristika realnog strujnog izvora

NAPOMENA: Struje i napni u modelu predstavljenim izrazom (6.33) odnose se na jednu ćeliju(članak) akumulatora. Obično akumulator ima 6 članaka. Ako više akumulatora čini akumulatorski blok (npr. N_s serijski i N_p paralelno spojenih akumulatora), tada se napon i struja ćelije preračunavaju prema sljedećim izrazima:

$$I_B = \frac{I_{BBlok}}{N_p} \quad U_B = \frac{U_{BBlok}}{6 * N_s} \quad (6.44)$$

7. REGULACIJA U FOTONAPONSKOM SUSTAVU I TIPIČNA TROŠILA

7.1 Uvod

U 5. poglavlju obrađen je model fotonaponskog modula. U prethodnom poglavlju, razvijen je model akumulatorske baterije. Kao što je rečeno, fotonaponski moduli pretvaraju elektromagnetsku energiju toka fotona u elektromotornu silu. Akumulatorske baterije imaju mogućnost pretvorbe električne energije u kemijsku i tako na duže vrijeme spremiti energiju. Na kraju ovog pretvorbenog lanca su uređaji koji pretvaraju električnu energiju u koristan oblik energije (svijetlo, mehanička energija, toplina). Ovi uređaji se jednim imenom nazivaju trošila. S obzirom na strujnonaponsku karakteristiku, trošila su u ovom radu svrstana u nekoliko grupa:

- omska trošila (obične žarulje grijači, kuhala),
- trošila snage (elektronski uređaji, TV, Radio, PC...),
- induktivna trošila (motori, neke vrste svjetiljki -realna strujna trošila),
- trošila za izmjeničnu struju,
- specifična trošila (katodna zaštita, elektrolizatorske komore, akumulatorska baterija kao trošilo).

Razvoj pojedinih komponenti fotonaponskog sustava ide u više smjerova: razvoj komponente i razvoj sustava. Sam razvoj komponente je razumljiv sam po sebi. Međutim razvoj sustava je ustvari unapređenje funkcionalnosti različitih komponenti. Pod tim se podrazumijeva, što bolja interakcija pojedinih komponenata, stabilnost, sigurnost sustava s ciljem ostvarivanja primarne zadaće. Razvojem sustava razvijali su se tzv. *balansirajući uređaji* (engl. Balance of System). Skup funkcionalno povezanih balansirajućih uređaja čine balansirajući sustav.

U širem smislu balansirajući sustav čine:

- *Akumulatorske baterije.*

Pored tog tu su još:

- *Regulatori punjenja (i pražnjenja),*
- *Konstruktivski nosači fotonaponskih modula,*
- *Izmjenjivači,*
- *Ožičenje,*
- *Zaštite udara groma,*
- *Uzemljenja,*
- *Zaštita električnih krugova.*

U ovom poglavlju razmatra se model trošila, regulatora i pretvarača sa stajališta strujno naponske karakteristika.

7.2 Trošila u fotonaponskom sustavu.

Trošila se mogu podijeliti na dvije velike grupe: trošila istosmjerne i trošila izmjenične struje. U fotonaponskim sustavima najzastupljenija su istosmjerna trošila. Pri tome, tipična trošila su

1. vanjska rasvjeta
 - a. ulična rasvjeta
 - b. rasvjeta okućnice
 - c. rasvjeta kampova
 - d. rasvjeta gradilišta
 - e. rasvjeta znakova upozorenja
 - f. rasvjeta autoceste
2. unutrašnja rasvjeta
 - a. rasvjeta interijera na kampovima
3. TV
 - a. TV uređaji za brodove, kampove
4. Radio
 - a. Radio, stereo uređaji
5. pumpe za vodu
 - a. navodnjavanje
 - b. opskrba vodom
6. hladnjaci
7. ventilatori
8. električni rešo
9. elektronički uređaji za navigaciju
 - a. oprema na jedrilicama, jahtama, navigacijski uređaji u nuždi
10. elektronički uređaji za regulaciju i nadzor
 - a. nadzor prijelaza, dislocirane postaje
11. elektrokemijski reaktori- elektroliza
 - a. dobivanje pitke vode
12. katodna zaštita
 - a. zaštita metalnih konstrukcija.

7.2.1 Trošila za rasvjetu – električne svjetiljke.

Rasvjetna trošila su električne svjetiljke ili žarulje³ (sijalice), koji električnu energiju pretvaraju u svjetlosnu energiju. Klasične žarulje, rade na principu zagrijavanja žarne niti u vakuumu do usijanja odnosno sve dok užarena nit ne počne zračiti elektromagnetske valove u vidljivom dijelu spektra. Danas smo svjedoci masovne upotrebe "štednih" žarulja, temeljenih na plinskom izboju, koje su nekoliko puta učinkovitije od klasičnih.

³ Žarulja je naziv za skupinu električnih svjetiljki koji rade na principu žarenja tanke svinute niti u inernom plinu.

Postoje četiri osnovne grupe električnih svjetiljki koje se koriste u fotonaponskim sustavima [lit. 32], tablica 7.1.

Tablica 7.1 Pregled rasvjetnih uređaja

tip	Aktivni dio	SL	oblik	H
Klasične žarulje	Žarna nit u inertnom plinu	8-15	balon	1000
Halogene svjetiljke	Žarna nit u halogenom plinu	30	balon	2000
Fluorescentne svjetiljke	Živine pare i fosfor	50-75	cijev	4000
Niskotlačne natrijeve svjetiljke	Natrijeve pare	120	cijev	4000

Gdje su SL - specifični lumenitet $\left[\frac{lm}{W} \right]$, H - životni vijek $[h]$.

Specifični lumenitet je omjer jakosti gustoće svjetlosnog toka kojeg proizvod svjetiljka i električne snage koju troši svjetiljka.

Klasične svjetiljke sa žarnom niti – **žarulje**, maju žarnu nit od tungstena. Nit je spiralno uvijena i nalazi se u inertnom plinu. Nit se zagrijava do usijanja. Veliki dio električne energije se pretvara u toplinu a samo mali dio u svjetlosnu energiju. Zbog toga se žarulje manje koriste u fotonaponskim sustavima.

Halogene svjetiljke također imaju žarnu nit. Svjetljenje žarne niti se može učiniti učinkovitijim ako se poveća temperatura niti. Da bi se spriječilo isparavanje niti (nit ne gori u inertnom plinu), u balon svjetiljke dodaje se halogeni plin. Halogeni plin onemogućuje da žarna nit ispari. Na taj način je omogućena veća iskoristljivost energije. Ove žarulje se koriste u automobilima i sve više u interijerima (dućani, izlozi, stanovi).

Fluorescentne cijevi su uređaji za rasvjetu koji rade na principu fluorescencije fosfornog premaza unutrašnjosti cijevi. cijev ima na dva kraja po par kontakata spojenih žarnom niti. Cijev je ispunjena plinom živinih para. Kada se na kontakte primjeni visoki napon (100 V), u plinu živinih para stvara se UV svjetlost koja se preko fosfora pretvara u vidljivu svjetlost. Postoji više vrsta fluorescentnih cijevi s obzirom na boju svjetlosti: *univerzalno bijela, dnevno svjetlo i bijela*. Sama fluorescentna cijev, za razliku od sijalica sa žarnom niti ima negativnu strujno naponsku karakteristiku. Zbog toga se u sklopu cijevi nalazi uređaj sa zavojnicom (prigušnica) koji ograničava porast struje a ujedno služi za propaljivanje plina. Fluorescentne cijevi za istosmjerni napon imaju inverter i transformator kojima se osigurava visok izmjenični napon.

Niskotlačne natrijeve svjetiljke imaju najveću efikasnost. Ovaj tip se često koristi u fotonaponskim sustavima za rasvjetu vanjskih prostora jer proizvode žuto svjetlo.

Statička strujno naponska karakteristika električnih svjetiljki može se dobro opisati omskim otporom. Bez obzira što su fluorescentne cijevi kao i niskotlačne natrijeve sijalice, induktivna trošila, njihova stacionarna karakteristika se može nadomjestiti linearnom – omskom karakteristikom. To je moguće samo ako realne prijelazne pojave značajnije ne utječu na stacionarno stanje kao što je slučaj kod motora.

$$I_s = \frac{U_s}{U_n^2} P_n, \quad (7.1)$$

Pri čemu je: I_s – struja, U_s – napon, U_n – nazivni napon i P_n – nazivna snaga omskog trošila.

U fotonaponskim sustavima uglavnom se koriste fluorescentne sijalice (rasvjeta interijera) te sijalice s natrijevim parama (rasvjeta eksterijera) a rjeđe se koriste sijalice sa žarnom niti zbog loše djelotvornosti. Prosječna vrijednost gustoće svjetlosnog toka u prostorijama iznosi cca. 25 lm/m^2 , što za prostoriju od 20 m^2 zadovoljava fluorescentna svjetiljka od cca. 8W, tablica 7.2.

Tablica 7.2 Tipične vrijednosti za rasvjetu, korištenjem fluorescentna rasvjete

	$E [\text{lx}]$	$A [\text{m}^2]$	$\Phi [\text{lm}]$	$P [\text{W}]$
kuhinja	150	10	1500	25
spavaća soba	70	15	1050	18
boravak	70	20	1400	25
kupaonica	75	6	450	10
vanjska rasvjeta parkinga	15	50	750	15
rasvjeta cesta	10	--		

U tablici 7.2. veličine imaju slijedeća značenja: E_S - srednja vrijednost potrebne gustoće svjetlosnog toka- preporuka, A - tipična vrijednost površine, Φ_S - ukupno potrebni svjetlosni tok sijalice, P - električna snaga potrebna za fluorescentnu svjetiljku.

7.2.2 Trošila struje – elektromotori

Druga tipična vrsta trošila su pumpe i motori. Specifičnost ovih trošila jest izrazita induktivnost, što značajno utječe na radnu karakteristiku trošila. U fotonaponskim sustavima motori se pojavljuju kao pogonski uređaju pumpi i ventilatora. Motori općenito mogu biti izmjenični ili istosmjerni. Radna karakteristika motora značajno ovisi o tipu opterećenja. Najčešće su to centrifugalne pumpe primijenjene u različitim sustavima kao što su:

1. navodnjavanje,
2. opskrba vodom,
3. pumpanje vode u različitim pumpnim sustavima.

Istosmjerni motori imaju prednost u fotonaponskim sustavima jer se mogu izravno priključiti na fotonaponski generator. Korištenje izmjeničnog električnog motora korištenjem izmjenjivača je rjeđi slučaj te se ovdje neće posebno razmatrati. Sa stajališta fotonaponskog sustava, elektro-pumpno postrojenje predstavlja trošilo električne energije s određenom strujno naponskom karakteristikom. Ova karakteristika je potpuno određena tehničkim svojstvima sustava:

1. elektromotora motora,
2. pumpe,
3. pumpnog postrojenja.

U fotonaponskim sustavim uglavnom se koriste *nezavisno uzbuđeni istosmjerni motori* i *istosmjerni motori* sa serijskom uzbuđom (paralelni, rjeđe). Pumpe prema izvedbi rotora mogu biti *centrifugalne* ili *volumne*. Centrifugalne su pumpe više prisutne u fotonaponskim sustavima.

Precedura izvođenja strujno naponske karakteristike pumpnog sustava. Općenito strujnonaponska karakteristika istosmjernih motora opisana je sljedećim jednadžbama u stacionarnom stanju:

$$\begin{aligned}U_a &= K_e \Phi_m \omega_m + R_a I_a, \\M &= K_m \Phi_m I_a.\end{aligned}\quad (7.2)$$

pri čemu su:

I_a	struja armature,
U_a	napon armature,
Φ_m	uzbudni magnetski tok,
ω_m	brzina vrtnje rotora motora,
R_a	otpor armature,
M	zakretni moment motora,
K_e	konstrukcijska konstanta istosmjernog motora,
K_m	konstrukcijska konstanta istosmjernog motora.

Strujno naponska karakteristika elektromotora je prema tome parametarski ovisna o brzini vrtnje i o vrijednosti uzbuđenog magnetskog toka. Za istosmjerne nezavisno uzbuđene motore magnetski tok je konstantan a za serijske proporcionalan je struji armature.

Brzina vrtnje motora ovisi o opterećenju na osovini motora; u ovom slučaju to je pumpa i pumpno postrojenje. Bez ulaženje u razmatranje hidromehaničkih prilika u pumpama i pumpnim postrojenjima izlazne karakteristike pumpe i pumpnog postrojenja (Q-H karakteristike) mogu se aproksimirati polinomima:

$$\begin{aligned}H_p &= k_0 \omega_m^2 + k_1 \omega_m Q + k_2 Q^2 \\H_{pp} &= A + BQ^2\end{aligned}\quad (7.3)$$

pri čemu je

H_p	dobavna visina centrifugalne pumpe,
H_{pp}	dobavna visina pumpnog postrojenja,
A	visina pumpanja uvećana za razliku atmosferskog tlaka na donjoj i gornjoj koti pumpanja,
B	konstanta koja opisuje gubitke visine (tlaka) zbog lokalnih gubitaka kao i zbog trenja fluida,
k_0, k_1 i k_2	konstante,
ω_m	brzina vrtnje pogonskog motora pump.

Ove se konstante određuju empirijski za određenu pumpu i pumpno postrojenje i nisu predmet razmatranja. Izjednačavanjem dobavnih visina pumpe i pumpnog postrojenja dobiva se Q- ω karakteristika pumpnog sustava. S druge strane, iz danih tehničkih podataka, ili snimanjem radne karakteristike može se izvesti momentna karakteristika pumpnog postrojenja. Općenito karakteristika se može prikazati polinom čiji se koeficijenti mogu odrediti interpolacijom [lit. 34], [lit.35]:

$$M_{PS} = a_0 \omega_m^2 + a_1 \omega_m Q + a_2 Q^2 \quad (7.4)$$

Uvjet za izračun radne točke (protok i dobavna visina) pumpnog sustava dobiva se iz jednadžbe. $H_p(Q, \omega) = H_{pp}(Q)$. Ovako definirana radna točka predstavlja zapravo funkcijsku ovisnost brzina vrtnje i protoka $Q_{RT} = Q(\omega)$. Dakle ako je brzina vrtnje veća $\omega_1 > \omega_0$, radna točka pumpnog sustava će se uspostaviti pri nekom drugom protoku $Q_1 > Q_2$. Kombiniranjem jednadžbe radne točke $Q_{RT} = Q(\omega)$ i empirijske jednadžbe momenta pumpnog sustava $M_{PS} = M(Q, \omega)$ (7.4), dobiva se napokon momentna karakteristika $M = M_T(\omega)$ trošila kojeg istosmjerni motor osjeća na osovini.

Radna točka motornog pogona određena je brzinom vrtnje i momentom na osovini. Stacionarna vrijednost brzine vrtnje motora (nakon završetka prijelaznih pojava) se uspostavlja onda kada se pogonski moment motora izjednači sa ukupnim protumomentima na osovini koju čine momenti gubitaka i moment opterećenja. Dakle:

$$k_m \Phi_m I_a = M_T(\omega). \quad (7.5)$$

Iz ovog slijedi:

$$n = f_1(I_a). \quad (7.6)$$

Uvrštavanjem izraza (7.6) u (7.2) dobiva se napokon strujno naponska karakteristika elektromotornog pogona:

$$U_a = k_e \Phi f_1(I_a) + I_a R_a \Rightarrow I_a = f_2(U_a). \quad (7.7)$$

Poznavanjem struje i napona motora lako se može odrediti trenutni protok pumpe, kao i brzinu vrtnje. Važno je naglasiti da većina elektro-pumpnih postrojenja ima potezni moment veći od nule. To praktički znači da je za pokretanje direktno spojene pumpe na trošilo potrebna određena potezna struja. Ova činjenica je jako važna za rad solarnih pumpi za vodu jer se pri malim ozračenjima usprkos činjenici da ima dovoljno električne energije, pumpa ne može pokrenuti jer nema dovoljno velikog poteznog momenta.

U dodatku je prikazan primjer izvođenja strujno naponske karakteristike solarne pumpe tvrtke **Dankoff Solar Centrifugal Pump 7340-36 PV** kojom se pumpa voda na visinu od 20 m kroz klasične crne bešavne cijevi, promjera 1,5 zolla (38,1 mm). Ukupna duljina cjevovoda je 25 m [lit. 35].

NAPOMENA: Računa se s tim da regulator isključuje motor kada protok padne na nulu ili ima negativnu vrijednost radi zaštite lopatica rotora. Zbog toga strujno naponska karakteristika ima diskontinuitet u točki (U_{min} , I_{min}) pri kojoj je brzina vrtnje motora jednaka kritičnoj brzini. Ako bi npr. napon na motoru bio manji od U_{min} , brzina vrtnje bi se uspostavila na vrijednosti manjoj od kritične i voda bi tekla u suprotnom smjeru. To područje rada pumpe nije prirodno te nije obuhvaćeno statičkom karakteristikom pumpe.

Drugi način određivanja strujno naponske karakteristike polazi od eksperimentalno određene momentne karakteristike opterećenja.

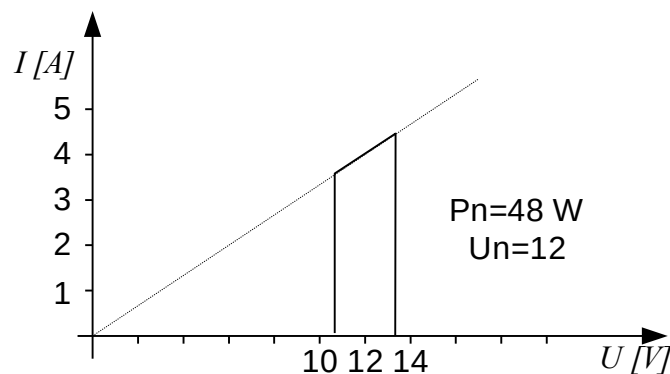
7.2.3 Elektronička trošila

U ovu grupu trošila spadaju televizori, radio uređaji, videoplayeri. Električna svojstva trošila predstavljena su nazivnim naponom i nazivnom snagom. Elektronička trošila rade u uskom pojasu radnog napona oko nazivne vrijednosti. U ovom simulacijskom programu računa se da je dozvoljeno odstupanje ulaznog napona $\pm 10\%$ nazivne vrijednosti. S obzirom da se ovdje razmatraju stacionarna stanja, može se pretpostaviti omska proporcionalnost struje i napona trošila:

$$I_T = \frac{U}{U_n} P_n \quad 0,9U_T < U < 1,1U_T, \quad (7.8)$$

$$I_T = 0 \quad 0,9U_T > U > 1,1U_T.$$

Strujno naponska karakteristika ove grupe trošila prikazana je na slici 7.1.



Slika 7.1 strujno naponska karakteristika elektronskog trošila

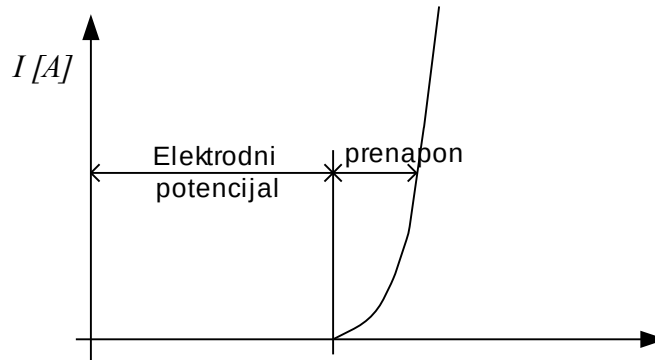
7.2.4 Ostala trošila

Neka trošila ne spadaju ni u jednu od ovih grupa. Simuliranje rada takvih uređaja je moguće uz poznavanje izlazne karakteristike uređaja. Tako npr. komora za elektrolizu je jedan od takvih specifičnih trošila. Elektrokemijske prilike u galvanskom elementu opisane su detaljno u dodatku. Uređaj koji troši istosmjernu struju za izvođenje procesa stvaranja ili izlučivanja kemijskih elemenata (elektroliza vode – dobivanje vodika) nazivaju se *elektrokemijskim reaktorima*. Strujno naponska karakteristika komore za elektrolizu vode sukladno [lit. 37] prikazana je na slici 7.2.

Katodna zaštita metalnih konstrukcija je u posljednje vrijeme vrlo česta primjena fotonaponskog sustava. Strujno naponska karakteristika katodne zaštite ovisi o nizu faktora i uglavnom se određuje empirijski na konkretnom primjeru.

Hladnjaci i ventilatori kao trošila koja se pojavljuju u fotonaponskim sustavima mogu se svesti na primjer pumpnih trošila. Dublja analiza rada ovih trošila prelazi okvire i temu

ovog rada. Simulacijski program ostavlja mogućnost korisniku da sam definira strujno naponske karakteristike pojedinih vrsta trošila.



Slika 7.2 Primjer strujno naponske karakteristike komore za elektrolizu.

Opća strujno naponska karakteristika trošila može se predstaviti polinomom. Uzimajući u obzir sva spomenuta trošila, opća strujno naponska karakteristika glasi:

$$I = k_0 + k_1 \sqrt{U} + k_2 U + k_3 \sqrt{U}^3 + k_4 U^2 + k_5 \sqrt{U}^5 + k_6 U^3 + k_7 \sqrt{U}^7 + k_8 U^4 + k_9 \sqrt{U}^9 + k_{10} U^5. \quad (7.9)$$

Za omska trošila vrijedi:

$$k_0=0, k_1=0, k_3=0, k_4=0, k_5=0, k_6=0, k_7=0, k_8=0, k_9=0, k_{10}=0, \quad (7.10)$$

$$k_2 = \frac{P_n}{U_n^2}.$$

Za ostala trošila koeficijenti polinoma se određuju nelinearnom regresijom.

7.3 Regulacija u fotonaponskom sustavu

S obzirom da je fotonaponski modul nestalan izvor električne energije, potrebno je između modula, trošila i akumulatorske baterije postaviti uređaje za regulaciju toka električne energije. Glavna funkcija opreme za regulaciju je povećanje djelotvornosti protoka energije, povećanje pouzdanosti opskrbe i zaštitu komponenata.

Regulacija u fotonaponskom sustavu može se promatrati kroz sljedeće grupe:

1. Regulacija napona i snage fotonaponskog modula (generator)
2. Regulacija napona i struje akumulatorske baterije
3. Regulacija napona i struje trošila

Neke vrste regulatora obavljaju jednu, dvije pa čak i sve tri funkcije regulacija. U ovom poglavlju opisani su modelirani neki od takvih uređaja.

7.4 Regulator punjenja i pražnjenja akumulatorske baterije

Regulatori punjenja i pražnjenja RPP⁴ su uređaji koji se koriste u fotonaponskim sustavima s akumulatorskim baterijama. Naime, ovi uređaji osiguravaju pouzdan rad baterije tijekom punjenja i pražnjenja. Postoji više vrsta RPP-a ovisno o veličini fotonaponskog sustava, o snazi i nazivnom naponu.

Glavna zadaća postojećih RPP-a može se definirati sljedećom rečenicom [lit. 20]:

Regulatori punjenja i pražnjenja moraju isključiti trošilo kada baterije dostigne propisanu razinu ispražnjenosti (od 20% do 80% punog kapaciteta) i mora prekinuti punjenje fotonaponskim modulom kada se baterija napuni.

Razne varijacije na prethodno izrečenu definiciju rezultirale su nizom različitih tipova RPP-a. Važno je napomenuti da se u ovom radu razmatraju i modeliraju postojeći tipovi regulatora koji se mogu naći na tržištu bez upuštanja u inovacije regulatora za što po mišljenju autora ima osnove. Princip rada regulatora je sukladan s teorijom o održavanju akumulatorskih baterije opisanoj u poglavlju 6. Regulatori se međusobno razlikuju u specifičnostima ali svi imaju zajedničku osnovu.

Stanje napunjenosti akumulatorske baterije indirektan je pokazatelj procesa unutar baterije i može se ustanoviti mjerenjem gustoće elektrolita pod određenim uvjetima. Međutim, ovo je nepraktično pa se stoga stanje napunjenosti u regulatoru utvrđuje mjerenjem **napona** akumulatorske baterije tijekom rada i na temelju postavljenih vrijednosti vrši promjenu načina rada. Za svaki regulator karakteristične su četiri postavne vrijednosti:

- **Napon isklapanja punjenja VR:** To je vrijednost napona baterije pri punjenju kada se punjenje baterije maksimalnom strujom prekida potpuno ili se napon punjenja regulira. Pri tom naponu proces isplinjavanja postaje intenzivniji.
- **Napon ponovnog uklapanja HVR:** Pri ovom naponu baterija se nakon isklapanja kod punjenja ponovo uklapa. To je tzv histereza u regulaciji napona. Naime, ako bi se punjenje ponovo uklopilo kada napon padne ispod razine VR, došlo bi do osciliranja. Razlog tomu je što napon pada inherentno po isklapanju, zbog nestanka pada napona na unutrašnjem otporu.
- **Napon isklapanja trošila LVD:** Ova funkcija regulatora se može ostvariti i posebnim uređajem. Integrirano u sam regulator osigurava potpunu zaštitu akumulatora od prevelikog pražnjenja. Naime, kada napon baterije padne na određenu vrijednost, trošilo se isklapa radi zaštite od prevelikog pražnjenja.

⁴ (engl: Charge Controller).

- **Napon ponovnog uklapanja trošila LVR:** Slično kao i kod HVR, kada uslijed punjenja neopterećene baterije, napon na stezaljkama baterije poraste na vrijednost LVR, trošilo se ponovo priključuje.

Neki regulatori imaju pet odnosno šest postavnih vrijednosti:

- **Napon isplinjavanja Veq:** Pri tom naponu se prekida punjenje maksimalnom strujom i regulator prelazi u drugu fazu punjenja: kontinuirano smanjenje struje punjenja. Ova postavka nalazi se između VR i HVD.
- **Napon upozorenja Vlow:** pri tom naponu regulator zvučno upozorava da se napon baterije približava nedozvoljenoj niskoj vrijednosti i omogućuje korisniku da ručno isklapa trošila prema želji. Ova postavna vrijednost napona nalazi se između LVD i LVR.

7.4.1 Tipovi regulatora punjenja i pražnjenja

Prema [lit. 37] regulatori se s obzirom na način odvođenje viška energije iz modula, dijele na:

1. *Paralelne,*
2. *Serijske.*

S druge strane regulatori se s obzirom na broj stupnjeva punjenja akumulatorske baterije dijele na:

1. *Jedno ili dvo – stupanjski regulatore,*
2. *Trostupanjske regulatore s PWM-om,*
3. *Trostupanjske regulatore s funkcijom praćenja optimalne radne točki (MPPT).*

Ukratko će biti opisani regulatori prema prvoj podijeli:

Paralelni (Shunt) regulatori kontroliraju punjenje kratkim spajanjem fotonaponskog generatora ili njegovim premošćivanjem promjenljivim otporom. Regulator koristi blokirajuću diodu za sprječavanje pražnjenja baterije preko kratkospojnika ili shunta.

- *Paralelno-linearni regulator:* ima regulirajući element koji osigurava konstantan napon pri čemu taj element kontrolira višak struje koju proizvodi FNG.
- *Paralelno-pulsni*, za razliku od linearnog, regulirajući element kratko spaja FNG s obzirom na postavne vrijednosti napona. Punjenje akumulatora se odvija u prekidima pa se regulatori ovog tipa nazivaju i pulsni.

Serijski regulatori za razliku od paralelnih (ili shunt) imaju regulacijski element spojen u seriju s trošilom odnosno baterijom. Postoji nekoliko podvrsta ovog tipa (algoritma) regulatora punjenja [lit. 37]:

- *Serijsko-pulsni*. Ovaj tip regulatora, otvara stezaljke fotonaponskog izvora kada napon akumulatorske baterije dostigne postavljenu vrijednost VR. Padom napona zbog pražnjenja na vrijednost HVR, regulator ponovo uklapa punjenje. Struja punjenja dakle dolazi u mahovima odnosno u impulsima.
- *Serijsko-pulsni, dvo-stupanjski, s konstantnom strujom*. Kada napon baterije dostigne postavljenu vrijednost VR, struja punjenja se ograničava na određenu vrijednosti. Ovaj algoritam je poboljšanje djelotvornosti punjenja u odnosu na prethodni algoritam.
- *Serijsko-pulsni, dvo-stupanjski s dvije naponske postavke*. Za razliku od dosada opisanih serijskih regulatora, ovaj ima dvije naponske postavne vrijednosti VR1 i VR2. Kad napon baterije uslijed punjenja dostigne vrijednost VR1, punjenje se nastavlja konstantnim naponom VR2 ($VR2 < VR1$).
- *Serijsko-pulsni, PWM regulator*. Regulacijski element u ovom slučaju temelji se na pulsno širinskoj modulaciji⁵. PWM regulacija napona se vrši izmjeničnim uklapanjem i isklapanjem strujnog kruga koji puni određeni energetske spremnik. Za vrijeme uklapa, izvor puni energetske spremnik određenom strujom, a za vrijeme isklapa, energetske spremnik napaja trošilo nekom drugom strujom. Regulator ima filtre za "peglanje impulsnih struja". Omjeri struja koji trošilo prima i koje izvor predaje direktno ovise o omjeru vremena uklapa i vremena isklapa. Bez ulaženja u tehničke detalje moguće je podesiti bilo koji napon punjenja akumulatorske baterije sa značajno smanjenim gubicima u odnosu na druge regulacijske elemente.
- *Serijsko-pulsni regulator s preklapanjem polja*. Fotonaponski generator⁶ čine nizovi serijsko paralelno spojenih polja. Pojedina polje istog napona paralelno se spajaju do željenog iznosa struje odnosno snage. Kako se baterije pune tako je sve manje struje potrebno za punjenje. U ovom algoritmu, isklapaju se dijelovi fotonaponskog generatora s ciljem smanjenja struje punjenja.
- *Serijsko-linearni regulator s konstantnim naponom*. Slično poput Paralelno-linearnog regulatora, napon se regulira preko promjenljivog otpornika na kojemu napon ne prelazi određenu vrijednost. Jednostavan primjer takvog regulacijskog elementa je serijski spoj otpornika i odgovarajuće zener diode.

Temperaturna kompenzacija se odnosi na promjenu postavnih vrijednosti regulatora s promjenom temperature. S padom temperature smanjuje se kapacitet akumulatorske baterije odnosno s porastom akumulatorska baterija se može napuniti više. S tim u vezi je potrebno korigirati postavnu vrijednost napona VR (maksimalno dozvoljeni napon baterije). To znači da se pri nižim temperaturama može se dozvoliti veća granična vrijednost napona VR. Dakle temperaturni koeficijent promjene ovog napona je negativan i iznosi približno za sve baterije cca $-5\text{mV}/^\circ\text{C}/\text{ćeliji}$ [lit.37] u skladu s relacijom:

$$VR(T) = VR(25^\circ\text{C}) - 0,05(T - 25). \quad (7.11)$$

Strujna kompenzacija se odnosi na naponsku postavku LVD (iskapanje trošila). Naime, veća struja punjenja ima manji završni napon pražnjenja. Naime, za svaki amper trošila iznad nominalne vrijednosti LVD treba smanjiti za 20 mV. Kada ne bi bilo tog svojstva, regulator

⁵ PWM engl: Pulse-Width Modulation

⁶ Naziva se i fotonaponsko polje (Photovoltaic array)

bi pri veliki strujama potrošnje registrirao napon koji upućuje na donju razinu stanja napunjenosti. Međutim upravo zbog velike struje pražnjenja, velik je pad napona.

$$LVD(I) = LVD(I_n) + k_{LVD} \frac{I}{I_n}, \quad (7.12)$$

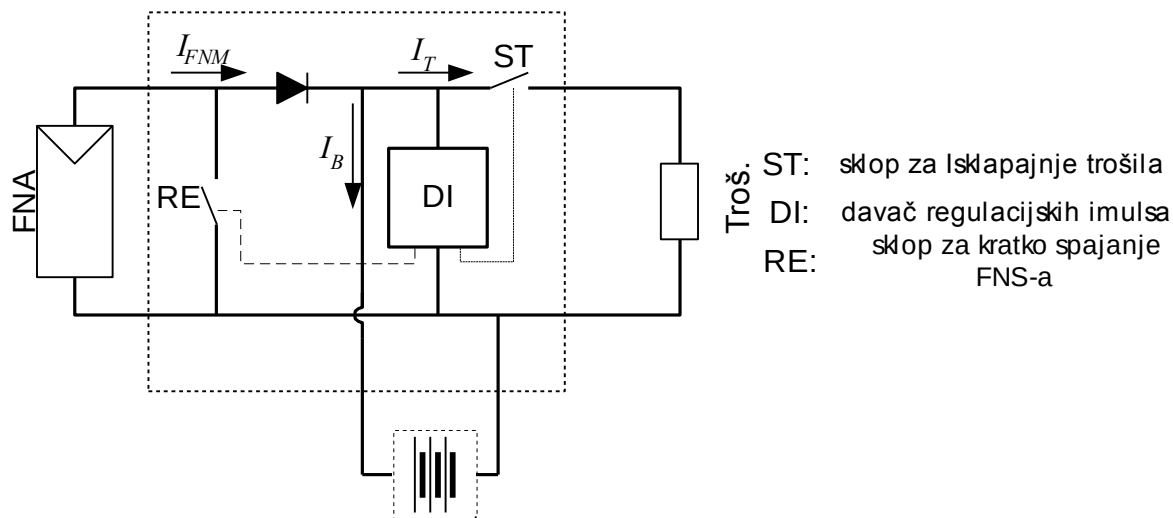
pri čemu je k_{LVD} koeficijent strujne kompenzacije naponske postavke LVD. Samo neki regulatori punjenja imaju ovo svojstvo. Za to je potrebno između ostalog imati davač temperature akumulatorske baterije koji se montira na vanjsku stjenku baterije.

Suvremeni regulatori punjenja akumulatorskih baterija u fotonaponskim sustavima često se baziraju na trostupanjnom algoritmu s PWM regulacijom. Razvojem tragača maksimalne snage tzv. MPPT (sljedeće podpoglavlje) sve češće se pojavljuju regulatori punjenja s tom funkcijom. Poznavanje vrsta regulatora, njihovih osobina i cijena jako je važno za odabir primjerenog regulatora. Naime visoko sofisticiran regulator u malim sustavima značajno povećava cijenu, a za razliku od poboljšanja koja su često manje značajna.

7.4.2 Model regulatora punjenja i pražnjenja

Svaki regulator je opisan svojim tehničkim podacima. Najvažniji podaci su postavne vrijednosti napona VR, HVR, LVD, LVR. Pored toga, bitno je poznavati strujna i naponska ograničenja kako za fotonaponski agregat tako i za trošilo⁷. Ovdje su prikazani samo neki modeli regulatora.

Model paralelno-pulsnog regulatora: Model je prikazan na slici 7.3.



Slika 7.3 Model paralelno-pulsnog regulatora.

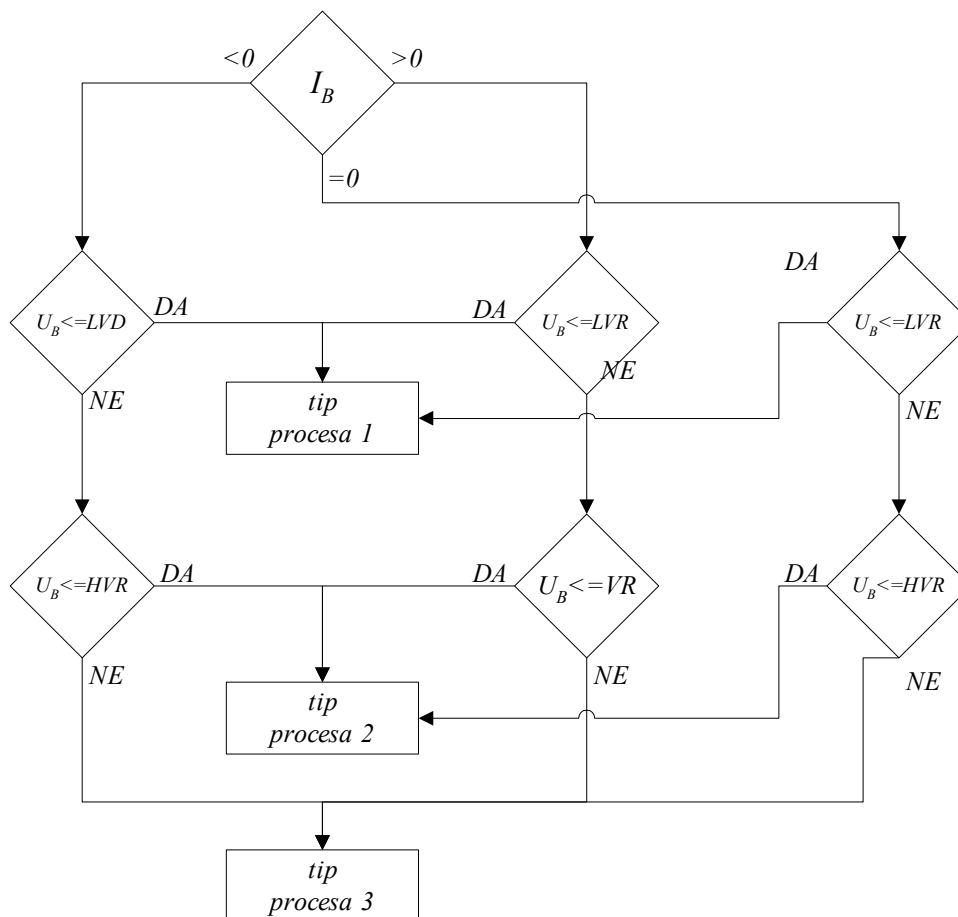
⁷ Ovi podaci su bitni kod projektiranja fotonaponskog sustava

Ovisno o stanju akumulatorske baterije, smjeru struje i uz pravilno djelovanje regulatora razlikujemo sljedeće slučajeve, koji se mogu nazivati *tipovi algoritma*:

Tip 1: Akumulatorska baterija se prazni, napon baterije uslijed velikog opterećenja i nedovoljnog ozračenja pada ispod vrijednosti LVD. Regulator isključuje trošilo i baterija ostaje direktno priključen na FN modul. Radna točka sustava određena je naponom U_S pri kojemu je struja punjenja baterije jednaka struji modula. S obzirom da su strujno naponske karakteristike modula $I_{FN}=f_{FN}(U_S)$ i baterije $I_{BAT}=f_{BAT}(U_S)$ izrazito nelinearne, napon U_S nalazi se iteracijski tako da vrijedi $f_{BAT}(U_S)=f_{FN}(U_S)$. Punjenjem napon baterije raste. Regulator ponovo uključuje trošilo tek kada napon poraste na vrijednost LVR.

Tip 2: Ako je kod punjenja napon veći od LVR i manji od VR modul izravno i maksimalno mogućom strujom puni bateriju i napaja trošilo istodobno. Napon sustava se nalazi iteracijski s funkcijom cilja $dI=I_{FN}+I_{BAT}-I_T=0^8$. Isto ovo vrijedi ako je pri pražnjenju napon manji od HVR a veći od LVD.

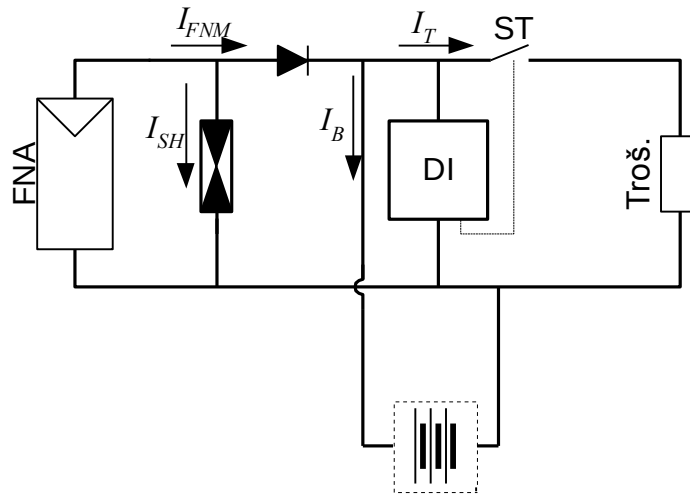
Tip 3: Akumulatorska baterija je izravno priključena na trošilo, a modul je isključen. Ovaj slučaj se odnosi na situaciju kada napon akumulatorske baterije kod punjenja dostigne vrijednost VR ili kada kod pražnjenja napon baterije postane veći od HVR. Algoritam rada ovog regulatora prikazan je na slici 7.4.



Slika 7.4 Algoritam rada paralelno-pulsnog regulatora.

⁸ Iteracija se provodi na isti način kao u tipu 1. Struja I_B je pozitivna ako se baterija puni.

Model paralelno-pulsnog regulatora s konstantnim naponom (linearni), (slika 7.5) : Za razliku od prethodnog regulatora koji je najjednostavniji, i najjeftiniji ovaj tip regulatora zadržava napon baterije na razini VR. Razlog tomu je nepotpuno punjenje baterije regulatorom kao u prethodnom primjeru. Konstantan napon se održava tako da se višak struje odvodi preko shunta a prema bateriji se propušta točno onoliko struje koliko je potrebno za punjenje baterije i opskrbu trošila na naponu VR. To se još naziva i linearna regulacija napona. Za ovaj tip regulatora karakteristično je da je $VR = HVD$, to znači da regulator drži napon VR proizvoljno dugo.

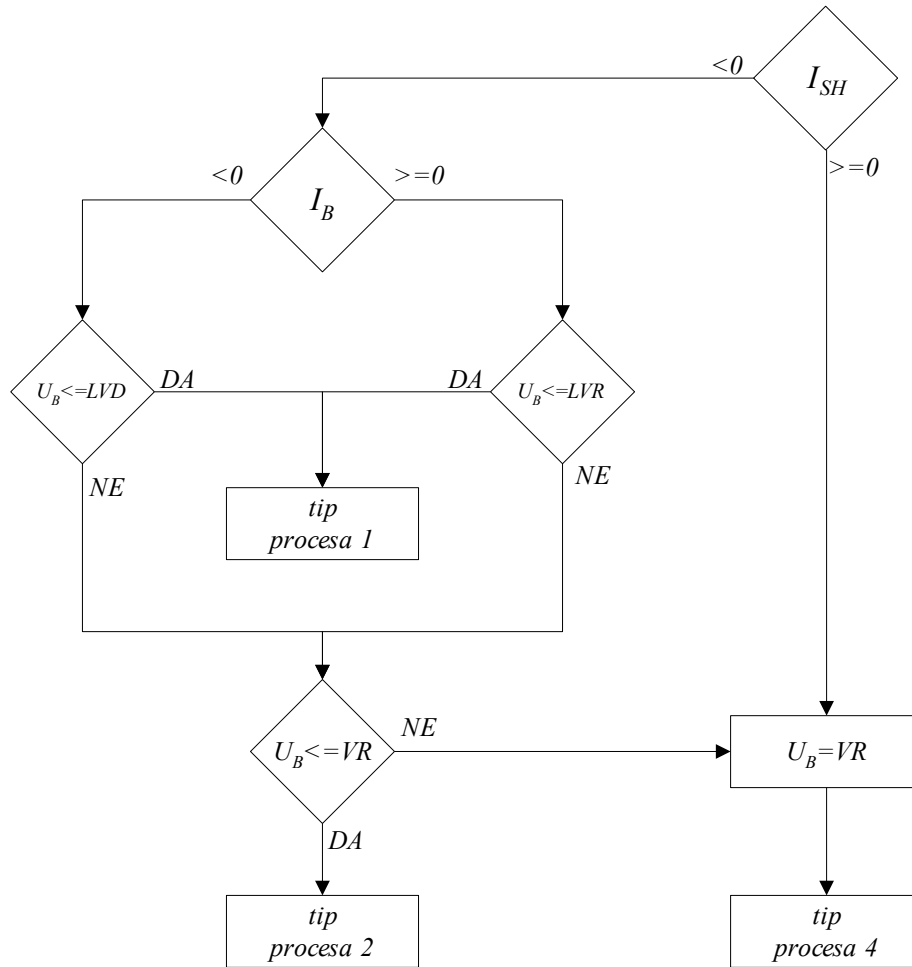


Slika 7.5 Blokowska shema paralelno-pulsnog regulatora s konstantnim naponom

Opis: Proces opisani pod *tip 1* i *tip 2* isti su kao u prethodnom primjeru. Ovdje se uvodi novi tip algoritma koji opisuje situaciju kada regulator zadržava napon VR konstantnim i to je opisano na slijedeći način:

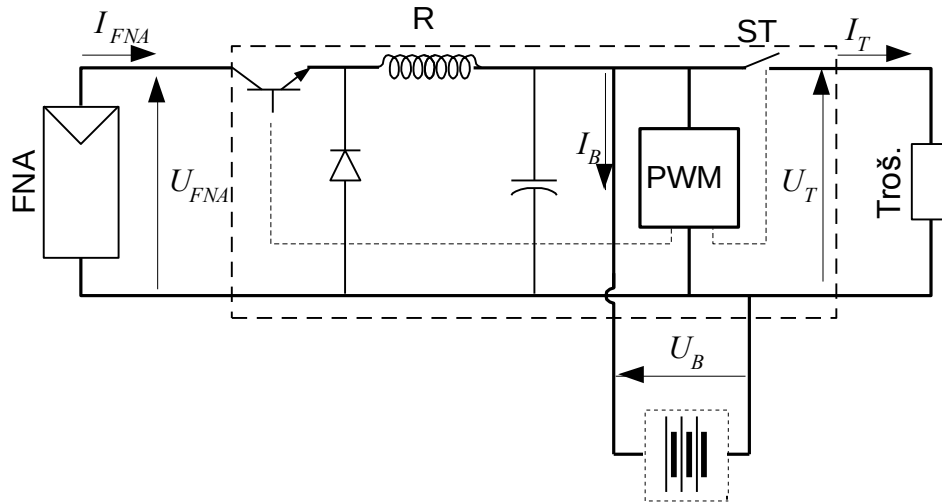
Tip 4: Kada napon baterije dostigne vrijednost VR, paralelni regulacijski element (shunt) odvodi višak struje koju proizvodi modul. Algoritam provjerava vrijednost struje $I_{SH} = I_{FN}(VR) + I_B(VR) - I_T(VR)$. Sve dok je sukladno odgovarajućim strujno naponskim karakteristikama baterije, modula i trošila, vrijednost $I_{SH} > 0$ napon sustava ostaje jednak U_G .

Kada uslijed porasta potrošnje ili pada ozračenja vrijednost parametra I_{SH} padne ispod nule, to praktički znači da nema viška struje te da se sva struja koju može proizvesti modul troši na punjenje baterije i trošila. Uslijed daljnjeg porasta potrošnje napon će početi padati ispod vrijednosti VR. U dodatku su dani strujno naponski dijagrami redom po svim tipovima algoritma.



Slika 7.6 Algoritam paralelno-pulsnog regulatora s konstantnim naponom

Model serijskog regulatora s PWM regulacijom konstantnog napona: (slika 7.7) Ovaj model je dosta sličan prethodnom modelu s tom razlikom da PWM regulacija napona osigurava proizvodnju energije točno dovoljnu za punjenje baterije i opskrbu trošila. Regulator ima isti algoritam rada kako je prikazano na slici 7.6 te se neće ovdje ponavljati. Na slici je prikazan blokovska shema regulatora s PWM regulacijom napona. Važno je primijetiti da je ovaj tip regulatora također dvostupanjski ali znatno poboljššan u odnosu na paralelni regulator.



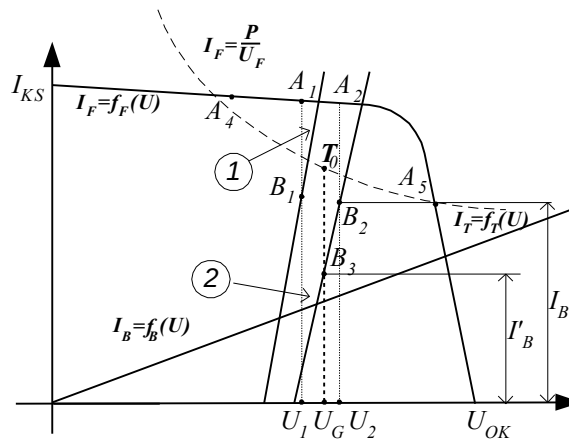
Slika 7.7 Blokovska shema serijskog regulatora s PWM regulacijom konstantnog napona.

U ovom tipu regulatora PWM regulacija je tzv "back converter". To znači da se ulazni napon spušta na razinu određenu prijenosnim faktorom. Pri tom vrijedi:

$$U_T = U_{FNA} D, \quad I_T = I_{FNA} \frac{1}{D} \eta_{PWM}, \quad (7.13)$$

pri čemu je η_{PWM} djelotvornost regulatora (0,9 do 0,95%). Radi jednostavnosti u slijedećim izrazima računat će se kao da je $\eta_{PWM} = 1$. Bez dubljeg ulaženja u analizu rada PWM regulatora napona kada je ulazni napon ovisan o opterećenju, prijenosni omjer D se može naći, uvažavajući činjenicu da fotonaponski modul proizvodi točno toliko energije koliko je potrebno za punjenje baterije i trošilo.

Na slici 7.8 prikazan je princip rada regulatora. Pri nekom ozračenju, vrijednosti trošila i određenom stanju napunjenosti akumulatorske baterije, radna točka sustava određena je naponom U_1 . Struja modula određena je točkom A_1 a baterije točkom B_1 . Punjenjem strujno-naponska karakteristika baterije se mijenja i pomiče udesno, s pozicije 1 na poziciju 2. Kada ne bi bilo regulatora napona, struja baterije bila bi određena točkom B_2 a modula sa A_2 . Ako je regulirana vrijednost napona jednaka U_G struja baterije jednaka je I'_B . Uzimajući u obzir struju trošila pri reguliranoj vrijednosti napona, snaga fotonaponskog modula određena je točkom T_0 . Napomena: $U_G = VR$.



Slika 7.8 Princip rada PWM regulatora u FNS sustavu.

Snagu određenu točkom T_0 na slici modul daje u točkama A_4 i A_5 . PWM regulator o kojemu je ovdje riječ, spušta izlazni napon u odnosu na ulazni, tj. da je $D < 1$, struja modula određena je točkom A_5 .

Radnu točku fotonaponskog modula (ćelije) može se odrediti iz slijedeće relacije.

$$\eta I_F U_F = U_G [f_B(U_G) + f_T(U_T)]. \quad (7.14)$$

Konačno se dobiva transcendentna jednadžba:

$$U_F = \frac{U_G [f_B(U_G) + f_T(U_T)]}{\eta f_F(U_F)}. \quad (7.15)$$

Jednadžba (7.15) ima dva realna rješenja. Rješenje pri kojemu je $U_G < U_F < U_{OK}$ je rješenje problema.

Model trostupanjskog serijskog regulatora s PWM regulacijom: Za potpuno punjenje akumulatorske baterije potrebno je provesti sva tri stupnja punjenja kako je to objašnjeno na početku ovog poglavlja. Ovaj regulator upravo osigurava takvo punjenje. Neki regulatori imaju mogućnost i četvrtog stupnja punjenja. To je tzv. izjednačavajuće punjenje koje bi se u pravilu trebalo provoditi jedanput mjesečno. Blokowska shema regulatora prikazana je na slici 7.9.

Sukladnu uvedenom principu opisivanja rada regulatora korištenjem pojma tip algoritma kojim je cjelokupni algoritam rada podijeljen na cjeline i ovaj regulator će biti predstavljen na taj način. Prije nego što se počne s opisivanjem principa rada regulator treba se podsjetiti na faze punjenja.

- **Prva faza:** struja punjenja je najveća moguća, a napon punjenja raste.

- **Druga faza:** napon punjenja je konstantan, struja lagano opada
- **Treća faza:** napon se snižava na nižu vrijednost i trajno drži na toj vrijednosti dok je to moguće

Opis: dok je prilikom punjenja napon veći od LVR i manji od regulacijske vrijednosti napona U_G , regulator prati prema *tipu 2*. Isto tako, vrijedi ako je prilikom pražnjenja napon manji od napona U_F .

Ako zbog punjenja napon poraste na vrijednost U_G , regulator uključuje PWM regulaciju tako da je napon punjenja konstantan. Ovaj tip algoritma sličan je *tipu 4* ali se zbog specifičnosti stanja modula opisuje novim **tipom algoritma 5**. Napon i struja fotonaponskog modula mogu se odrediti prema opisanoj proceduri u (7.14) i (7.15).

Ako punjenjem konstantnim naponom struja padajući dostigne određenu vrijednost I_{BF}^9 , PWM regulator spušta vrijednost napona punjenja na nižu vrijednost U_{eq} (prelaz u treću fazu). Na toj vrijednosti napon može ostati trajno ili dok je redefinirani parametar I_{SH} veći od nule: $I_{SH1} = I_{FN}(U_{eq}) + I_B(U_{eq}) - I_T(U_{eq})$. Neki regulatori imaju vremensko zadržavanje faze 2. Lako se može pokazati da punjenje akumulatorske baterije iz fotonaponskog modula konstantnim naponom *ne ovisi* o ozračenju nego samo o svojstvima baterije. U ovom stanju baterija može ostati trajno bez straha o uništenju baterije. Stoga je i napon U_{eq} oko 13 V odnosno 2,166 V po ćeliji. Ovo je **tip algoritma 6**. Važno je primjetiti da kod ove regulacije nema klasične histereze VR-HVR [lit. 37]. Isto to vrijedi i za paralelne regulatore s konstantnim naponom

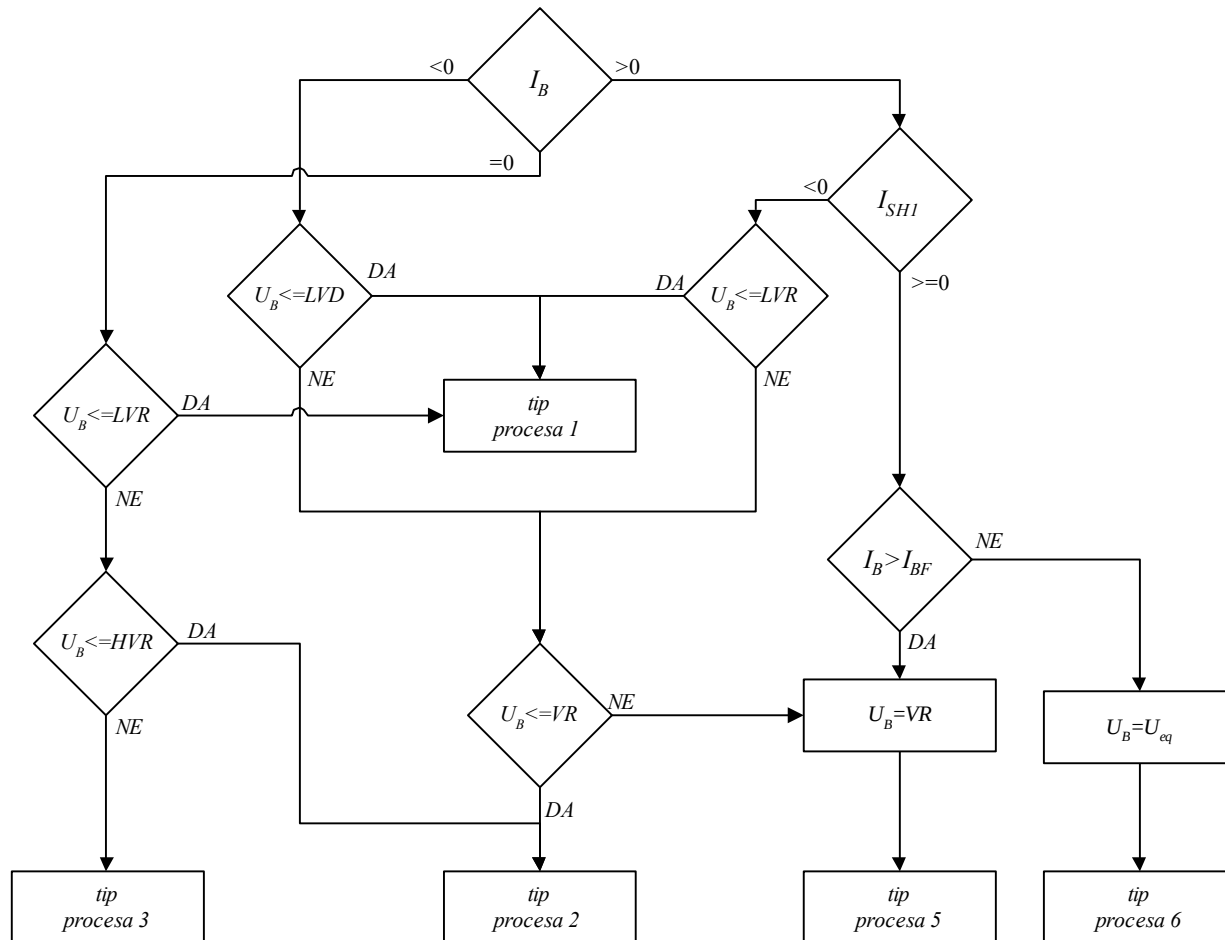
Dijagram toka cjelokupnog algoritma rada regulatora opisan je na slici 7.9. Postavke napona su temperaturno prilagodljive. Prilagodbu bi trebalo izvesti i prema struji jer različite struje punjenja različito stvaraju pad napona kroz bateriju. Ovo svojstvo ima samo naponska postavka LVD pri kojoj se isklapa trošilo. Ovaj tip regulatora ima još niz svojstava koja doprinose sigurnom radu akumulatorskih baterija.

Model trostupanjskog serijskog regulatora s PWM regulacijom i MPPT funkcijom:

MPPT funkcija je svojstvo regulatora da "vodi" radnu točku fotonaponskog modula po liniji maksimalne snage. Regulatori punjenja s ovim svojstvom samo su neka od regulacijske opreme u fotonaponskim sustavima koji imaju ova svojstva. Inače se smatra da su ovi regulatori najsofisticiranije rješenje za sučelje fotonaponskog modula baterije i trošila. O samoj MPPT funkciji biti će više govora u slijedećoj točki. Ova funkcija dolazi do izražaja samo u prvoj fazi punjenja baterije, dok se u drugoj i trećoj fazi primjenjuje isti algoritam kao u prethodnom slučaju. Primjena ovih regulatora povećava iskorištenje sunčeve energije

Vrlo često, kao i kod klasičnih PWM regulatora, MPPT regulator ima pretvorbu napona prema dolje s tom razlikom da je PWM aktivan cijelo vrijeme rada. To je zbog toga što je optimalni napon modula u većini izvedbi veći od regulacijskih napona punjenja baterije.

⁹ I_{BF} je određen postotak maksimalne struje pri $U=U_{eq}$



Slika 7.9 Dijagram toka algoritma rada trostupanjskog regulatora

7.4.3 Pratilac maksimalne snage MPPT

Kao što je već spomenuto u prethodnoj točki, MPPT je uređaj koji osigurava rad fotonaponskog modula u optimalnoj radnoj točki. Ovisnost radnog napona o trošilu svojstvo je svih električnih generatora u malim, izoliranim energetske sustvima. Promjenom ozračenja i temperature mijenja se strujno naponska karakteristika, a time se mijenja i položaj optimalne točke. Upravo ova promijenljivost uzrokom su neprilagođenosti trošila svim prilikama. Naime, pod nazivnim radnim uvjetima modul će dati maksimalnu snagu samo pri nazivnom opterećenju. Promijeni li se opterećenje, radna točka i snaga se mijenjaju. Kada se govori o efikasnosti modula onda se uvijek misli na optimalnu radnu točku, točku maksimalne snage. U stvarnosti modul rijetko radi u toj točki u izravnom priključku na trošilo. To je razlog zašto modul normiran npr. na 75 W pri nazivnom ozračenju ustvari daje cca. 50 W.

Optimalna radna točka u širem smislu nije uvijek točka maksimalne snage nego ona radna točka koju najbolje iskorištava trošilo. Npr. pri pokretanju elektromotornih pumpi koje crpe vodu na određenu visinu, potrebno je čim veća struja pokretanja.

Dakle, pratilac snage osigurava optimalno sučelje modula i trošila. S obzirom na tipične primjene postoji nekoliko vrsta pratilac optimalne snage. Neki od njih su (skraćenice se odnose na engleske izraze).

- Regulator punjenja s funkcijom praćenja optimalne snage (MPPT CC)¹⁰,
- Regulator struje motora s funkcijom praćenja optimalne snage (LCB)¹¹,
- Regulator katodne zaštite (CPC)¹²,
- Regulator konstantnog napona.

MPPT regulator se sastoji od dva funkcionalno povezana dijela:

- Izvršni uređaj kontrole,
- Regulator u užem smislu: algoritam praćenja optimalne točke.

Izvršni uređaj je aktuator regulatora koj neposredno prilagođava izlaz iz modula na ulaz u trošilo prema algoritmu regulacije. U klasičnom smislu to je DC/DC pretvarač. Prvi pretvarači ovog tipa bili su kombinacija DC/AC pretvarača, transformatora, te AC/DC pretvarača. Ovakvi pretvarači imaju djelotvornost obično ispod 0.9. Suvremenije pretvarači rad baziraju na PWM regulaciji. Obično su to *step down* pretvarači

Algoritam regulatora je "mozak" sustava koji određuje načina kako će raditi PWM regulator. Postoje tri osnovna algoritma. Ovi algoritmi ovdje se samo spominju radi kompletnosti uvida u rad sustava.

Algoritmi MPPT-a:

1. Regulator daje nalog za promjenu napona modula za iznos dU. Promjena napona se izvršava mijenjajući prijenosni omjer PWM-a. Senzori regulatora očitavaju promjenu struje modula, odnosno snage. Ako je gradijent promijene snage s naponom pozitivan u sljedećem koraku, nastavlja se ista procedura. Ako je gradijent manji od nule, promijena napona u sljedećem koraku je negativna. Ako je pak, gradijent snage približno jednak nuli, to znači da je ta radna točka upravo optimalna radna točka odnosno točka maksimalne snage [lit 40].
2. Drugi tip algoritma rada MPPT-a je višestruka pretvorba. Napon modula se prvo pretvara u izmjenični uz pomoć DC/AC pretvarača. Zatim se u transformatoru promijenljivog prijenosnog omjera napon mijenja na željenu razinu. Nakon toga se izmjenični napon ponovo ispravlja AC/DC pretvarač. Ovakvi MPPT regulatori su jeftiniji od prethodnih ali imaju manju djelotvornost.
3. Jednostavniji algoritam temelji se na približnom omjeru napona u optimalnoj radnoj točki i napona otvorenog kruga. Prema [lit. 39] optimalni napon je približno 76% napona otvorenog kruga. Regulator mjeri napon otvorenog kruga kroz kratko vrijeme (0,1 s). Na temelju dobivene vrijednosti preračunava se regulirana vrijednost napona modula. Tako dobiven regulacijski napon je referentna vrijednost u regulacijskom krugu koji ima ulogu da "dovede" modul u željenu radnu točku.

¹⁰ MPPT CC: Maximum power point tracker charge controller

¹¹ Linear current booster

¹² Cathodic protection controller

Primjene MPPT-a :

Regulatori punjenja s funkcijom MPPT-a. Kako je rečeno u prethodnom poglavlju, korist upotrebe ovog regulatora osjeti se tijekom prve faze punjenje. To je ujedno i faza koja je najvećim dijelom vremena prisutna. Regulator vodi modul u optimalnu radnu točku (P_{max}), pri tom se ista tolika snaga predaje akumulatorskoj bateriji. To znači da struja baterije iznosi I'_1 za razliku od iznosa I_1 koja bi bila kada nebi bilo funkcije MPPT. Analize su pokazale da se struja punjenja u ovoj fazi povećava i do 40 %. To praktički znači da se baterija može napuniti i modulom manje snage u odnosu na standardne regulatore. Ovdje će biti razmatran samo MPPT na bazi PWM modulacije i to sa stalnim praćenjem. Algoritam rada punjača na bazi MPPT-a ima izmjenu u prvom stupnju punjenja, što je na slici 7.9 opisano *tipom algoritma 1 i 2*.

Dijagram toka ovog regulatora jednak je prethodnom s tim da umjesto izravnog sučelja fotonaponskog generatora i baterije u *tipu regulacije 1* koristi se **tip regulacije 7**. Struju i napon akumulatorske baterije i trošila traži se algebarski iz uvijeta:

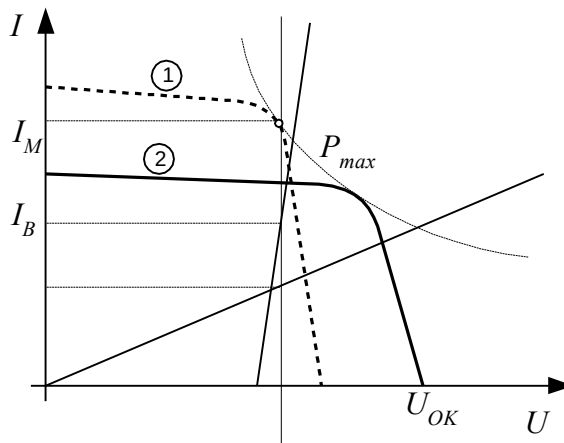
$$f_B(U) = \frac{\eta_{MPPT} P_{max}}{U}, \quad (7.16)$$

pri čemu su $f_B(U)$ i $f_T(U)$ funkcijske ovisnosti struja baterije i struje trošila. Napon U se nalazi iteracijski. Djelotvornost η_{MPPT} se odnosi na gubitak u uređaju i za MPPT na bazi PWM iznosi u prosijeku oko 0,95 dok u slučaju višestruke transformacije djelotvornost iznosi do 0,85.

Isto tako, umjesto izravnog sučelja baterije, trošila i fotonaponskog generatora u *tipu regulacije 2* koristi se **tip regulacije 8**. Radni napon sustava nalazi se iz uvijeta:

$$f_B(U) + f_T(U) = \frac{\eta_{MPPT} P_{max}}{U}. \quad (7.17)$$

Struja i napon fotonaponskog modula određeni su optimalnom točkom za definirane uvjete atmosfere (ozračenje i temperatura).



Slika 7.10 Strujno naponske prilike u sustavu s MPPT.

Na slici 7.10 prikazane su strujno naponske prilike u sustavu s MPPT uređajem. Pri određenom stanju atmosfere IU karakteristika modula je dana krivuljom 2. Krivulja 1 je strujano-naponska karakteristika modula koju **vidi (virtualno osijeća)** strana baterije i trošila. Krivulja maksimalne snage označena je sa " P_{max} ".

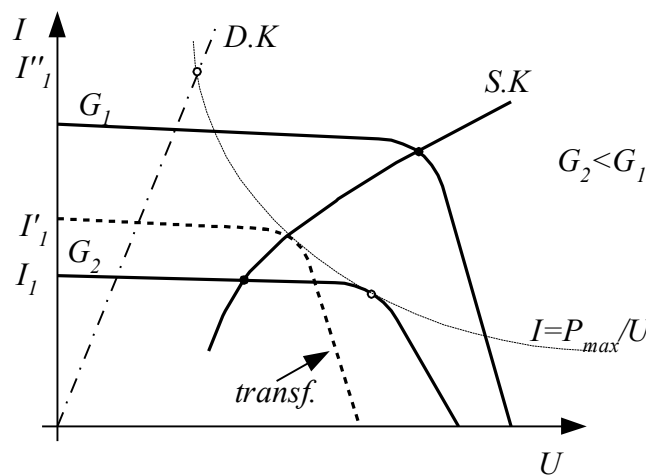
Regulator struje motora (LCB):

Kada je riječ o fotonapnskim sustavima s električnim motorima uglavnom se govori o istosmjernom motoru. Najčešće su to istosmjerni neovisno uzbuđeni motori. Primjena motora u fotonapnskim sustavima uglavnom se odnosi na pumpe (vidi točku 7.2.2). Slično regulatoru punjenja s funkcijom praćenja optimalne snage modula, regulator s istim svojstvom konstantno prilagođuje strujno-naponske karakteristike motora fotonapnskom modulu. Algoritam rada pratioca optimalne snage je isti kao i kod regulatora punjenja. Struja i napon modula određeni su optimalnom radnom točkom dok se struja i napon motora određuju iz karakteristike opterećenja.

Strujno naponska karakteristika motora općenito se prikazuje preko parametra brzine vrtnje. U konkretnom slučaju kada je poznato opterećenje, tog parametra nema i obično strujno naponska karakteristika motora nije više slična općoj karakteristici motora. Ako je takva karakteristika dana izrazom $I_{mot}=f(U_{mot})$, tada se struja i napon motora mogu izračunati preko slijedeće jednadžbe:

$$\eta_{MPPT} P_{max} = U_{mot} f(U_{mot}). \quad (7.18)$$

Na slici 7.11 prikazan je doprinos MPPT-a u slučaju pumpe za vodu kao trošila i fotonaponskog modula kao izvora. Na slici je prikazana tipična strujno naponska karakteristika motora pumpnog postrojenja u stacionarnom stanju (S.K) kao i u dinamičkom pri pokretanju (D.K., brzina vrtnje jednaka 0). Karakteristike G_1 i G_2 predstavljaju strujno naponske karakteristike fotonaponskog modula pri različitim ozračenjima.



Slika 7.11 Primjer rada pumpe i FN modula.

Ako sustav radi pri karakteristici modula G_1 modul predaje motoru maksimalno moguću snagu. Ako pak ozračenje padne, struja motora pada na iznosi I_1 . Primjenom LCB-a (u prijevodu: podizač struje), napon modula se prilagođava tako da modul luči maksimalnu snagu. Pri tom struja motora raste. Na slici je to prikazano karakteristikom označenom s *transf*. Direktna posljedica primjene LCB-a je smanjenje snage odnosno mogu se koristiti moduli manje snage. Jednostavno rečeno za plaćenih 75 W dobija se upravo 75 W. Osobito se ova korist osjeća pri malim ozračenjima kao i pri pokretanju. Naime, neka pumpna postrojenja trebaju izvjesnu vrijednost poteznog momenta da bi se motor uopće pokrenuo. Utjecaj LCB na poteznu struju motora (struja pri zakočenom motoru u trenutku priključenja na fotonaponski modul) prikazan je na slici 7.11 karakteristikom D.K. Stuja I''_1 je puno veća od struje I'_1 pri pokretanju motora.

Na kraju treba reći da kod velikih pumpnih postrojenja, regulatori pri pokretanju vođeni prema potrebnoj struji pokretanja a ne maksimalnom snagom modula. U protivnom kod velikih ozračenja, potezna struja bi bila prevelika. S druge strane takvi regulatori su opremljeni zaštitom od prevelikog napona na sličan način kao kod punjenja akumulatorske baterije.

Regulator katodne zaštite

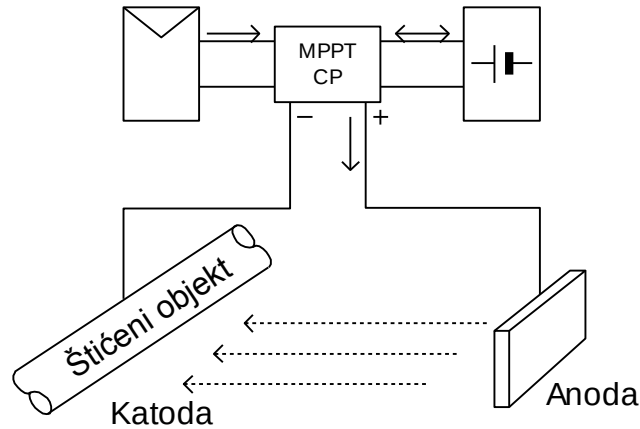
Katodna zaštita je mjera zaštite metalnih konstrukcija od korozije. Korozija je proces destrukcije metalne strukture uslijed elektrokemijskih reakcija metala u otopini. Naime, atomsko željezo ima viši elektrodni potencijal od neutralne okoline. Kad se pak čelična konstrukcija (spremnik, cjevovod) nađe u agresivnom tlu (elektrolit) doći će do reakcije oksidacije na čeliku uslijed čega atomsko željezo reagira s OH grupom tvoreći kemijski spoj *hrđu*. Proces elektronacije željeza može se zaustaviti ako se čelična konstrukcija dovede na negativan potencijal u odnosu na okolno tlo. To se postiže na dva načina: utisnutom strujom ili galvanski spojenom anodom. Ova prva metoda je efikasnija i o njoj će biti ovdje riječi.

Katodna zaštita se provodi na način da se štice konstrukcija tretira kao katoda a odgovarajuća legura bakra ili cinka kao anoda u elektrokemijskom reaktoru. Pomoćna anoda se zakopa u blizinu štice objekta. Tlo ili mediji u kojemu se nalaze zakopane elektrode se mogu smatrati elektrolitom. Utisnuta struja predaje elektrone katodi iz izvora te pri tom nadomješta elektrone koji se gube uslijed procesa korozije. Točnije, vanjskom strujom kompenzira se struja korozije. Prema [lit. 42] struja koju treba utisnuti prema pomoćnoj anodi iznosi oko 100 mA/cm². Stvarna fizikalna pozadina procesa katodne zaštite i procesa korozije izlazi iz okvira ovog rada te se ovdje neće dalje tumačiti.

Značajni faktor u odabiru napona katodne zaštite je otpornost tla i vrsta anode. Ovisno o koncentraciji vlage u tlu, specifična otpornost se mijenja. Sukladno tome mijenja se i napon katodne zaštite s ciljem dobivanja konstantne struje. Prije odabira i parametrizacije regulatora struje katodne zaštite, korisnik mora dobro poznavati granice promijena otpornosti, vrijednost utisnute struje. Jednom postavljene parametre, regulator održava.

Regulator katodne zaštite je zapravo regulator konstantne struje. Sofisticiraniji regulatori imaju mogućnost promjene regulirane vrijednosti. Naime, ako uslijed porasta otpornosti, zbog održavanja konstantne struje, napon poraste do granične vrijednosti, regulator preuzima daljni rad vodeći struju katodne zaštite tako da je napon konstantan. Dakle, parametri regulatora su: *konstantna struja i gornja granica napona*.

MPPT regulator katodne zaštite bazira se na sličnom principu kao i kod regulacije struje motora ili struje punjenja baterije s tom razlikom da je i izlaz prema trošilu reguliran. Blokova shema katodne zaštite s MPPT regulacijom dana je na slici 7.12.



Slika 7.12 Blokova shema sustava katodne zaštite.

Strujno naponske prilike u sustavu katodne zaštite dane s sljedećim izrazima (model). Struja i napon na izlazu iz regulatora prema anodi sustava su:

$$\begin{aligned} I_A &= I_{CP} \\ U_A &= I_{CP} R_{TLO}(t) \end{aligned} \quad (7.19)$$

pri čemu je

I_{CP} vrijednost utisnute struje za katodnu zaštitu,
 $R_{TLO}(t)$ je vremenska funkcija cijelokupne otpornosti između štice-
 objekta i tla.

Napon i struja fotonaponskog modula određeni su maksimalnom radnom točkom; (I_M , U_M), dok su napon i struja baterije određeni na sljedeći način:

$$\begin{aligned} P_{BAT} &= \eta_{BAT} \left(P_M - \frac{I_A U_A}{\eta_{CP}} \right) \\ U f_B(U) - P_{BAT} &= 0 \Rightarrow U_{BAT} = U, I_{BAT} = P_{BAT} / U \end{aligned} \quad (7.20)$$

Dakle, električna snaga koja se predaje bateriji jednaka je razlici maksimalne snage modula i snage katodne zaštite. Radna točka baterije nalazi se kao presjek strujno naponske karakteristike baterije $I_{BAT}=f_B(U_{BAT})$ i jednadžbe konstantne snage $I_{BAT}=P_{BAT}/U_{BAT}$.

Ovi izrazi vrijede dok je napon punjenja baterije manji od regulacijskog napona U_R i dok je napon katodne zaštite manji od granične vrijednosti U_{GR} . U tom slučaju regulator zadržava vrijednost napona prema opisanom algoritmu. Radna točka fotonaponskog modula u tom

slučaju nije više u točki maksimalne snage nego je određena snagom potrošnje odnosno snagom koju treba baterija i/ili katodna zaštita.

Na kraju ovog izlaganja važno je napomenuti da korisnik mora definirati vrijednost utisnute struje i otpornost tla kroz razmatrani peroid.

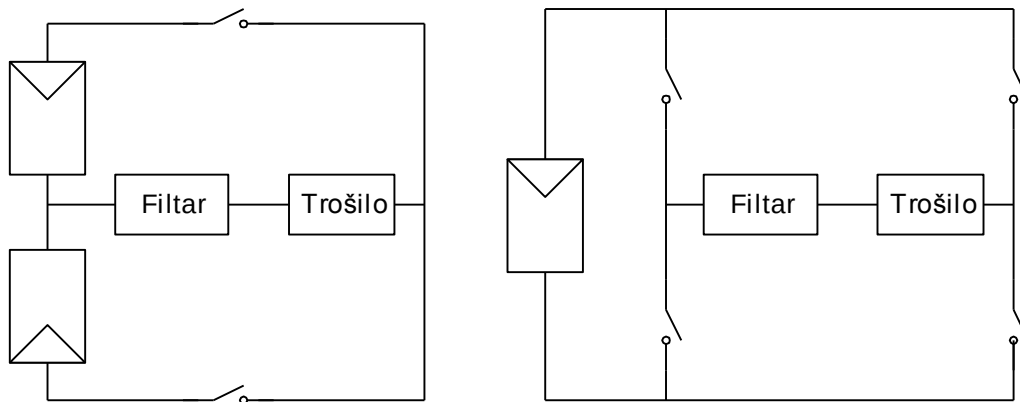
7.5 Izmjenjivači

Na kraju ovog poglavlja ujedno i na kraju ovog rada, u ovom potpoglavlju ukratko je opisan model izmjenjivača koji se koriste u fotonaponskim sustavima. Izmjenjivači su uređaji koji pretvaraju istosmjerni napon fotonaponskog izvora u izmjenični napon kakav je potreban izmjeničnim trošilima.

Implementacija izmjenjivača u fotonaponski sustav podrazumijeva postojanje trošila izmjenične struje. S tim u vezi razlikujemo sljedeće tipove:

- FNS s direktno priključenim izmjeničnim trošilom,
- FNS za izmjenična trošila i spremnikom energije,
- mješoviti AC/DC FN sustav,
- FNS za priključak na izmjeničnu mrežu.

Prva tri tipa izmjenjivača su namijenjeni za samostalni rad dok četvrti tip izmjenjivača radi sinkronizirano na mrežu. Osnovna topologija izmjenjivača u FNS sustavu dane su na slici:



Slika 7.13 Osnovne topologije izmjenjivača u FNS-u.

Sklopke na slici simbolički prikazuju preklopni sklop na bazi tiristora ili tranzistora. Redoslijed sklapanja i frekvencija sklapanja određuju pojedine vrste izmjenjivača.

7.5.1 Tipovi izmjenjivača

U fotonaponskim sustavima koristi se više različitih tipova izmjenjivača s obzirom na oblik izlaznog signala. Tako postoje inverteri s:

- kvadratnim valnim oblikom napona,
- modificiranim sinusnim valnim oblikom,
- PWM-om,
- čistim sinusnim oblikom.

Svaki inverter je parametriziran slijedećim parametrima:

- nazivna snaga,
- maksimalno udarno opterećenje,
- djelotvornost,
- harmonička distorzija.

Izmjenjivač s kvadratnim valnim oblikom napona je najjednostavniji izmjenjivač koji se koristi u fotonaponskim sustavima. Obično se koristi kada izmjenična trošila nisu prezahtjevna u pogledu čistoće ulaznog signala jer viši harmonici mogu izazvati probleme u motorima i fluorescentnim svjetilkama. Proizvode se do nazivne snage od čak 1 MW, sa izrazito velikim kapacitetom udarnog opterećenja (do 20 puta). Ovi izmjenjivači su prilično efikasni u energetske smislu 70-98%. Glavna slabost izmjenjivača s kvadratnim valnim oblikom napona je velika distorzija napona koja iznosi i do 40%.

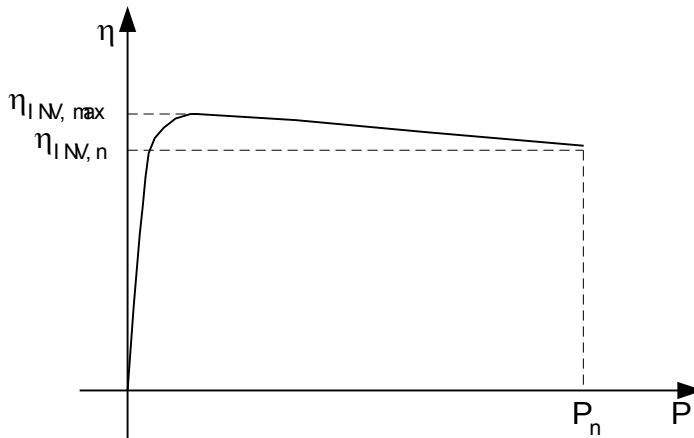
Izmjenjivač s modificiranim valnim oblikom napona ima također pravokutni valni oblik ali modificiran tako da je više nalik na sinusni val. Ova modifikacija ima za posljedicu drastično smanjenje distorzije izlaznog napona na razinu od 5 %. Iako dosta manje od prethodnog tipa, ovaj tipa izmjenjivača ima udarni kapacitet razmjerno velik, do 4 puta nazivne snage. Djelotvornost se kreće u granicama od 70 do 85 %. Slaba strana ovih izmjenjivača su male nazivne snage; od 300 do 2500 W.

Pulsno širinski izmjenjivači. PWM je kao takav već spomenut u radu. Ovaj tip izmjenjivača ima dobre sposobnosti u pogledu nazivnih snaga koje idu i do 20 kW po jedinici. Mali udarni kapacitet od 2.5 puta nazivne snage je slaba točka PWM izmjenjivača. Efikasnost se kreće uglavnom iznad 90%. Distorzija izlaznog izmjeničnog napona je manja od 5%. Izmjenjivač se dosta koristi u slučajevima gdje je potrebna dobra preciznost sinusnog vala. Pored toga najveći dio suvremenih izmjenjivača u FNS-u su ovog tipa.

Najkvalitetniji ali i najskuplji izmjenjivači su **izmjenjivači s čistim sinusnim valom**. Obično su to izmjenjivači koji se koriste za mrežne aplikacije fotonaponskih sustava i pripadaju u grupu tzv. *mrežom komutiranih izmjenjivača*. Čistoća sinusnog vala dobiva se korištenjem složenih filtera koji smanjuju djelotvornost uređaja na ispod 80 %. Nazivne snage se kreću uglavnom do 2 kW s udarnim kapacitetom od 4 puta nazivna snaga. Distorzija je manja od 1 %.

Djelotvornost izmjenjivača se definira kao omjer snage izmjeničnog trošila i izvora istosmjernje struje. Porastom snage trošila od 0-te vrijednosti, djelotvornost raste od 0 do neke maksimalne vrijednosti pri cca 10% nazivne snage. Daljnjim porastom snage trošila do

nazivne djelotvornost lagano pada. Na slici 7.14 je prikazan tipični dijagram ovisnosti djelotvornosti izmjenjivača o snazi trošila.



Slika 7.14 Djelotvornost izmjenjivača u funkciji snage

Model izmjenjivača u FNS-u

Izmjenjivač, ukoliko se zanemare gubici, sam po sebi nije trošilo snage nego pretvarač. S obzirom da je fotonaponski sustav po prirodi energetske sustav s istosmjernim naponom, to će se izmjenična strana transformirati na istosmjernu tako da se izmjenična trošila nadomjeste odgovarajućim istosmjernim trošilima. Ova pretvorba je potrebna da se odredi vrijednost istosmjerne struje koju predaje baterija FNS-a. Sa stajališta izmjeničnog trošila, potpuno je svejedno kako tretiramo trošilo jer je za njega najvažnija snaga i napon.

Ovisno o valnom obliku izlaznog napona tj o frekvenciji i načinu sklapanja sklopki u izmjenjivaču, može se odrediti zavisnost efektivnog napona na izlazu i napona na ulazu u izmjenjivač. Ako se još uzme u obzir da izmjenjivači imaju u sebi **ugrađen transformator**, za svaki izmjenjivač može se odrediti prijenosni omjer:

$$\delta = \frac{U_{ef}}{U_E} \quad (7.21)$$

Ako uzmemo obzir djelotvornost izmjenjivača istosmjerna struja na ulazu u izmjenjivač ovisi o struji trošila na slijedeći način:

$$I_E = \frac{\delta}{\eta_{INV}(P)} \cos(\varphi) I_{ef}, \quad (7.22)$$

gdje je :

$\eta(P)$	djelotvornost izmjenjivača u ovisnosti o snazi
$\cos(\varphi)$	faktor snage trošila.

Matematička funkcija koja modelira djelotvornost izmjenjivača može se prikazati sljedećim izrazom:

$$\eta_{inv}(P) = \left[1 - b \left(1 - \frac{P}{P_n} \right) \right] \frac{1 - \exp \left(-k_{INV} \frac{P}{P_n} \right)}{1 - \exp(-k_{INV})} \eta_{INV,n}, \quad (7.23)$$

pri čemu se koeficijeti k_{INV} i b_{INV} mogu odrediti nelinearnom regresijom.

Ako je strujno naponska karakteristika trošila dana funkcijom $I_{ef} = f_T(U_{ef})$, onda je strujno naponska karakteristika trošila na strani istomjernog napona dana sljedećim izrazom:

$$I_E = \frac{\delta}{\eta_{INV}(P)} \cos(\varphi) f_T(\delta U_E) \quad (7.24)$$

8. OPIS SIMULACIJSKOG PROGRAMA

Računalni program prikazan u ovom radu je idejna verzija računalnog programa za simuliranje samostojećih fotonaponskih sustava. Program je napravljen korištenjem Matlab 5.3 softvera. Osnovna namjena je analiza strujno naponskih prilika pojedinih komponenti samostojećeg fotonaponskog sustava tijekom jedne godine. Program omogućava sljedeće:

1. unos u bazu podataka¹³ kojim se definiraju pojedine komponente sustava, tj. proširenje baze podataka,
2. definiranje komponenti sustava izborom iz baze podataka,
3. proračun vrijednosti struje i napona pojedinih komponenti sustava,
4. pregled dijagrama toka snage u sustavu.

U sljedećim poglavljima objašnjena je struktura programa, koju zapravo čine modeli pojedinih komponenti sustava: **fotonaponski moduli, baterije, trošila, regulatori i izmjenjivači**. Na slikama 10.30 - 10.38 prikazan je dijagram toka programa.

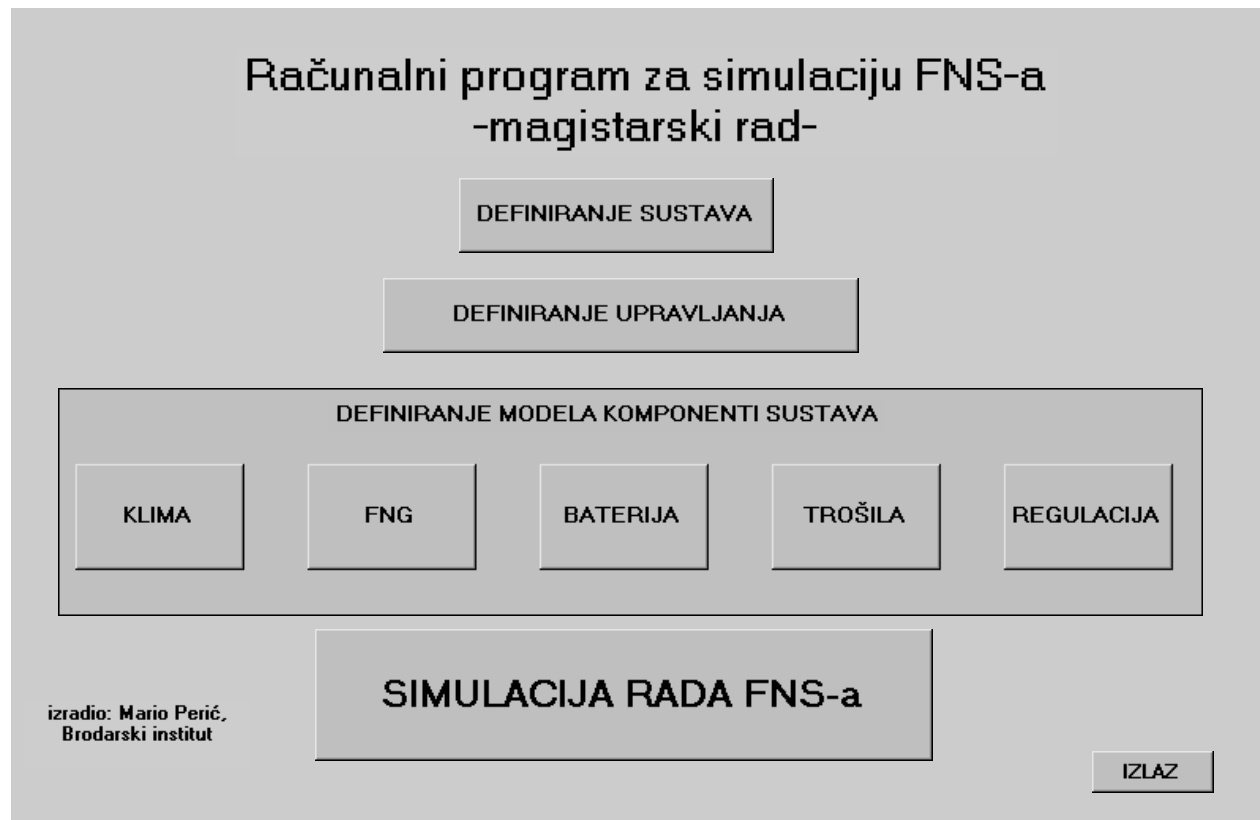
8.1 Struktura simulacijskog programa

Strukturu programa u širem smislu čine: korisnička sučelja, datoteke i programski kodovi. U užem smislu, za korisnika prepoznatljiva, program čine sljedeća korisnička sučelja kojima se operira sustavom.

8.1.1 Glavni izbornik.

Glavni izbornik je osnovno korisničko sučelje kojim se pristupa ostalim sučeljima. Na slici 8.1 prikazano je glavno sučelje.

¹³ Ovdje je riječ o bazi podataka napravljenom u istom programskom jeziku kao i cijeli program. Struktura o kojoj je riječ ima osnovna obilježja baze podataka: upis novih podataka, pregledavanje sadržaja i izbor određene grupe podataka



Slika 8.1 Glavno sučelje programa

8.1.2 Izbornik: "Definiranje sustava"

Ovo korisničko sučelje koristi se za definiranje:

1. **Lokacija** se odabire iz izbora ponuđenih lokacija za koje su definirani modeli klime. Ako korisnik želi dodati novu lokaciju to može učiniti preko sučelja " KLIMA" kojim se definira model klime i koji omogućava unos novih lokacija. Nakon unošenja novih podataka, tipka "REFRESH" omogućava obnovu popisa lokacija.
2. **Period simulacije** se unosi ručno i odnosi se na početak i kraj simulacije i definirani su mjesecom, danom, satom i minutom.
3. **Konfiguracija fotonaponskog sustava** definira se klikom miša na objekte s oznakama:

"FNG"	Fotonaponski generator
"CCR"	Regulator punjenja i opća regulacija
"DC LOAD"	Istosmjerna trošila
"INV"	Izmjenjivač
"AC LOAD"	Izmjenična trošila
"BAT"	Baterija

Na slici 8.2 prikazano je sučelje za definiranje sustava.

DEFINIRANJE SUSTAVA

IZBOR LOKACIJE: Lastovo

PERIOD SIMULACIJE

OD		DO	
dan	mjesec	dan	mjesec
28	9	29	9
sat	minuta	sat	minuta
9	10	16	10

FNG ☒ CC/R ☒
 DC LOAD ☐ INV ☐
 AC LOAD ☐ BAT ☒

Schematic Diagram:

```

    graph LR
      FNG[FNG] --- CC/R[CC/R]
      CC/R --- DC_LOAD[DC LOAD]
      CC/R --- INV[INV]
      CC/R --- BAT[BAT]
      INV --- AC_LOAD[AC LOAD]
  
```

Slika 8.2 Sučelje za definiranje sustava

8.1.3 Izbornik: "Definiranje upravljanja "

Upravljanje plohom fotonaponskih modula odnosno generatora definira se ovim korisničkim sučeljem. Na izboru su sljedeći načini upravljanja:

1. Bez upravljanja odnosno praćenja Sunčevog gibanja. Ovdje se razlikuju
 - a) Cjelogodišnji nagib plohe modula (optimalni ili zadani kut),
 - b) Dvosezonski nagib modula (optimalni ili zadani kutovi),
 - c) Mjesečno podešavanje nagiba modula (optimalni ili zadani kutovi).
2. Praćenje Sunčevog gibanja, gdje razlikujemo nekoliko načina:
 - a) Dvoosno, odnosno potpuno praćenja sunčevog gibanja
 - b) Jednoosno gibanje koje opet može biti:
 - a. Oko horizontalne osi sjever-jug,
 - b. Oko horizontalne osi istok-zapad,
 - c. Oko vertikalne osi,
 - d. Oko proizvoljno ili optimalno nagnute osi.

Načini upravljanja plohom modula i njihov utjecaj na količinu dozračene energije objašnjen je detaljno u dodatku. Na slici 8.3 prikazano je sučelje za definiranje načina upravljanja.

IZBOR NAČINA UPRAVLJANJE PLOHOM FNG-a

BEZ PRAĆENJA SUNCA

cjelogodišnji
 dvosezonski
mjesečni

PRAĆNJE SUNCA

dvoosno
jednoosno

nagib osi:
 azimut osi:

PRIHVATI

NATRAG

Zadani položaj

cjelogodišnji položaj

nagib:
 azimut:

dvosezonski položaj

PRVA SEZONA

prvi mj. sezone	zadnji mj. sezone
veljača	svibanj

nagib:
 azimut:

DRUGA SEZONA

prvi mj. sezone	zadnji mj. sezone
lipanj	sječanj

nagib:
 azimut:

mjesečni

	nagib:	azimut:		nagib:	azimut:
sječanj	58.8	0	srpanj	6.8	0
veljača	52.8	0	kolovoz	20.3	0
ožujak	41.3	0	rujan	36.7	0
travanj	24	0	listopad	49.5	0
svibanj	10.5	0	studenj	56.9	0
lipanj	2.4	0	prosinac	60.8	0

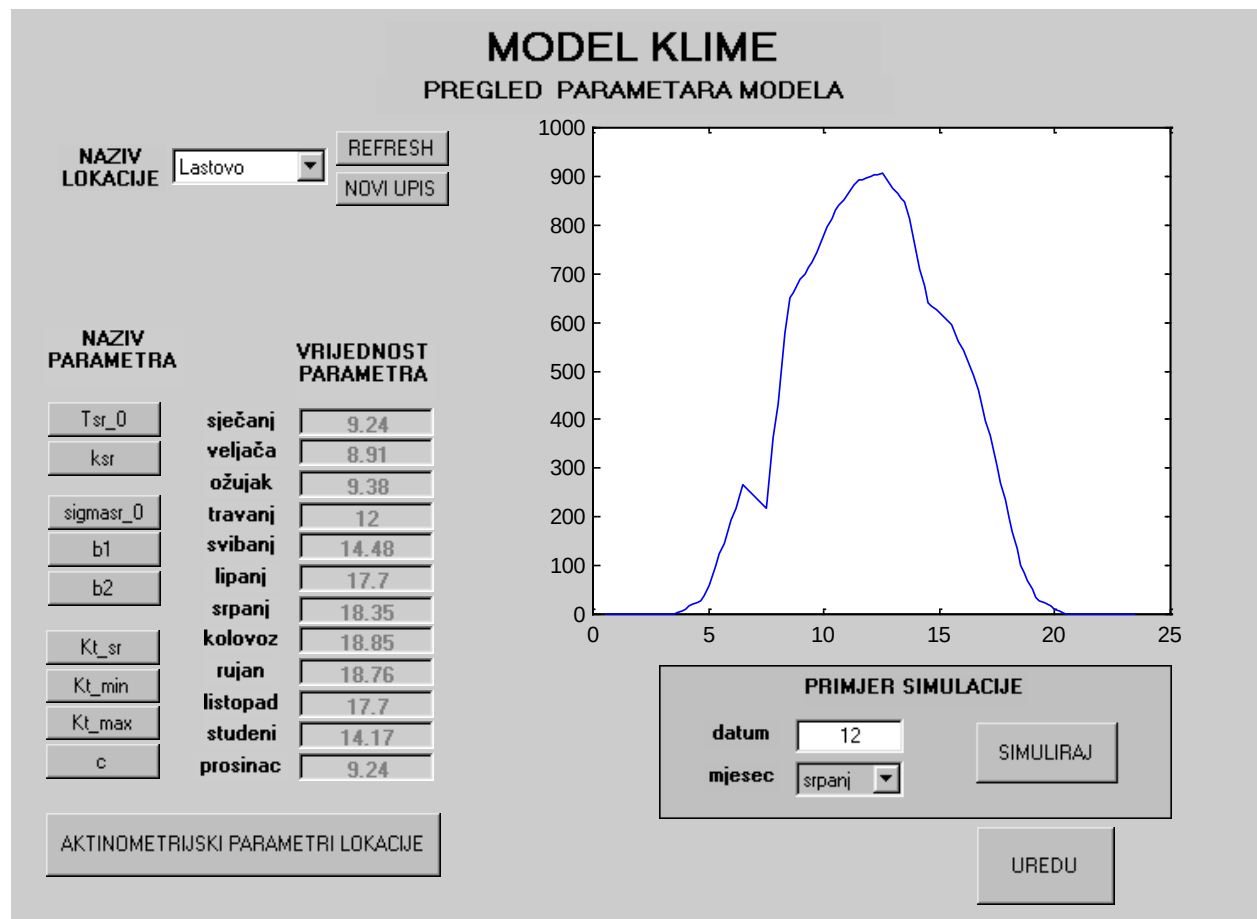
Slika 8.3 Sučelje za izbor načina upravljanja plohom FNG-a.

8.1.4 Izbornik: "Klima"

Ovaj izbornik odnosno sučelje je u uskoj vezi a sučeljem "Definiranje sustava" jer se u njemu omogućuje korisniku pregled baze podataka parametara klime i parametara modela klime, ali zbog važnosti istaknuto je posebno. Pored toga, omogućeno je korisniku da sam dopunjava bazu ili da korigira određene parametre. Pod parametrima klime podrazumijevaju se rezultati aktinometrijskih mjerenja za određenu lokaciju a tiču se srednje mjesečne ozračenosti plohe ukupnim, direktnim te difuznim ozračenjem. Isto tako, za svaku lokaciju baza sadrži podatke o optimalnim nagibima plohe prema horizontu¹⁴. S druge strane parametri modela klime se odnose na koeficijente stohastičkog modela klime koji je objašnjen u potpoglavlju 3.5.

Korisniku je omogućeno da preliminarno simulacija ozračenja na definiranu plohu modula, pri čemu se ne uzima u obzir utjecaj optičkih svojstava fotonaponskog modula (refleksija). Na slici 8.4 je prikazano sučelje za pregled i upis modela klime.

¹⁴ Ovi podaci su izračunati korištenjem programa SunPro1.0.



Slika 8.4 Sučelje za pregled i unos modela klime

Parametri modela klime su:

- T_{sr_0} interpolirana vrijednost srednje dnevne temperature pri $K_T=0$,
- ksr linearni koeficijent funkcije $T_{sr}(ksr)$ u izrazu (3.55),
- $sigmasr_0$ interpolirana vrijednost srednjeg kvadratnog odstupanja,
- $b1$ linearni koeficijent funkcije $\sigma(K_T)$ iz jednadžbe (3.55),
- $b2$ kvadratni koeficijent funkcije $\sigma(K_T)$ iz jednadžbe (3.55),
- Kt_sr srednja vrijednost indeksa prozračnosti,
- Kt_min minimalna vrijednost indeksa prozračnosti,
- Kt_max maksimalna vrijednost indeksa prozračnosti,
- c parametar za izračun modela ozračenja iz jednadžbe (3.50).

Aktinometrijska mjerenja koja definiraju klimu su:

- zemljopisna širina,
- zemljopisna duljina,
- nadmorska visina,
- cjelogodišnji optimalni kutovi nagiba i azimuta plohe,

- mjesečni optimalni kutovi nagiba i azimuta plohe,
- sezonski optimalni kutovi nagiba i azimuta plohe,
- mjesečna srednja dnevna ozračenost horizontalne plohe ukupnim ozračenjem,
- mjesečna srednja dnevna ozračenost horizontalne plohe direktnim ozračenjem,
- mjesečna srednje dnevna ozračenost horizontalne plohe difuznim ozračenjem.

8.1.5 Izbornik: "FNG"

FNG je skraćenica za fotonaponski generator i predstavlja matričnu strukturu jediničnih modula. Pojednostavljena struktura ima dva parametra:

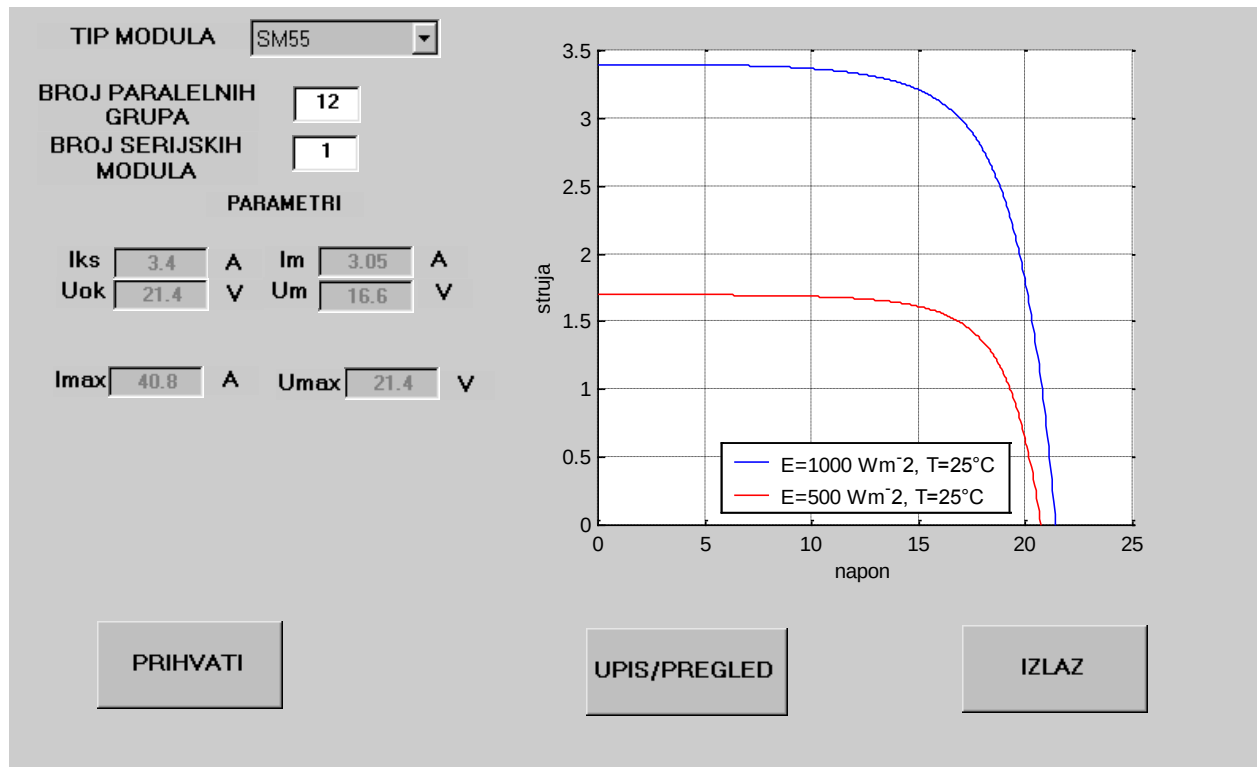
- *bsm* broj serijski spojenih modula (grupa modula),
- *bpm* broj paralelno spojenih grupa modula.

Sučelje omogućava korisniku izbor tipa modula iz baze modula, kao i definiranje parametara *bsm*, *bpm*, nakon čega se na grafu iscrtava strujno naponska karakteristika odabranog modula za ozračenje od 1000 W/m^2 i 500 W/m^2 . Odabrani fotonaponski generator se prihvća pritiskom na objekt "PRIHVATI". Upis novih modula u bazu, pregled postojećih ili korekcija unešenih parametara može se izvršiti pritiskom na objekt "UPIS/PREGLED".

Parametri kojima je definiran električni model fotonaponskog modula:

- I_{KS} struja kratkog spoja,
- U_{OK} napon otvorenog kruga,
- I_M struja u točki najveće snage,
- U_M napon u točki najveće snage,
- I_X struja pri naponu $U=U_{OK}/2$,
- I_{XX} struja pri naponu $U=(U_M+U_{OK})/2$,
- *sc* broj serijski spojenih ćelija u modulu,
- *pc* broj paralelno spojenih grupa ćelija,
- α_{KS} temperaturni koeficijent struje kratkog spoja,
- β_{OK} temperaturni koeficijent napona otvorenog kruga,
- α_M temperaturni koeficijent struje I_M ,
- β_M temperaturni koeficijent napona U_M ,
- *n* faktor idealnosti,
- C_0 empirijski koeficijent za I_M ,
- C_1 empirijski koeficijent za I_M ,
- C_2 empirijski koeficijent za U_M ,
- C_3 empirijski koeficijent za U_M ,
- C_4 empirijski koeficijent za I_X ,
- C_5 empirijski koeficijent za I_X ,
- C_6 empirijski koeficijent za I_{XX} ,
- C_7 empirijski koeficijent za I_{XX} ,
- *pov* površina ćelije.

Parametri kojima je definiran termički model fotonaponskog modula i(zraz 5.100) su a i b . Parametri kojima su definirani optički gubici u fotonaponskoj ćeliji su $A0, A1, A2, A3, A4, B0, B1, B2, B3, B4$ i $B5$. Na slici 8.5 prikazano je sučelje za izbor, pregled i unos parametara modela klime.



Slika 8.5 Sučelje za izbor, unos i pregled parametara fotonaponskog modula

8.1.6 Izbornik: "BATERIJA"

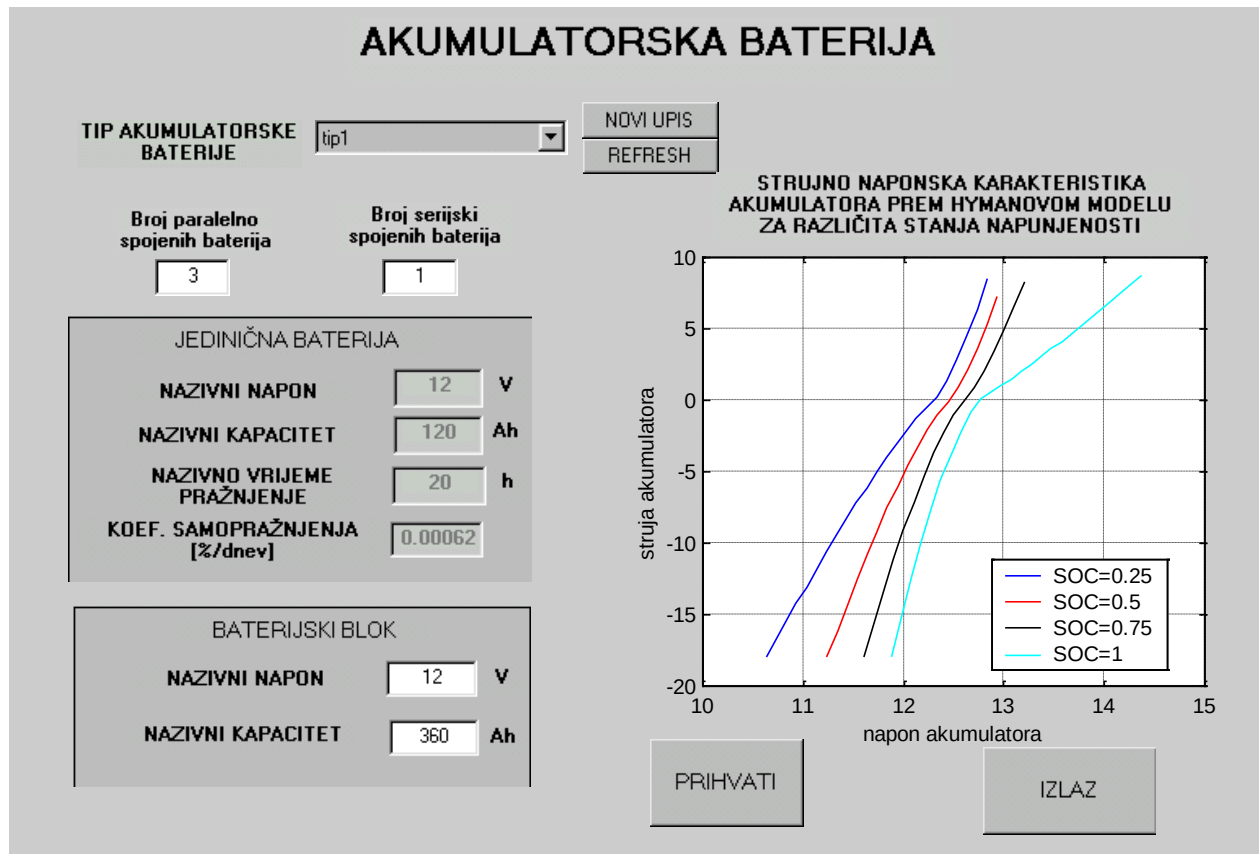
Ovo sučelje omogućava korisniku da izabere akumulatorsku bateriju odnosno baterijski blok koji čini više baterija spojenih serijski i paralelno. Broj paralelno i serijski spojenih baterija može se izravno zadavati od strane korisnika. Izborom određene baterije, na sučelju se iscrtava strujno naponska karakteristika akumulatorske baterije za različita stanja napunjenosti. Isto tako, na sučelju se ispisuju vrijednosti za neke od parametara kojima je definiran model akumulatorske baterije.

Parametri modela baterije su:

- Q_{bn} nazivni kapacitet baterije,
- U_{bn} nazivni napon baterije,
- t_{bn} nazivno vrijeme pražnjenja akumulatorske baterije,
- n Peukertov koeficijent kapaciteta,
- α_{Qb} temperaturni koeficijent promjene kapaciteta baterije,
- CT temperaturni koeficijent isplinjavanja,

- CV naponski koeficijent ispinjavanja,
- sp koeficijent samopražnjenja akumulatorske baterije.

Korisniku je omogućeno dopuna baze podataka baterija kao i izmjena postojeće.



Slika 8.6 Sučelje za izbor, unos i pregled parametara baterije.

8.1.7 Izbornik: "TROŠILA"

Trošila u fotonaponskom sustavima mogu se podijeliti s obzirom na vrstu radnog napona na:

- istosmjerna trošila (DC),
- izmjenična (AC),

kao i prema namjeni trošila na:

- trošila za rasvjetu,
- pumpe i motori,
- elektronička trošila,
- općenita trošila.

Birajući vrstu radnog napona i namjenu trošila, korisniku se otvara mogućnost izbora trošila iz ponuđenog popisa u padajućem izborniku. Izborom određenog trošila na sučelju se ispisuju osnovni podaci o nazivnom naponu i nazivnoj snazi. Prihvatom na listu trošila dopisuje se izabrano trošilo kao i ukupna snaga svih odabranih trošila. Za svako od odabranih trošila može se za svako od četiriju godišnjih doba (sezone) definirati dnevni raspored rada. Pritiskom na objekt označen brojem sata za kojeg korisnik definira da trošilo radi odnosno da ne radi. Pritiskom na tipku "UPIS/PREGLED" omogućuje se korisniku upis novih trošila u bazu kao i pregled postojećih. Matematički model pojedinih vrsta trošila objašnjeni su u potpoglavlju 7.2. Pored koeficijenata modela trošila, svako trošilo je određeno još i slijedećim parametrima:

- nazivni napon trošila,
- nazivna snaga trošila,
- frekvencija (samo za izmjenična trošila),
- faktor snage (samo za izmjenična trošila),
- minimalni radni napon,
- maksimalni radni napon.

DEFINIRANJE TROŠILA

☒ DC TROŠILA
☐ AC TROŠILA

☐ RASVJETA
☐ MOTORI I PUMPE
☐ ELEKTRONIČKA TROŠILA
☒ OSTALO

trošilo1

nazivni napon: nazivna snaga:

POPIS ODABRANIH TROŠILA

trošilo	naz. snaga
trošilo3	100
c trošilo 4	50
trošilo3	100
trošilo3	100

350 W

RASPORED RADNIH SATI

☒ PROLJEĆE
 ☒ LJETO
 ☐ JESEN
 ☐ ZIMA

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

☐ ISKLJUČENO/NE RADI
 ☒ UKLJUČENO/RADI

Slika 8.7 Sučelje za izbor trošila.

8.1.8 Izbornik: "REGULACIJA"

U ovom sučelju korisnik može birati tip regulatora punjenja baterije kao i tip izmjenjivača za izmjenična trošila. Program razlikuje pet tipova regulatora te je shodno tome za svaki od njih razrađen algoritam rada. Tipovi algoritma su:

- paralelno pulsni regulator,
- serijsko pulsni regulator,
- serijski regulator s konstantnim naponom,
- serijski regulator s PWM regulacijom konstantnog napona,
- serijski regulator s PWM regulacijom i MPPT funkcijom.

Biranjem određenog tipa regulatora, korisniku se otvara spuštenu izbornik za odabir regulatora. Kada se regulator izabere, u objektima ispod izbornika ispisuju se glavne naponske postavke regulatora. Detaljni pregled i upis novih parametara regulatora može se dobiti pritiskom na objekt "UPIS/PREGLED".

Parametri regulatora su:

- VR gornja granična vrijednost napona pri kojoj regulator isklapa punjenje, zadržava konstantnu vrijednost napona,
- HVR vrijednost napona pri kojoj uslijed pražnjenja regulator ponovo uključuje punjenje,
- LVD naponska razina pri kojoj regulator isklapa trošilo odnosno pražnjenje baterije,
- LVR naponska razina pri kojoj regulator ponovo uključuje potrošnju
- Veq napon za trajno punjenje,
- Ibf Vrijednost struje pri kojoj regulator prelazi na nižu vrijednost napona punjenja (Veq),
- k_TEMP temperaturni koeficijent naponskih postavki,
- k_LVD strujni koeficijent promjene naponske postavke LVD s promjenom struje pražnjenja,
- eta_r djelotvornost regulatora (za zadnja dva tipa regulatora).

Na istom sučelju se nalazi izbornik za odabir izmjenjivača. S obzirom da djelotvornost izmjenjivača značajno ovisi o snazi izmjenjivača, ta se zavisnost posebno prikazuje na dijagramu za svaki izabrani izmjenjivač. Isto tako, u objektima pored dijagrama prikazuju se najvažniji parametri izmjenjivača. Upis novih izmjenjivača u bazu podataka, pregled i izmjena postojećih može se izvesti pritiskom na tipku "UPIS/PREGLED".

Parametri izmjenjivača su:

- U1n nazivni primarni napon (12 ili 24 V DC),
- U2n nazivni sekundarni napon (220 V AC),
- Pn nazivna snaga izmjenjivača,
- nazivni_eta djelotvornost izmjenjivača pri nazivnoj snazi,

- k_{INV} parametar eksponencijalne funkcije u izrazu (7.23),
- b_{INV} parametar linearne funkcije u izrazu (7.23).

Na slici 8.8 prikazano je sučelje za izbor regulatora punjenja i izmjenjivača.

REGULACIJA I PRILAGODBA

PUNJAČI, REGULATORI...

☐ PARALELNO PULSIRAJUĆI
☐ PARALELNO PULSIRAJUĆI S KONST. NAPONOM

☐ SERIJSKI S KONST. NAPONOM
☒ SERIJSKI, TROSTUPANJSKI S PWM-om
☐ SERIJSKI, TROSTUP. S PWM i MPT funkcijom

ProStar

U1n= 12

U2n= 220

Pn= 500

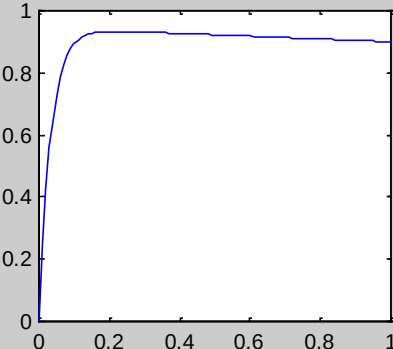
Un= 12 VR= 14 HVR= 13.9 LVR= 12.6 LVD= 11.7

UPIS/PREGLED

PRIHVATI

REFRESH

IZMJENJIVAČI



prvi

UPIS/PREGLED

UREDU

Slika 8.8 Sučelje za izbor regulatora punjenja i izmjenjivača.

8.1.9 Izbornik: "SIMULACIJA RADA FNS-a"

Sučelje za pokretanje simulacije i analizu rezultata je posljednje sučelje u nizu, (slika 8.8.). Pokretanje simulacije izvodi se pritiskom na objekt "SIMULIRAJ". Nakon završetka simulacije korisnik može analizirati rezultat simulacije i to definirajući period za koji se provodi analiza. Na taj način je moguće analizirati dan po dan u okviru perioda koji je simuliran. Analiza se može provesti za određeni dan, mjesec, sezonu ili pak za cijelu godinu. Za odabrani period analize korisnik bira između spuštenih izbornika "DIJAGRAMI" ili "BALANCE".

Ponuđeni dijagrami:

- struja i napon FNG-a,
- struja, napon SOC¹⁵ akumulatora,
- struja i napon trošila,
- tokovi snaga u sustavu.

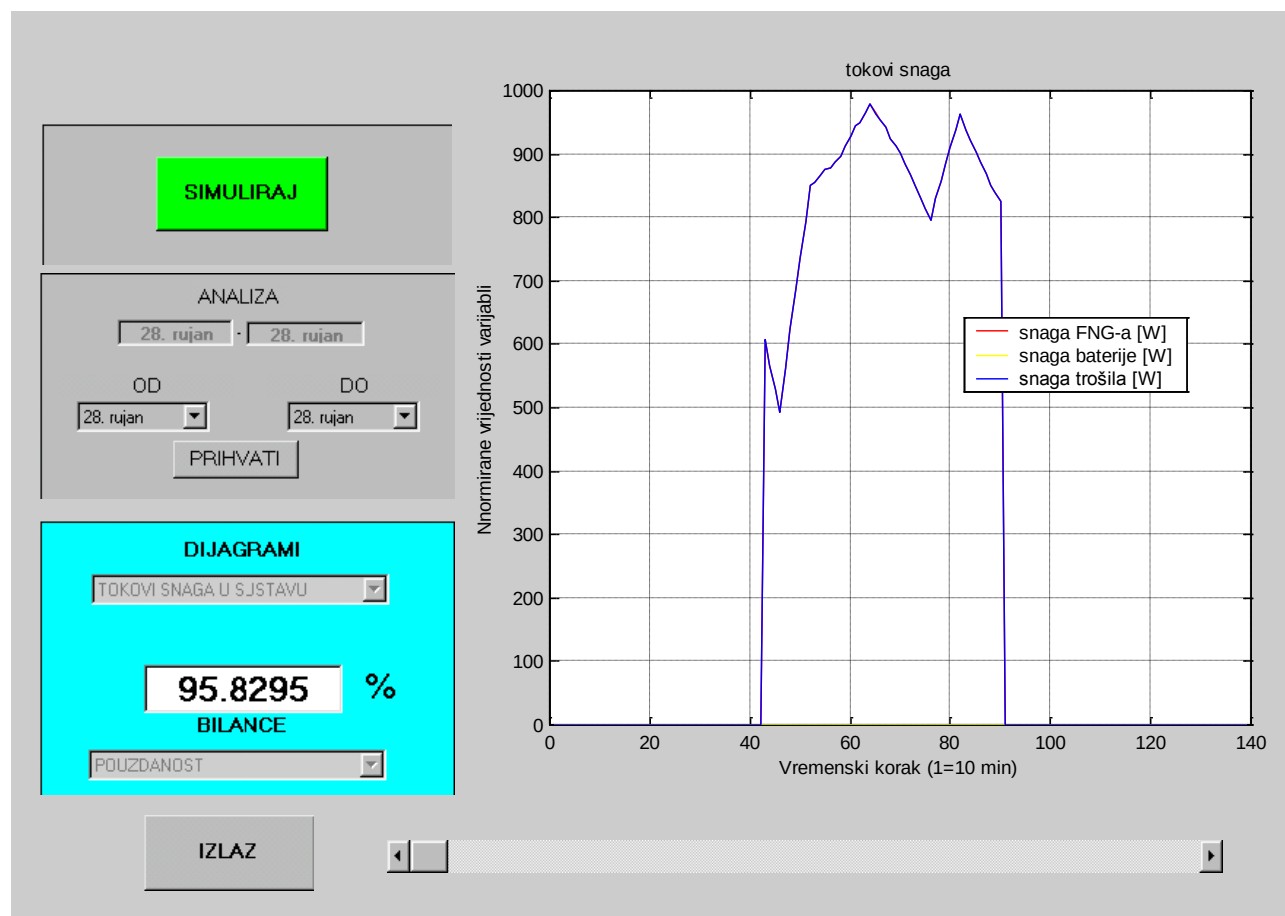
Izborom tipa dijagrama, na sučelju se iscrtava odgovarajuća vremenska zavisnost za odabrani period analize. Na isti način korisnik može izabrati tip balance za odabrani period koji će se ispisati.

Ponuđene balance su:

- iskoristljivost sunčeve energije (omjer proizvedene električne energije i primljene Sunčeve energije),
- tehnička djelotvornost FNG-a (omjer proizvedene električne energije i maksimalne električne energije koja bi se mogla proizvesti u FNG-u),
- ukupna dozačena energija,
- električna energija proizvedena u FNG-u,
- energija predana akumulatoru,
- energija koju je akumulatoru predao sustavu,
- ukupna energija trošila,
- višak odn. manjak energije (razlika proizvedene električne energije i energije trošila prema rasporedu rada),
- pouzdanost sustava (omjer vremena kada je trošilo radilo i vremena prema rasporedu rada trošila).

Na slici 8.9 prikazano je sučelje za simulaciju rada FNS-a.

¹⁵ SOC =State of Charge, odnosno stanje napunjenosti



Slika 8.9 Sučelje za pokretanje simulacije i analizu rezultata

9. REZULTATI JEDNE SIMULACIJE

U ovom poglavlju dan je primjer rezultata rada simulacijskog programa. Simulacija se odnosi na otok Lastovo. U prvo dijelu ovog programa sistematizirane su postavke fotonaponskog sustava. U nastavku dani su proračuni bilanci. Na kraju poglavlja prikazani su dijagrami struja, napona i snage.

- Sustav

Lokacija:	Lastovo
Zemljopisna širina:	42,75°
Zemljopisna dužina:	16,8°
Period simulacije:	28.09. 0:10 - 29.09. 0:10 (24 h)
Komponente sustava:	FNG, baterija, regulator, ac trošila, dc trošila i izmjenjivač
 - Trošila¹⁶:

DC trošila	
trošilo No1	Pn=100 W, Un=12 V DC,
trošilo No2	Pn=150 W, Un=12 V DC,
AC trošila	
trošilo No3	Pn=200 W, Un=220 V AC,
trošilo No4	Pn=400 W, Un=220 V AC,
- Dijagram rasporeda dnevnog rada prikazan je na slici 9.5.
- Upravljanje plohom FNG-a: **jednoosno upravljanje oko optimalno nagnute osi.**
 - Fotonaponski generator

Tip modula	SM55
Broj serijskih grupa:	1
Broj paralelnih modula	12
Nazivna snaga modula	55 W
 - Akumulatorska baterija:

Kapacitet	120 Ah
Nazivni napon	12 V
Broj serijskih grupa:	1
Broj paralelnih baterija	3
 - Regulacija (regulator punjenja i pražnjenja)

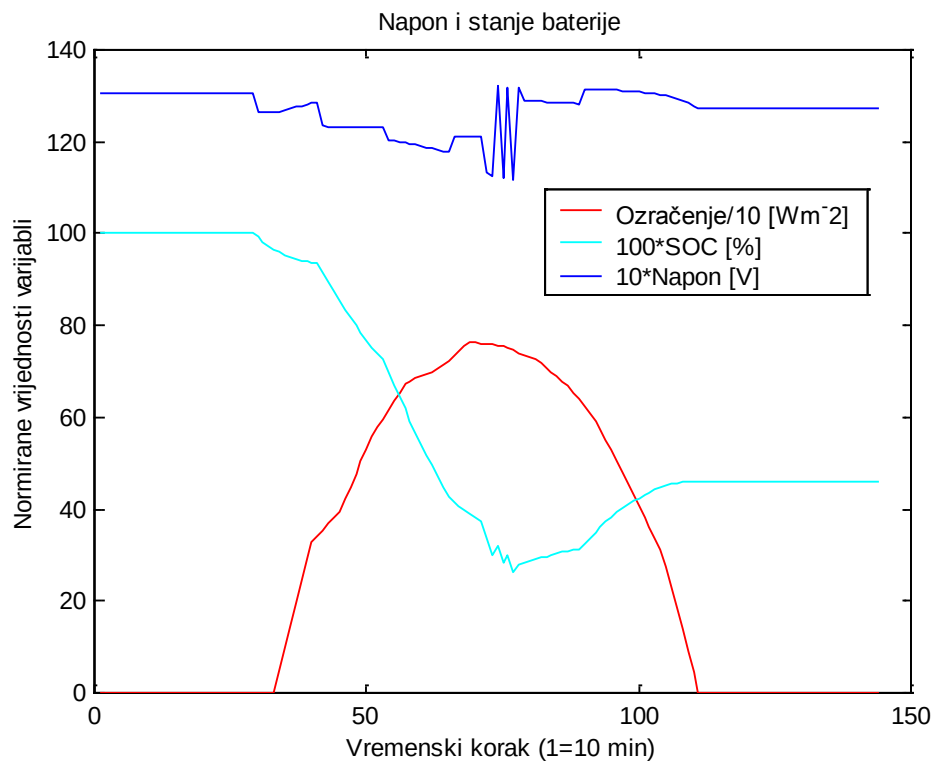
U_n	12 V DC
-------	----------------

¹⁶ Sva trošila su modelirana kao omska trošila.

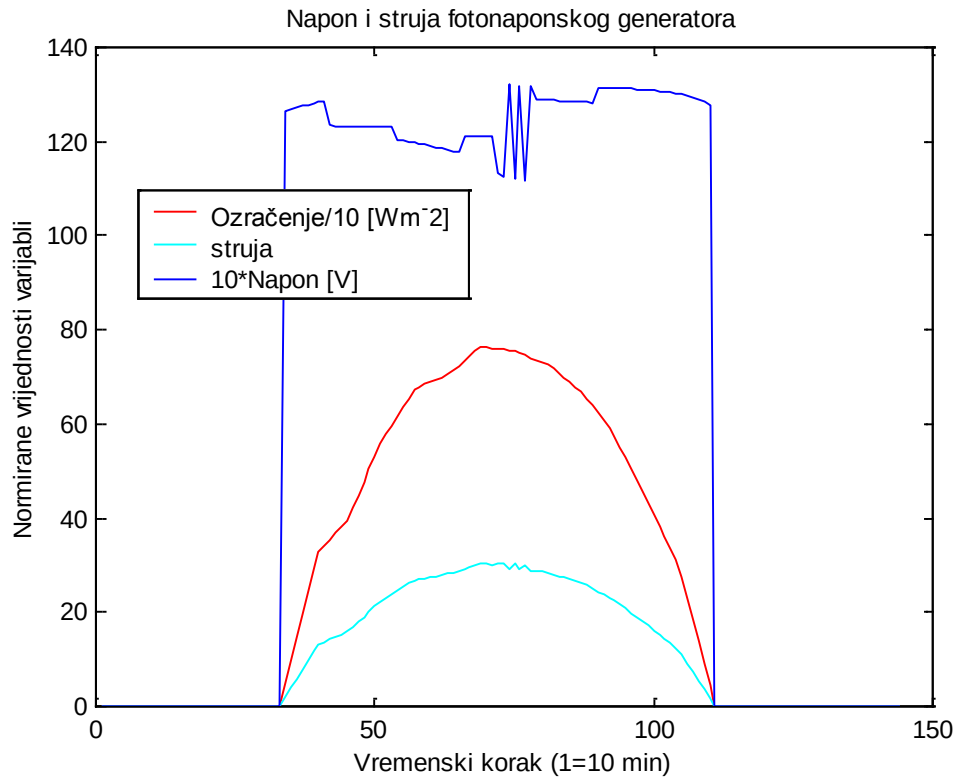
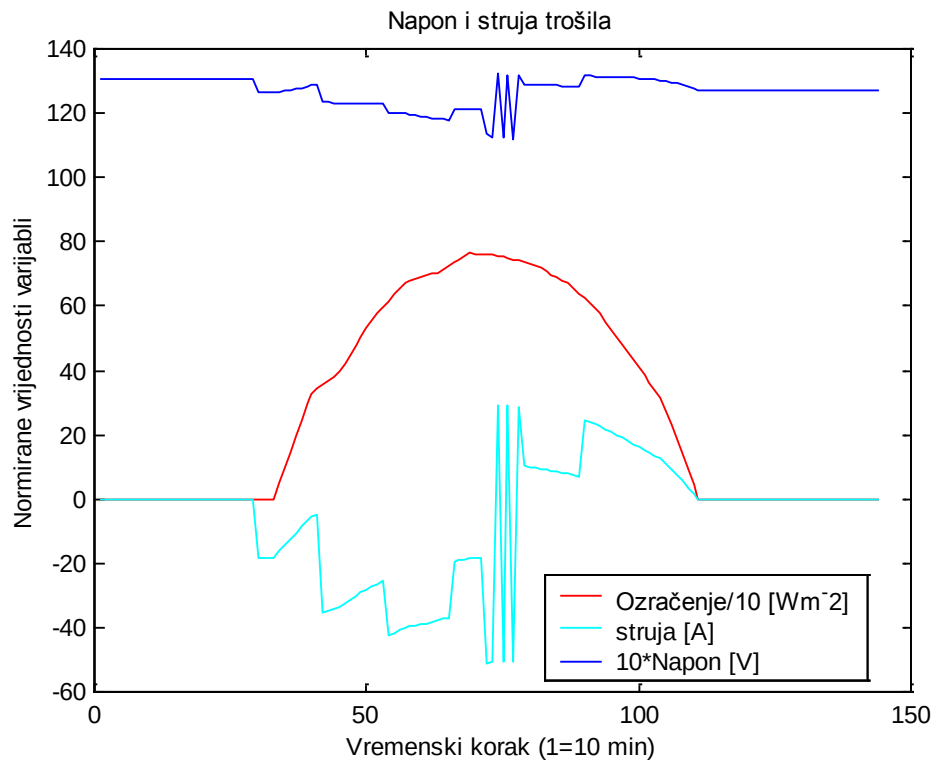
<i>VR</i>	13,9 V DC
<i>LVR</i>	12,6 V DC
<i>LVD</i>	11.3 V DC
• Izmjenjivač:	
<i>U1n</i>	12 V DC
<i>U2n</i>	220 V AC
<i>Pn</i>	500 W
<i>Nazivna djelotvornost</i>	90 %
<i>k</i>	30
<i>b</i>	0,05

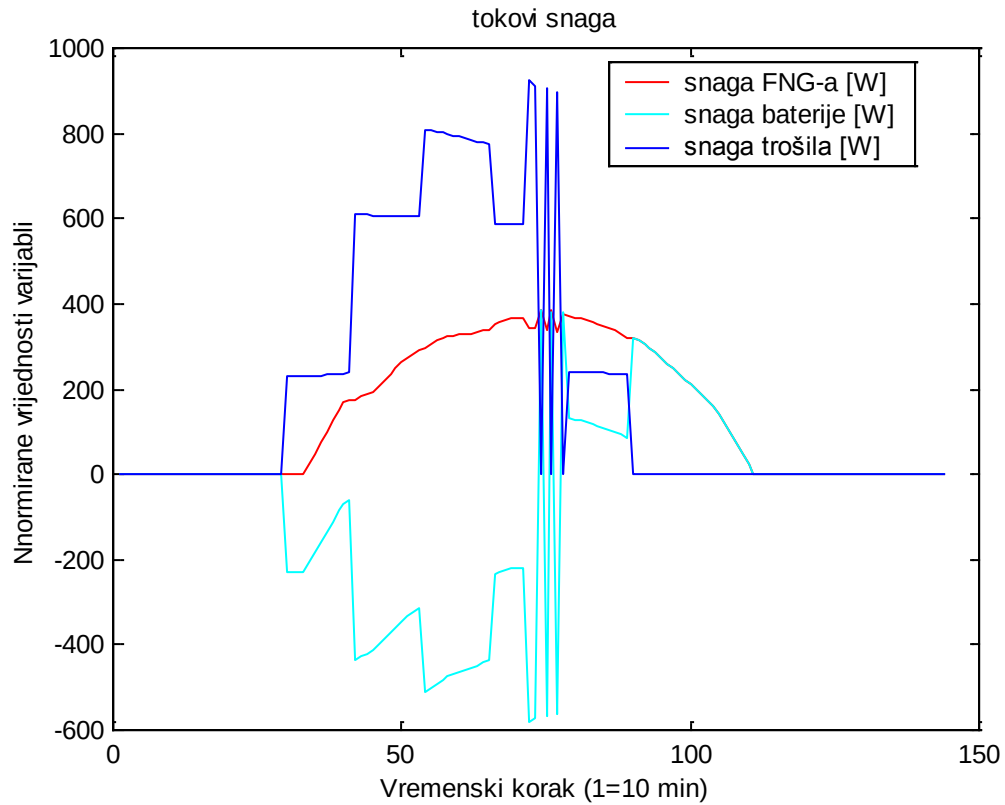
Rezultati proračuna bilanci:

Iskoristljivost sunčeve energije	9,4 %
Tehnička djelotvornost FNG-a	88,8 %
Ukupna dozračena energija.	35,74 kWh
Električna energija FNG-u.	3,36 kWh
Energija predana akumulatoru.	-2,61 kWh
Energija koju je akumulatoru predao sustavu	1,1 kWh.
Ukupna energija trošila.	4,87 kWh
Višak odn. manjak energije	-1,50 kWh
Pouzdanost sustava	95 %

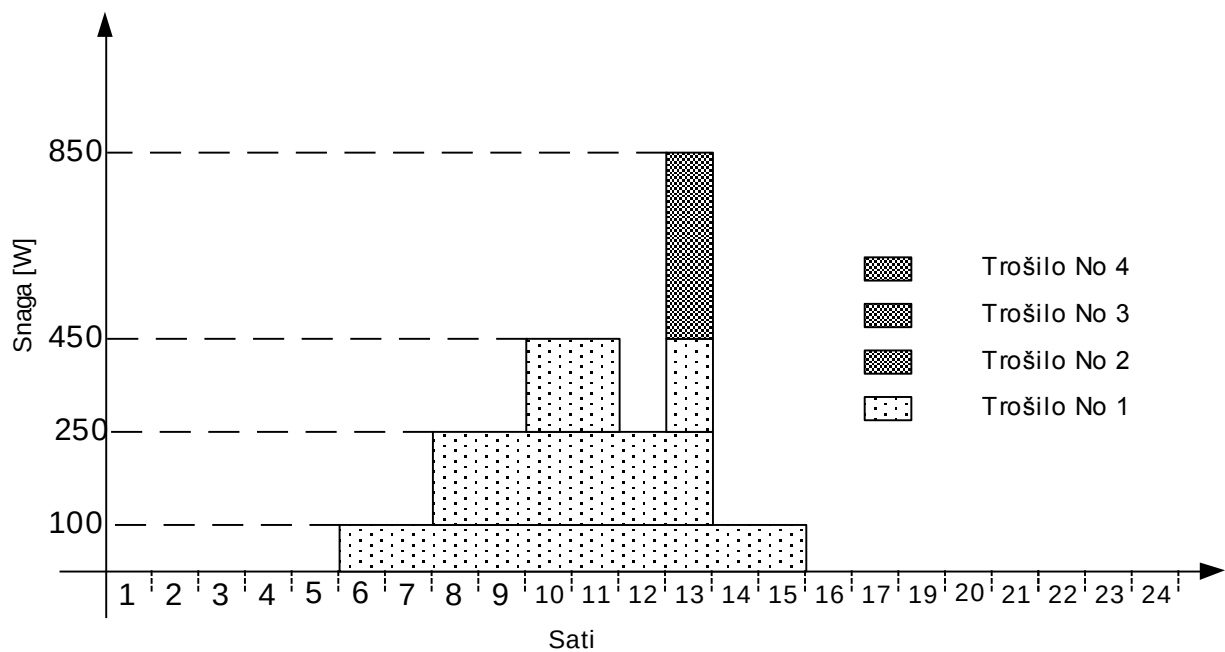


Slika 9.1 Dijagram ozračenja, stanja napunjenosti i napona baterije

**Slika 9.2** Dijagram ozračenja, struje i napona fotonaponskog generatora**Slika 9.3** Dijagram ozračenja, struje i napona trošila



Slika 9.4 Dijagram toka snage tijekom simulacijskog perioda

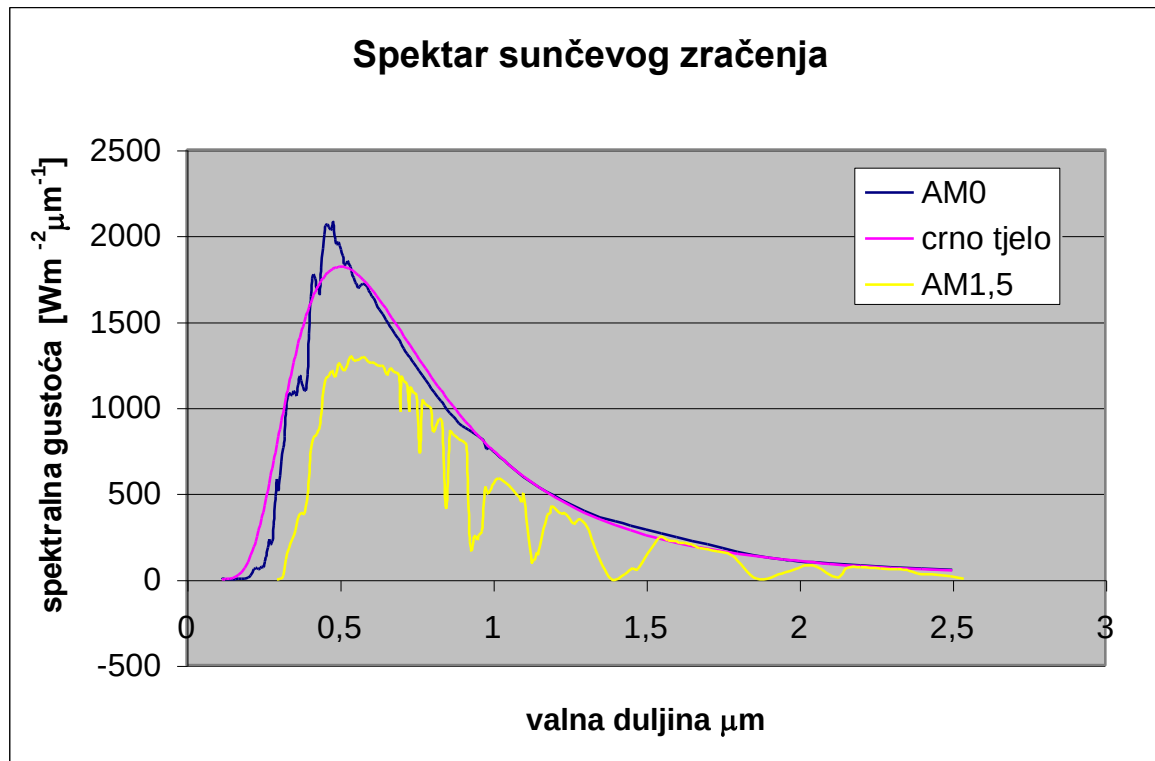


Slika 9.5 Raspored radnih sati trošila

10. DODATAK

10.1 Spektar sunčevog zračenja

Na slici je prikazan spektar sunčevog zračenja na razini površine zemlje bez utjecaja atmosfere tzv.: *ekstraterističko zračenje*, zatim prizemno sunčevo zračenje te zračenje crnog tijela normirano na 1353 W/m^2 .



Slika 10.1 Spektar sunčevog zračenja

10.2 Karakteristične veličine sunčevog dana

Jednadžba vremena

Jednadžba vremena predstavlja vezu između lokalnog i sunčevog vremena. Zemaljska kugla je podijeljena u 24 vremenske zone. Neke vremenske zone su šire od drugih iz razloga unifikacije vremena u pojedinim regijama. Prema [lit. 21] jednadžba vremena glasi:

$$SV = LV + 4(L_{ST} - L) + 9,87 * \sin(2B) - 7,53 \cos(B) - \sin(B), \quad (10.1)$$

$$B = \frac{360^\circ(n - 81)}{364}.$$

Gdje je:

SV	sunčevo vrijeme izraženo vremenskim jedinicama (hh:mm:ss),
LV	Vrijeme vremenske zone u kojoj se nalazi lokacija,
L_{ST}	središnji meridijan vremenske zone,
n	redni broj dana u godini.

Vrijeme (kut) izlaska Sunca

Vrijeme izlaska sunca je ono sunčevo vrijeme izraženu u lučnoj mjeri kada se na horizontu pojave prve zrake sunca. Točnije kada je visina sunca jednaka nuli. U tom slučaju vrijedi:

$$\omega_s = \arccos(-\tan(\varphi) \tan(\delta)). \quad (10.2)$$

Dužina trajanja dana

Na temelju izraza (10.2) lako se dođe do dužine trajanja Sunčevog dana :

$$Z = \frac{2}{15^\circ} \arccos(-\tan(\varphi) \tan(\delta)) \quad [h]. \quad (10.3)$$

Visina sunaca u podne

$$\sin(\alpha_p) = \cos(\varphi - \delta). \quad (10.4)$$

Sunčev azimut pri izlasku i zalasku Sunca

$$\phi_s = \arccos\left(-\frac{\sin(\delta)}{\cos(\varphi)}\right), \quad (10.5)$$

gdje su: φ kut geografska širina a δ kut deklinacije.

10.3 Koeficijenti R_b za proizvoljno orijentiranu plohu modula.

Pri proizvoljnoj orijentaciji nagnute plohe po azimutu γ i nagibu β izraz za mjesečni prosjek srednje dnevne vrijednosti $\bar{R}_b$ glasi:

Kosinus upadnog kuta na plohu orijentiranu prema kutovima (β, γ) dan je izrazom:

$$\cos(\theta) = \cos(\beta)\sin(\alpha) + \cos(\alpha)\sin(\beta)\cos(\psi - \gamma) = A\cos(\omega) + B - C\sin(\omega), \quad (10.6)$$

pri čemu je:

$$A = [\cos(\beta)\cos(\varphi) + \sin(\beta)\sin(\varphi)\cos(\gamma)]\cos(\delta),$$

$$B = [\cos(\beta)\sin(\varphi) - \sin(\beta)\cos(\varphi)\cos(\gamma)]\sin(\delta),$$

$$C = \sin(\beta)\sin(\gamma)\cos(\delta),$$

$$\bar{R}_b = \frac{1}{brdan} \sum_{dan=1}^{brdan} \left\{ \frac{A[\sin(\omega_{s2}) - \sin(\omega_{s1})] + B(\omega_{s2} - \omega_{s1}) + C[\cos(\omega_{s2}) - \cos(\omega_{s1})]}{2[\cos(\varphi)\cos(\delta)\sin(\omega_s) + \sin(\varphi)\sin(\delta)\omega_s]} \right\}, \quad (10.7)$$

pri čemu je

ω_{s1} kut izlaska Sunca na kosu plohu,

ω_{s2} kut zalaska Sunca na kosu plohu,

ω_s kut izlaska Sunca na horizontalnu plohu,

$$\omega_{1s} = \max \left[-\omega_s, -\arccos \left(-\frac{B}{\sqrt{A^2 + C^2}} \right) - \arctan \left(\frac{C}{A} \right) \right],$$

$$\omega_{1s} = \min \left[\omega_s, \arccos \left(-\frac{B}{\sqrt{A^2 + C^2}} \right) - \arctan \left(\frac{C}{A} \right) \right], \quad (10.8)$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan(\varphi)\tan(\delta)).$$

Izraz je naočigled složen, međutim za plohe orijentirane prema jugu ($\gamma=0$) izraz se pojednostavljuje i poprima oblik:

$$\bar{R}_b = \frac{1}{brdan} \sum_{dan=1}^{brdan} \frac{\cos(\varphi - \beta)\cos(\delta)\sin(\omega'_s) + \sin(\varphi - \beta)\sin(\delta)\omega'_s}{\cos(\varphi)\cos(\delta)\sin(\omega'_s) + \sin(\varphi)\sin(\delta)\omega'_s}. \quad (10.9)$$

U ovom slučaju kut izlaska Sunca i kut zalaska Sunca na nagnutu plohu su jednaki po apsolutnom iznosu definirani su izrazom:

$$\omega'_s = \min[\omega_s, \arccos(-\tan(\varphi - \beta)\tan(\delta))]. \quad (10.10)$$

10.4 Praćenje položaja Sunca

10.4.1 Jednoosno praćenje sunca oko horizontalne osi u pravcu sjever-jug

Os rotacije je položena horizontalno i okrenuta prema jugu. Uvjet praćenja jest da se projekcija vektora položaja sunca poklapa s projekcijom vektora plohe na ravninu okomitu na os rotacije (slika 10.2). Vektori položaja Sunca i normale na plohu sukladno slici 10.2 mogu se prikazati kao:

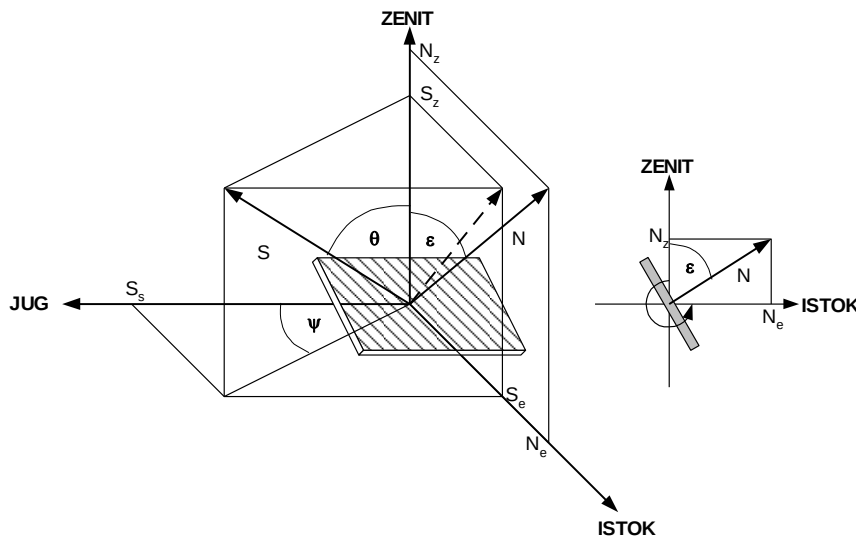
$$\vec{S} = \begin{bmatrix} S_e \\ S_s \\ S_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) \sin(\psi) \\ \cos(\alpha) \cos(\psi) \\ \sin(\alpha) \end{bmatrix} \quad \vec{N} = \begin{bmatrix} N_e \\ N_s \\ N_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\varepsilon) \\ 0 \\ \cos(\varepsilon) \end{bmatrix}. \quad (10.11)$$

Iz uvjeta jednoosnog praćenja Sunca slijedi:

$$\frac{S_z}{S_e} = \frac{N_z}{N_e} \Rightarrow \varepsilon = \arctg\left(\frac{\sin(\psi)}{\cos(\alpha)}\right). \quad (10.12)$$

Pri čemu je ε kut rotacije oko osi. Upadni kut na plohu se računa kao skalarni produkt jediničnih vektora N i S . Slijedi:

$$\cos(\theta) = \cos(\psi) \cos(\alpha) \sin(\varepsilon) + \sin(\alpha) \cos(\varepsilon). \quad (10.13)$$



Slika 10.2 Jednoosno praćenje sunca oko horizontalne osi sjever-jug.

10.4.2 Jednoosno praćenje Sunca oko horizontalne osi u pravcu istok-zapad

Os rotacije je položena horizontalno u pravcu istok-zapad. Rotacijom ploha modula prati Ssunce po visini. Vektor položaja Sunca dan je izrazom (10.14). Vektor normale na plohu uz kut rotacije ε oko zadane osi, dan je izrazom:

$$\vec{N} = \begin{bmatrix} N_e \\ N_s \\ N_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \sin(\varepsilon) \\ \cos(\varepsilon) \end{bmatrix}. \quad (10.14)$$

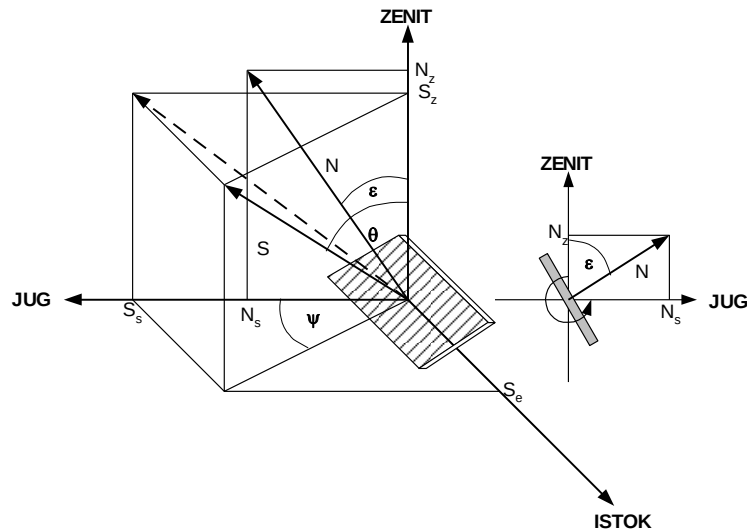
Kut rotacije oko horizontalne osi dobiva se iz uvijeta da se projekcija Sunčeve zrake na plohu okomitu na os rotacije poklapa s vektorom normale na plohu:

$$\frac{S_z}{S_s} = \frac{N_z}{N_s} \Rightarrow \varepsilon = \arctg(\operatorname{ctg}(\alpha) \cos(\psi)). \quad (10.15)$$

Kut upada direktnog Sunčevog zračenja dan je sljedećim izrazom:

$$\cos(\theta) = \sin(\psi) \cos(\alpha) \sin(\varepsilon) + \sin(\alpha) \cos(\varepsilon). \quad (10.16)$$

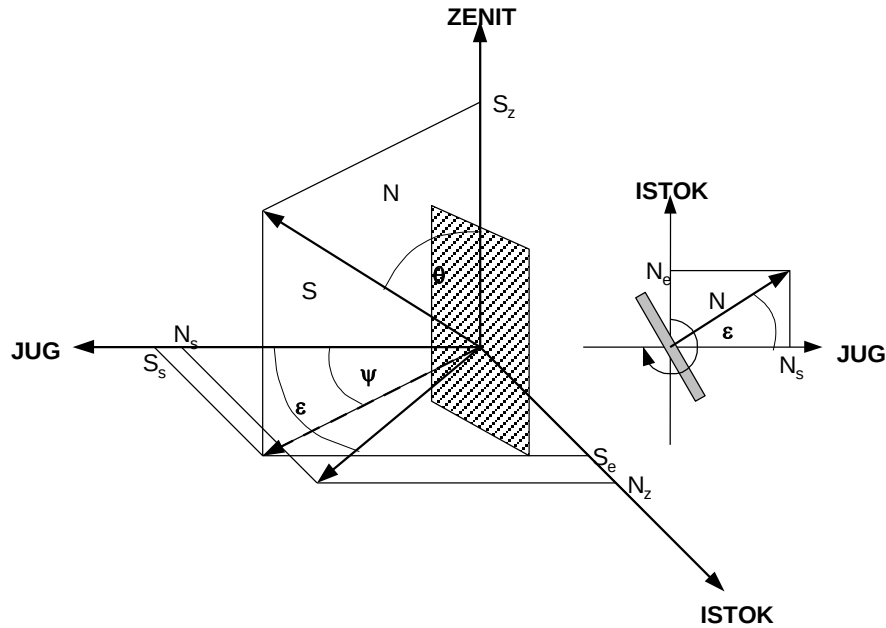
Na slici 10.3 prikazan je primjer praćenja Sunčevog gibanja .



Slika 10.3 Jednoosno praćenje sunca oko horizontalne osi istok zapad.

10.4.3 Jednoosno praćenje Sunca oko vertikalne osi

Os rotacije je vertikalno usmjerena prema zenitu. Rotacijom se prati Sunce po azimutu od izlaska do zalaska.



Slika 10.4 Jednoosno praćenje sunca oko vertikalne osi.

Vektor položaja Sunca dan je izrazom (10.17). Vektor normale na plohu kao i kut rotacije u ovom slučaju jednoosnog praćenja dani su jednostavnim izrazima:

$$\vec{N} = \begin{bmatrix} N_e \\ N_s \\ N_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\epsilon) \\ \cos(\epsilon) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \frac{S_e}{S_s} = \frac{N_e}{N_s} \Rightarrow \epsilon = \psi. \quad (10.17)$$

Upadni kut je jednostavno određen visinom Sunca:

$$\cos(\theta) = \sin(\psi) \cos(\alpha) \sin(\epsilon) + \cos(\alpha) \cos(\psi) \cos(\epsilon). \quad (10.18)$$

Sređivanjem se dobiva:

$$\cos(\theta) = \cos(\alpha). \quad (10.19)$$

10.4.4 Jednoosno praćenje Sunca oko proizvoljno nagnute osi

Transformacija koordinatnog sustava oko proizvoljno prikazana je na slici 10.5. Vektor u izvornom koordinatnom sustavu transformira se u novi sustav množenjem s matricom transformacije. Za opisani slučaj, uzimajući da je azimutni kut pozitivan prema istoku a kut nagiba je pozitivan ako je os nagnuta prema sjeveru matrica transformacije glasi:

$$D = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\beta)\sin(\gamma) & -\cos(\beta)\sin(\gamma) \\ \sin(\gamma) & \sin(\beta)\cos(\gamma) & \cos(\beta)\cos(\gamma) \\ 0 & -\cos(\beta) & \sin(\beta) \end{bmatrix}. \quad (10.20)$$

U takvom koordinatnom sustavu vektor položaja Sunca ima oblik:

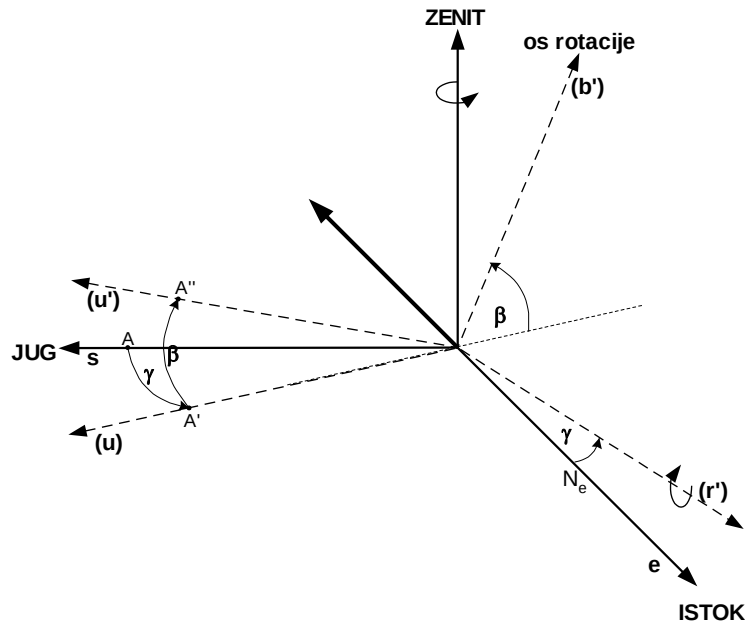
$$\vec{S}' = D\vec{S} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma)\cos(\alpha)\sin(\psi) - \sin(\beta)\sin(\gamma)\cos(\alpha)\cos(\psi) - \sin(\alpha)\sin(\gamma)\cos(\beta) \\ \sin(\gamma)\cos(\alpha)\sin(\psi) + \sin(\beta)\cos(\gamma)\cos(\alpha)\cos(\psi) + \cos(\beta)\cos(\gamma)\sin(\alpha) \\ \sin(\beta)\sin(\alpha) - \cos(\beta)\cos(\alpha)\sin(\psi) \end{bmatrix} \quad (10.21)$$

U novom koordinatnom sustavu na slici prikazan kao $(\mathbf{r}'-\mathbf{u}'-\mathbf{b}')$, ploha se vrti oko okomite osi $\mathbf{b}'$ pa je u tom slučaju vektor normale $\vec{N}$ na plohu dan izrazom (10.17). Dakle uvijek jednoosne rotacije ostaje isti kao i u slučaju rotacije oko zenitne osi (okomite osi).

$$\tan(\varepsilon) = \frac{\cos(\gamma)\cos(\alpha)\sin(\psi) - \sin(\beta)\sin(\gamma)\cos(\alpha)\cos(\psi) - \sin(\alpha)\sin(\gamma)\cos(\beta)}{\sin(\gamma)\cos(\alpha)\sin(\psi) + \sin(\beta)\cos(\gamma)\cos(\alpha)\cos(\psi) + \cos(\beta)\cos(\gamma)\sin(\alpha)}. \quad (10.22)$$

Kosinus upadnog kuta na plohu kolektora je prema tome:

$$\cos(\theta) = \sin(\varepsilon)[\cos(\gamma)\cos(\alpha)\sin(\psi) - \sin(\beta)\sin(\gamma)\cos(\alpha)\cos(\psi) - \sin(\alpha)\sin(\gamma)\cos(\beta)] + \cos(\varepsilon)[\sin(\gamma)\cos(\alpha)\sin(\psi) + \sin(\beta)\cos(\gamma)\cos(\alpha)\cos(\psi) + \cos(\beta)\cos(\gamma)\sin(\alpha)] \quad (10.23)$$



Slika 10.5 Transformacija koordinatnog sustava za slučaj praćenja Sunca oko proizvoljne osi .

Poseban slučaj i vrlo praktično rješenje je jednoosna rotacija oko polarne osi. Polarna os je os postavljena prema horizontu u pravcu sjevera pod kutom koji odgovara zemljopisnoj širini konkretne lokacije. U tom slučaju je:

$$\gamma = 0, \quad \beta = \varphi. \quad (10.24)$$

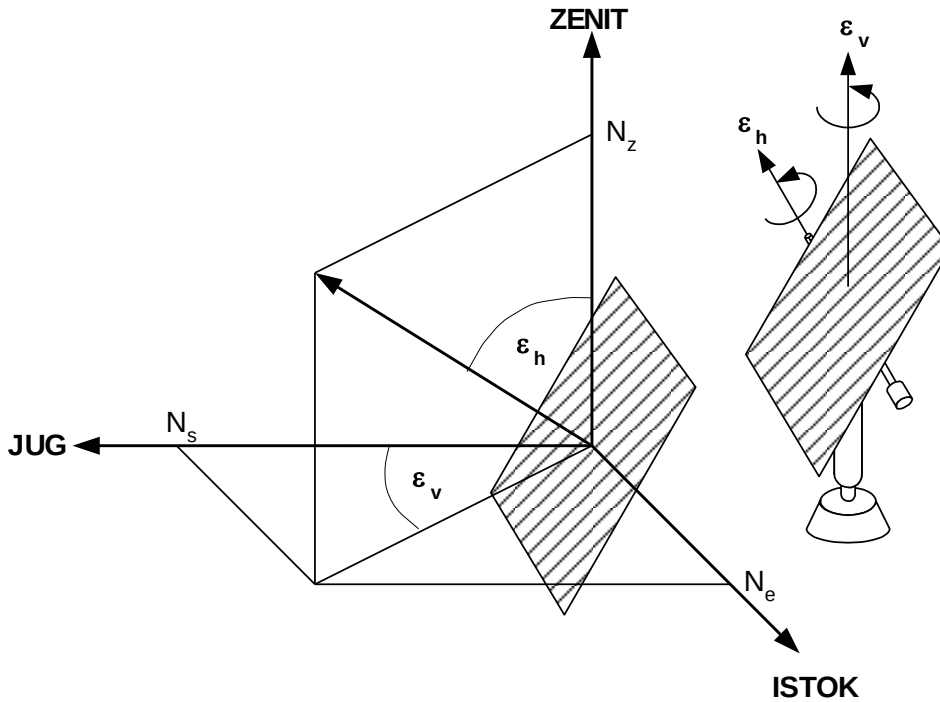
Uvrštavajući kuteve iz (10.24) u (10.22) i (10.23) dobiva se napokon:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= -\omega \\ \theta &= \delta \end{aligned} \quad (10.25)$$

Ovaj zaključak je jako važan. Kut rotacije je linearna funkcija vremena. Dakle vrtnja plohe je jednolika i ne zahtjeva dodatni regulacijski krug za pozicioniranje prema kutu rotacije kao što je slučaj u ostalim primjerima praćenja sunca. S druge strane kosinus upadnog kuta varira od 0.92 do 1. To znači da je prosječna dozračena energija u slučaju jednoosnog praćenja sunca oko polarne osi manja za samo 4% u odnosu na dvoosno praćenje.

10.4.5 Dvoosno praćenje Sunca

Optimalan slučaj je Sunčeve zrake upadaju pod pravim kutom na ravninu kolektora. Moguće je velik broj izbora osi rotacija. Međutim iz praktičnih razloga uglavnom su to vertikalne os (prem zenitu) i horizontalna os paralelna s plohom modula. Intuitivno se da zaključiti da kut rotacije oko vertikalne osi mora biti jednak azimutu Sunca a kut rotacije mora biti jednak visinazentinom kutu. Poštujući utvrđenu metodologiju određivanja uvijeta praćenja Sunca navedeba tvrdanj će biti dokazana. Neka je rotacija oko vertikalne osi definirana kutom ε_v a oko horizontalne osi ε_h (slika 10.6)



Slika 10.6 Primjer dvoosnog praćenja Sunčevog gibanja

Vektori normale na plohu kao i vektor položaja Sunca dani su izrazima:

$$\vec{S} = \begin{bmatrix} S_e \\ S_s \\ S_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) \sin(\psi) \\ \cos(\alpha) \cos(\psi) \\ \sin(\alpha) \end{bmatrix} \quad \vec{N} = \begin{bmatrix} N_e \\ N_s \\ N_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\varepsilon_h) \sin(\varepsilon_v) \\ \sin(\varepsilon_h) \cos(\varepsilon_v) \\ \cos(\varepsilon_h) \end{bmatrix} \quad (10.26)$$

Iz uvijet za potpunog praćenja slijedi:

$$\varepsilon_h = 90 - \alpha \quad \varepsilon_v = \psi \quad (10.27)$$

$$\cos(\theta) = 1$$

10.5 Definicija optičke mase zraka

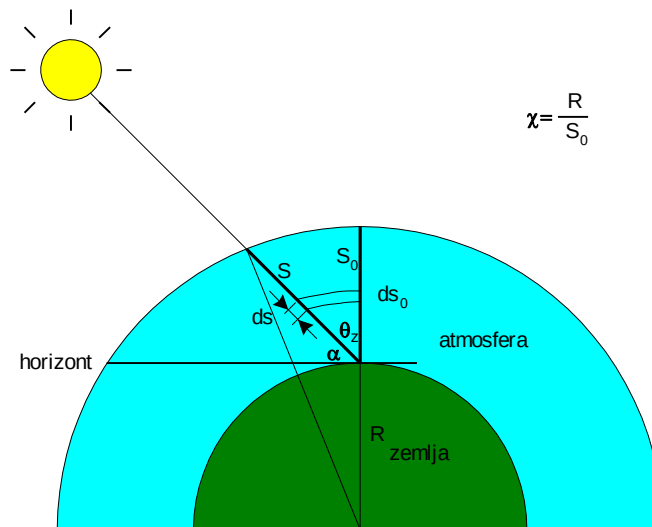
Ako je A površina plohe na koju upada sunčevo zračenje, S dužina putanje sunčeve zrake kroz atmosferu tada izraz, a ds diferencijal putanje:

$$m = A \int_{s=0}^{s=S} \rho ds \quad (10.28)$$

predstavlja masu zraka kroz koju prolazi svjetlost. Ako je Sunce u zenitu masa zraka je najmanja i iznosi m_0 . Omjer m/m_0 definira se kao *optička masa zraka*. Vrijednost M_0 se računa za nadmorsku visinu $NV=0$. Prema tome po definiciji optička masa zraka jednaka je $m=1$ kada je Sunce u zenitu na razini mora.

Za općeniti slučaj kada se uzme u obzir nadmorska visina NV .

$$m = \frac{\int_{s=NV}^{s=S} \rho(s) ds}{\int_{s=0}^{s=S_0} \rho(s) ds} \quad (10.29)$$



Slika 10.7 Uz objašnjenje optičke mase zraka

Primjenom kosinusnog poučka uvodeći faktor χ definiran na slici dobiva se omjer duljina staze S_0 i S :

$$S = S_0 \left[\sqrt{\chi^2 \sin^2(\alpha) + 1} + 2\chi - \chi \sin(\alpha) \right], \quad (10.30)$$

gdje je kut α visina sunca, a S_0 je zapravo vertikalna visina stupca zraka i njom je određen tlak na određenoj lokaciji na $NV=0$. Diferencirajući izraz za S iz (10.30) i uvrštavanjem u (10.29) dobiva se:

$$m = \frac{S}{S_0} \frac{\int_{x=NV}^{x=S_0} \rho(x) ds_0}{\int_{x=0}^{x=S_0} \rho(x) ds_0} . \quad (10.31)$$

Imajući u vidu da je barometarski tlak na nekoj lokaciji određen integralom:

$$P(NV) = - \int_{NV}^{\infty} \rho(s) g(s) ds \approx - \bar{g} \int_{NV}^{S_0} \rho(s) ds , \quad (10.32)$$

gdje je $\bar{g}$ srednja vrijednost gravitacijskog ubrzanja. Slijedi:

$$m = \frac{S}{S_0} \frac{P}{P_0} . \quad (10.33)$$

gdje je P barometarski tlak na danoj lokaciji a P_0 tlak na razini mora. Zbog te ovisnosti uvodi se pojam *apsolutne optičke mase zraka* u kojoj je uzeta u obzir nadmorska visina. Mjerenjem je utvrđeno da je apsolutna masa zraka na nadmorskoj visini $NV=0$ pri upadnom kutu $\alpha=0$ jednaka $m=35.4$ [lit. 22]. Uvrštavajući to u izraz (10.30) dobiva se $\chi=626,08$. Uvrštavanjem parametra χ u (10.30) i sređivanjem slijedi konačan izraz:

$$m = \frac{P}{P_0} m_0 \approx \frac{2,0016}{\sin(\alpha) + \sqrt{\sin^2(\alpha) + 3,197 \cdot 10^{-3}}} \exp(-0.0001184 NV) . \quad (10.34)$$

gdje je

m_0 apsolutna optička masa zraka,
 m optička masa zraka,
 NV nadmorska visina.

Apsolutna optička masa zraka na nadmorskoj visini 0 m je prema [lit. 15] izražena izrazom:

$$m_0 = \frac{1}{\sin(\alpha) + 0,5057(\alpha + 6,08)^{-1,634}} . \quad (10.35)$$

Izrazi (10.34) i (10.35) se mogu vrlo dobro aproksimirati jednostavnim izrazom:

$$m = \frac{1}{\sin(\alpha)} . \quad (10.36)$$

Pogreške se javljaju samo pri malim kutevima. U tablici 10.1 prikazana optičke mase zraka o upadnom kutu prema različitim formulama

Tablica 10.1 Optička masa zraka prema različitim izrazima

α	jed. (10.36)	jed. (10.35)	jed. (10.34)	tablica u [lit.22]
0	∞	37,76	35,40	35,40
5	11,47	8,85	10,48	10,40
20	2,92	2,73	2,91	2,90
30	2,00	1,91	2,00	2,00
40	1,56	1,50	1,55	1,55
50	1,31	1,27	1,30	1,30
70	1,06	1,04	1,06	1,06
90	1,00	0,98	1,00	1,00

10.6 Metoda linearizacije funkcije zadana vrijednostima u pojedinim točkama intervala

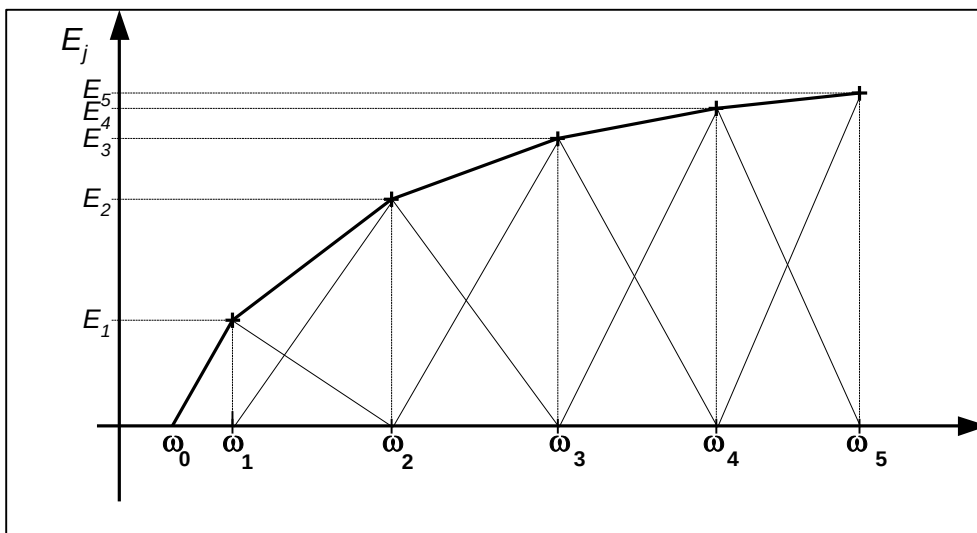
Ako su u točkama ω_j , $j=\{0,2,3,\dots,n\}$ nekog kontinuiranog skupa zadane vrijednosti neke funkcije E_j , tada se funkcija može aproksimirati podijelovima linearnim funkcijama. Algebarski izraz ove funkcije glasi:

$$E(\omega) = \sum_{j=0}^n E_j \Phi_j(\omega), \quad (10.37)$$

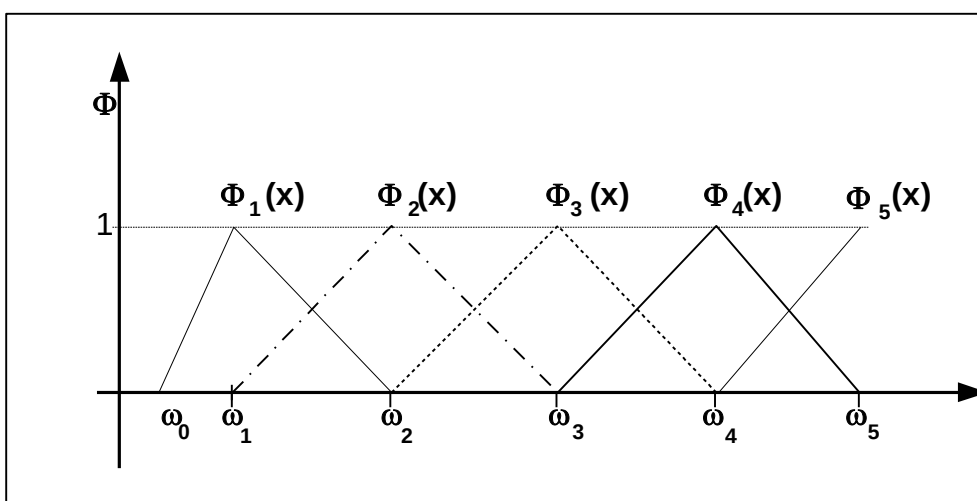
pri čemu su funkcije $\Phi_j(\omega)$ po segmentima linearne i definirane izrazima:

$$\Phi_j(\omega) = \begin{cases} 0 & \omega \notin [\omega_{j-1}, \omega_{j+1}] \\ \frac{\omega - \omega_{j-1}}{\omega_j - \omega_{j-1}} & \omega \in [\omega_{j-1}, \omega_j] \\ \frac{\omega_{j+1} - \omega}{\omega_{j+1} - \omega_j} & \omega \in [\omega_j, \omega_{j+1}] \end{cases} . \quad (10.38)$$

Na slikama 10.8 i 10.9 prikazan je primjer linearizacije funkcije zadane u čvorovima intervala.



Slika 10.8 Primjer linearizacije po segmentima.



Slika 10.9 Jedinične funkcije za linearizaciju funkcije zadane u čvorovima.

10.7 Sistematizacija formula za stohastički model ozračenja

$$E_d(\omega) = \sum_{j=0}^n k_d(j) k_T(j) E_{0j} \Phi_j(\omega)$$

$$E_b(\omega) = E(\omega) - E_d(\omega)$$

$$E(\omega) = \sum_{j=0}^n k_T(j) E_j \Phi_j(\omega)$$

$$E_j = \frac{1}{t_2 - t_1} \frac{\ln(A(m) - B(m)U)}{c(m)} \int_{t_1}^{t_2} \bar{E}_0 \sin(\alpha(t)) dt, \quad k_T = \frac{\ln(A - B \cdot U)}{c}, \quad K_T = \sum_{j=1}^{24} k_T(j) \cdot \frac{h_0(j)}{H_0}$$

$$\begin{aligned} \cos(\theta) &= \cos(\beta) \sin(\alpha) + \cos(\alpha) \sin(\beta) \cos(\psi - \gamma) \\ &= [\cos(\beta) \cos(\varphi) + \sin(\beta) \sin(\varphi) \cos(\gamma)] \cos(\delta) \cos(\omega) + \\ &\quad + [\cos(\beta) \sin(\varphi) - \sin(\beta) \cos(\varphi) \cos(\gamma)] \sin(\delta) \\ &\quad + \sin(\beta) \sin(\gamma) \cos(\delta) \sin(\omega) \end{aligned}$$

$$\sin(\alpha) = \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega)$$

$$\cos(\psi) = \frac{\sin(\alpha) \sin(\varphi) - \sin(\delta)}{\cos(\alpha) \cos(\varphi)} = \frac{\sin(\delta) \sin(\varphi) \cos(\omega) - \sin(\delta)}{\cos(\alpha)}$$

$$K_1 = 1 - \left(\frac{E_d}{E} \right)^2$$

$$E_\beta = E_b \frac{\cos(\theta)}{\sin(\alpha)} + E_d \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \left[1 + K_1 \sin^3\left(\frac{\beta}{2}\right) \right] \left(1 + K_1 \cos^2(\theta) \cos^3(\alpha) \right) + (E_b + E_d) \rho \frac{1 - \cos(\beta)}{2}$$

$$Tsr = Tsr_0 + ksr \cdot K_T$$

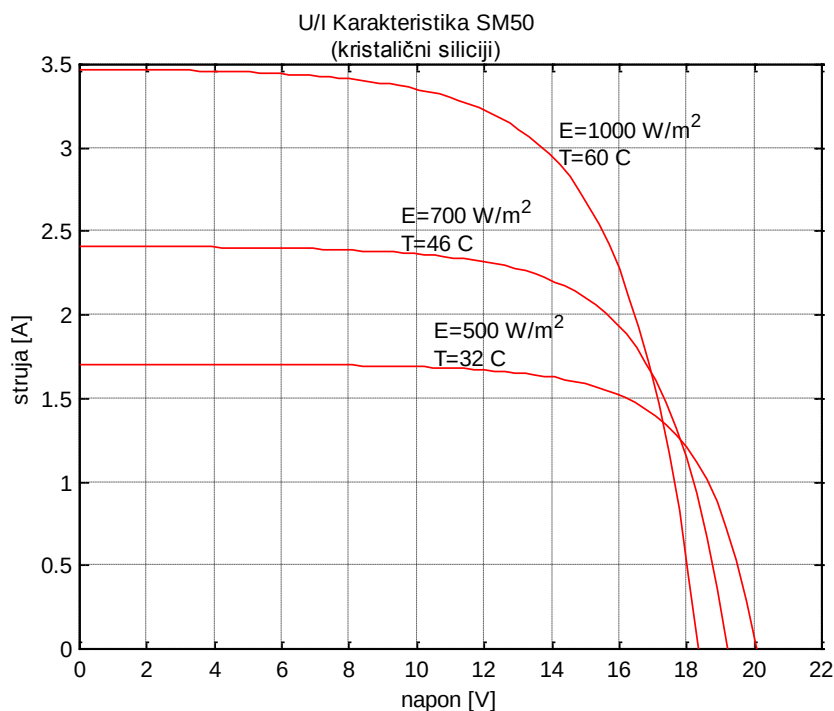
$$\sigma_{sr} = \sigma_{sr0} + b1 \cdot K_T + b2 \cdot K_T^2$$

$$F_{T,m}(T) = \frac{1}{2\pi\sqrt{\delta_{sr}(m)}} \int_{-\infty}^T e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{T-T_{sr}(m)}{\delta}\right)^2}$$

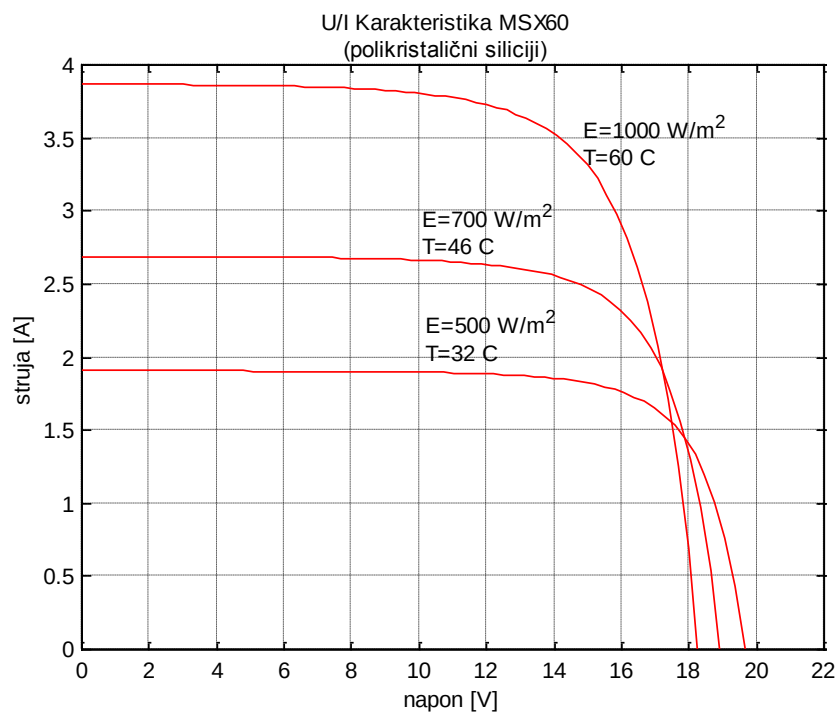
$$T(d, m) = F_{T,m}^{-1}(U)$$

Značenje pojedinih simbola dano je u popisu simbola na početku rada.

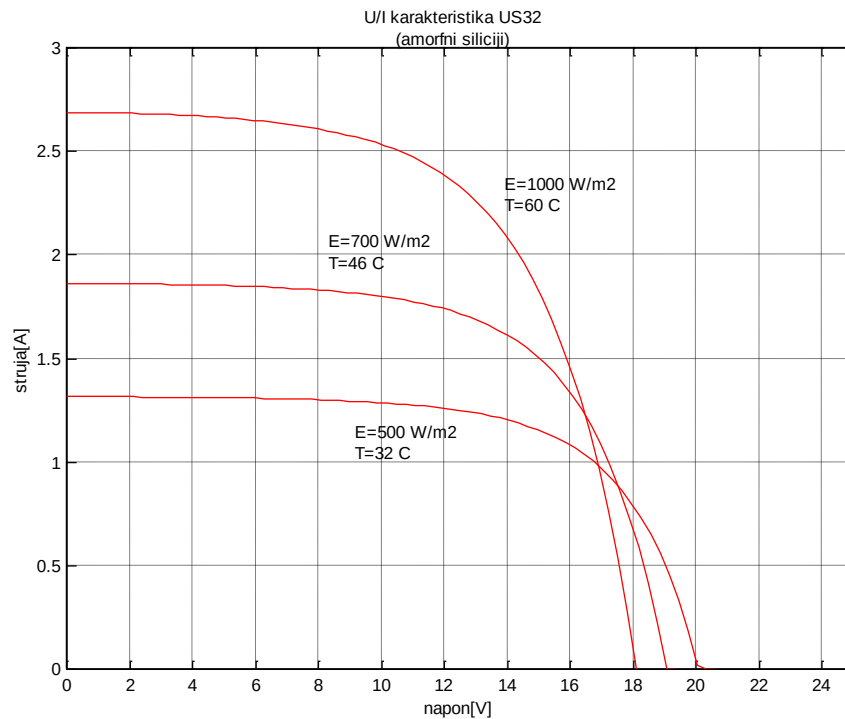
10.8 Primjeri simulacija strujno- naponskih karakteristika



Slika 10.10 Tip: SM50, Siemens



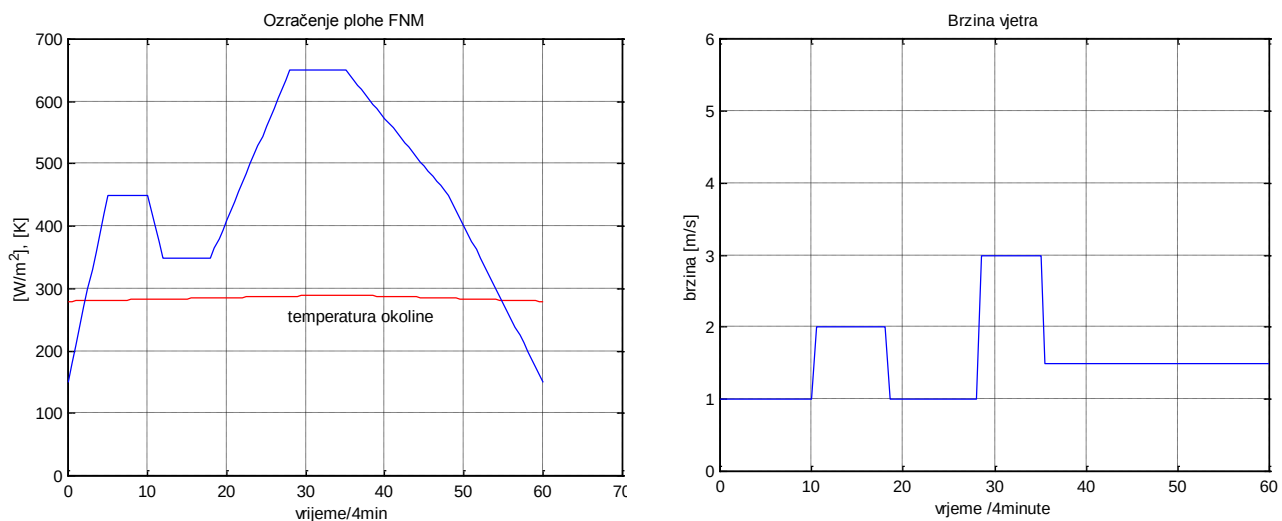
Slika 10.11 Tip: MSX60, BP Solarex



Slika 10.12 Tip: US32, US Solar Cells

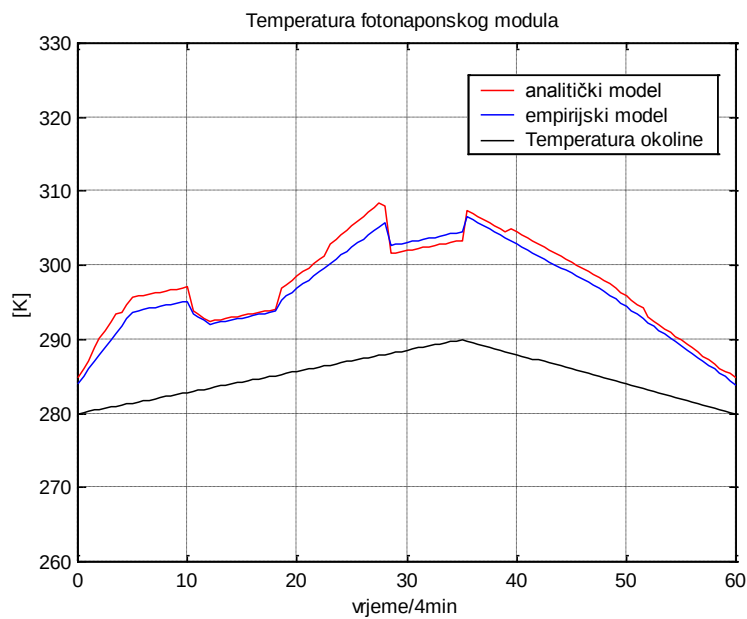
10.9 Primjer primjene termičkog modela fotonaponske ćelije

Fotonaponski modul od amornog silicija US32 priključen je direktno na trošilo omskog otpora od 10Ω , slika 10.13. Treba simulirati stanje temperature fotonaponske ćelije tijekom 60 koraka. Jedak korak odgovara vremenu od 4 min. Duljina trajanja jednog koraka je dovoljna da se proces prijnosa topline može smatrati stacionarnim. Ozračenje plohe modula, temperatura okoline i brzina vjetra dani su na slici..

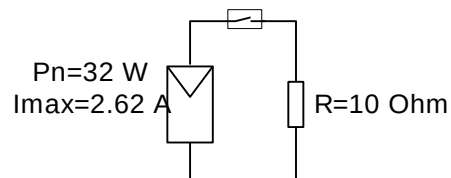


Slika 10.13 Stanje okoline za vrijeme trajanja procesa.

U svakom koraku se računa stacionarna vrijednost struje prema izrazu (5.98) Pritom se iterativno računa električna snaga trošila na temelju empirijskog modela fotonaponskog modula. Usporedo računa se temperatura preko empirijskog izraza (5.100).Oba rezultata prikazana su na slici 10.14. Modul je postavljen tako da se hlađenje odvija s obje strane modula.



Slika 10.14 Rezultat simulacije.



Slika 10.15 El. shema sustava.

10.10 Veza elektromotorne sile galvanskog elementa i promjene standardne Gibbsove energije

Kao što je poznato iz termodinamike svaka kemijska tvar pa tako i sustav ima određenu količinu energije koja se naziva *unutrašnja energija* U koja je funkcija stanja. Kod kemijskih procesa sa nepromjenljivim volumenom (nema mogućnosti pomaka granica sustava tj. $\text{rad} = 0$) razmjenjena količina topline jednaka je upravo razlici unutrašnje energije sustava. Međutim ako se osigura stalan tlak što je kod većine kemijskih reakcija i slučaj, onda zbog promjene volumena promatrani sustav izmjenjuje nekakav rad s okolinom. Pri tom se izmjeni izvjesna količina topline. Ova količina topline pri stalnom tlaku jednaka je:

$$Q_{p=\text{const}} = \Delta U + p\Delta V. \quad (10.39)$$

i naziva se promjena entalpije ili sadržaj topline sustva. Svaki sustav pored unutrašnje energije ima i nekakvu *entalpiju* H .

Energija kemijskog sustava se u određenim uvjetima može pretvoriti u rad (u eksplozivnim motorima, u galvanskim člancima ...). Dio energije koji se može maksimalno pretvoriti u rad naziva se slobodnom energijom kemijske reakcije tj Gibbsovom energijom. Uvođenjem pojma entropije kao funkcije stanja koja karakterizira sreenost nekog sustava, Gibbsova energija se može izraziti kao:

$$G = H - TS. \quad (10.40)$$

Promjena Gibbsove energije tijekom kemijske reakcije pokazuje koliki se maksimalni rad može očekivati iz tog procesa. Može se pokazati [lit. 26] da promjena entropije zbog promjene aktiviteta (koncentracije) kemijskog elementa ovisi upravo o omjeru aktiviteta. S druge strane promjena entalpije idealnih otopina ne ovisi o aktivitetu, to znači da je promjena Gibbsove energije kao i kod entropije ovisna o promjeni aktiviteta. Ovaj zakon se može izraziti kao:

$$G - G^0 = RT \ln(a). \quad (10.41)$$

Pri čemu je	G^0	standardna molarna Gibbsova energija tvari ($a=1$),
	T	temperatura,
	R	plinska konstanta,
	a	aktivitet tvari.

U kemijskoj reakciji obično sudjeluje više tvari. Ako je kemijska reakcija u ravnoteži, ona se može prikazati reakcijom:



gdje su m , n , p i q količine molova reaktanata A , B , C i D . Konačno slobodna energija reverzibilne kemijske reakcije glasi:

$$\Delta_r G - \Delta_r G^0 = RT \ln(K) , \quad (10.43)$$

pri čemu je

$\Delta_r G$ promjena Gibbsove energije tijekom reakcije $G_C + G_D - (G_A + G_B)$,
 K konstanta kemijske ravnoteže koja se za kemijsku reakciju (10.42) iznosi:

$$K = \frac{a_C^p a_D^q}{a_A^m a_B^n} , \quad (10.44)$$

gdje su a_A , a_B , a_C i a_D , aktiviteti reaktanata A , B , C i D .

Reakcija je dostigla ravnotežu kada *nema više* promjene Gibbsove energije. U tom slučaju vrijedi da je standardna molarna promjena Gibbsove energije a ujedno i najveća količina rada koja se može dobiti iz kemijske reakcije (10.42):

$$\Delta_r G^0 = -RT \ln(K) . \quad (10.45)$$

Primjena na galvanski članak: Kako je definirano u poglavlju 6. galvanski element sastoji se od dvije elektrode i elektrolita. Svaka elektroda zajedno sa otopinom elektrolita čina jedan redoks sustav. Naime na svakoj elektrodi odvijaju se reakcije redukcije i reakcije oksidacije koje su u dinamičkoj ravnoteži. Elektroda sa manjim elektrodnim potencijalom (*ANODA*) ima veću tendenciju stavljanja elektrona na raspolaganje od elektrode sa većim elektrodnim potencijalom (*KATODA*). Tako se na anodi odvija proces oksidacije:



a na katodi proces redukcije:



Ako se anoda i katoda spoje vodljivom žicom poteći će električna struje odnosno doći će do prelaska elektrodna sa anode na katodu i tako će se osigurati tijek reakcije. Ako je u otopini reagirao jedan mol tvari, i pri tom se u galvanskom članku sa anode oslobodi a na katodi veže z elektrona, onda to odgovara ukupnom molarnom naboju zF . pri čemu je F *Faradayeva konstanta*, $F=96,48456 \text{ kC/mol}$. U tom slučaju, ako je E^0 standardna elektromotorna sila dotičnog galvanskog članka, onda je promjena standardne Gibbsove energije jednaka (rad električnog naboja):

$$\Delta_r G^0 = -zFE^0 , \quad (10.48)$$

odnosno:

$$E^0 = \frac{RT}{zF} \ln(K^0) = \frac{0.059}{z} \ln(K^0) . \quad (10.49)$$

Standardni elektrodni potencijal je određen za gotovo sve moguće redoks sustave i odnosi se na elektrodni potencijal pri standardnim uvjetima temperature, tlaka i aktiviteta =1. Pri drugim uvjetima reakcije, elektrodni potencijal se mijenja i iznosi:

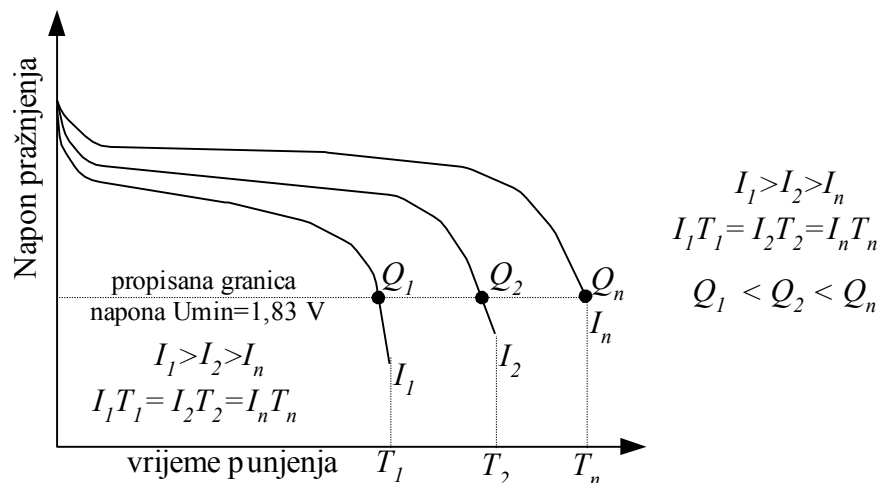
$$E = E^0 + \frac{RT}{zF} \ln \left(\frac{a[M_1]a[M_2^{z+}]}{a[M_2]a[M_1^{z+}]} \right) \quad (10.50)$$

pri čemu je $a[M]$ aktivitet materijala. Aktivitet je bezdimenzionalna veličina i jednaka je koncentraciji izraženoj u mol/dm³ za idealne otopine. Inače je manja od koncentracije zbog međudjelovanja iona. Samo za idealne otopine vrijedi da je **aktivitet=koncentraciji** [lit. 26].

10.11 Dijagrami punjenja i pražnjenja olovnog akumulatora

Kapacitet olovnog akumulatora definira se kao količina naboja izraženu u Ah koje akumulator može dati pri konstantnoj struji. Kapacitet se definira uz zadano vrijeme pražnjenja. Na slici (10.19) prikazan je napon pražnjenja "idealnog" olovnog akumulatora konstantnom strujom. S tim u vezi definira se minimalni napon pražnjenja:

Minimalni napon pražnjenja U_{min} je onaj napon akumulatorske baterije pri kojemu se uz zadanu struju pražnjenja trošilo preda nazivni kapacitet.



Slika 10.16 Krivulja pražnjenja konstantnom strujom

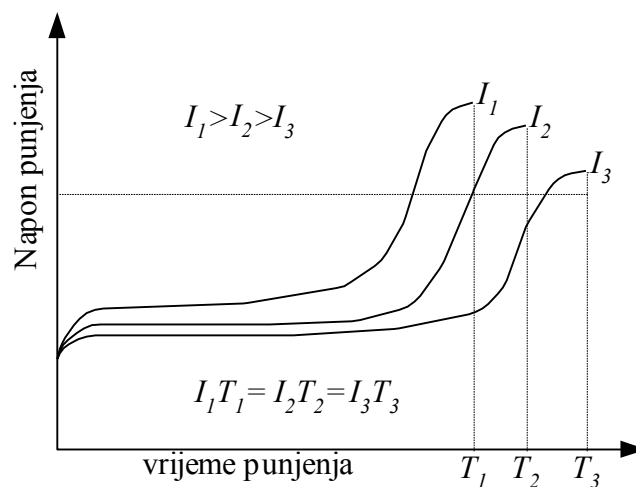
Međutim u stvarnosti veća struja pražnjenja predaje manje naboja od manje struje. S druge strane preveliki pad napona nepoželjan je u električnim krugovima istosmjerne struje. Stoga se propisom definira krajni napon pražnjenja $U_k = U_{min}(I = I_n)$ pri kojemu treba prekinuti pražnjenje. Struja I_n je nazivna struja pražnjenja akumulatora. Vrijednost tog napona kreće se od 1,75 V do 1,83 V po ćeliji. Na slici 10.16 se vidi da kod pražnjenja većom strujom,

pravac $U=U_k$ presijeca krivulje pražnjenja strujama većim od nazivne dalje od potpunog ispražnjenja $Q(I) < Q(I_n)$ pri $I > I_n$. Iz toga se vidi utjecaj struje pražnjenja na konačni kapacitet akumulatora.

Prilikom punjenja utjecaj struje punjenja nešto je drugačiji. Veća struja punjenja znači kraće vrijeme punjenja, veći maksimalni napon punjenja i veću količinu naboja (amper sati predanih akumulatoru) odnosno manju djelotvornost.

Maksimalni napon punjenja U_{max} je onaj napon akumulatorske baterije pri kojemu je sav aktivni materijal regeneriran odnosno sav olovni sulfat pretvoren je u olovo. Pri tom gustoća elektrolita ima maksimalnu vrijednost. Maksimalni napon se povećava s strujom punjenja.

Paralelno s punjenjem događa se isplinjavanje vodika i kisika, čime se u nekim izvedbama nepovratno gubi voda a dio električne energije se troši na elektrolizu. Utvrđeno je da pri naponu od 2,4 V po ćeliji proces elektrolize postaje značajniji odnosno počinje isplinjavanje. Stoga se upravo taj napon često uzima kao prekretna vrijednost napona punjenja. Također, u praksi, vizualnim opažanjem isplinjivanja utvrđujemo stanje potpune napunjenosti akumulatora.



Slika 10.17 Krivulja punjenja konstantnom strujom

Na slici 10.17 se vidi da napon isplinjavanja različito zahvaća krivulje punjenja za različite vrijednosti struja. Da se izbjegne isplinjavanje, punjenje bi trebalo obavljati malom strujom, na račun vremena punjenja. S druge strane brzo punjenje neminovno izaziva velike gubitke. Odmjerenim algoritmom punjenja, mogu se ovi nedostaci svesti na minimalnu vrijednost. Najveći dozvoljeni napon punjenja bez obzira na isplinjavanje iznosi 2,75 V/ćeliji.

10.12 Polarizacija na faznoj granici između elektrolita i elektrode

U poglavlju 6. fenomenološki je opisan proces nastajanja elektrodnog potencijala. Ovdje će šire biti objašnjen fenomen polarizacije odnosno prenapon koji se važan za razumjevanje strujno naponskih odnosa tijekom punjenja i pražnjenja akumulatorskih baterija. Prenapon je pojava promjene elektrodnog potencijala uslijed protjecanja struje kroz akumulator. Postoje dvije vrste prenapona; **aktivacijski i koncentracijski prenapon**. Pored spomenutih uzroka promjene napona na elektrokemijskom sustavu, postoje i drugi mehanizmi kao što su: omski prenapon i difuzijski potencijal, no o njima neće ovdje biti govora.

10.12.1 Aktivacijski prenapon

Ako se elektrode (prva, druga ili redoks elektroda) urone u otopinu elektrolita, zbog razlike između kemijskih potencijala, dolazi do protoka elektrona dok se kemijski potencijali ne izjednače. Pokretačka sila protoka elektrona je razlika kemijskih potencijala elektrona na rubu faznog prijelaza između elektrode i otopine (odnosno razlike u koncentraciji). Kao posljedica ove struje (slično difuznim strujama preko *pn* spoja) dolazi do stvaranja električnog polja koje se suprostavlja daljnjem protoku elektrona, tj uspostavlja se potencijalni skok. Struja elektronacije (prijelaz elektrona iz metala u otopinu) odnosno struja deelektronacije (struja u suprotnom smjeru) proporcionalna je koncentraciji donorskih iona (oni metalni atomi koji otpuštaju elektrone i predaju ih elektrolitu) odnosno koncentraciji akceptora elektrona (ioni u elektrolitu koji reduciraju) pomnoženoj s udjelom elektrona koji imaju sposobnost migracije (oni čija je energija veća od energetske barijere ili mogu kroz nju tunelirati). S obzirom na Boltzmanovu raspodijelu [lit.33] a bez poticaja vanjskog električnog polja struja elektronacije j_e i struja deelektronacije j_d dani su izrazima:

$$\begin{aligned} j_e &= \frac{kT}{h} F c_A \exp\left(-\frac{\Delta G_e}{RT}\right) \\ j_d &= \frac{kT}{h} F c_D \exp\left(-\frac{\Delta G_d}{RT}\right) \end{aligned} \quad (10.51)$$

Pri čemu je:

- | | |
|--------------|---|
| F | faradejeva konstanta = količina naboja u jednom molu tvari. |
| c_A | koncentracija akceptorska (ioni u otopini). |
| c_D | koncentracija donorskih (atomi metala u elektrodi). |
| ΔG_e | promjena Gibbsove energije u procesu elektronacije odnosno energija koja se treba dovesti elektronima u metalu da bi preskočili energetske barijeru i prešli u elektrolit). |
| ΔG_d | promjena Gibbsove energije u procesu deelektronacije odnosno energija koja se treba dovesti elektronima u elektrolitu da bi preskočili energetske barijeru i prešli u metal). |

Zbog nastanka elektrodnog potencijala električno polje usporava prijelaz elektrona do zaustavljanja odnosno smanjuje se struja elektronacije a povećava struja deelektronacije (ili obrnuto). Razlog tomu je što električno polje smanjuje(povećava) energetska barijeru za elektrone koji prelaze iz metala u otopinu (za elektrone koji prelaze iz otopine u metal). Uzimajući to u obzir vrijednosti energetskih barijera u ravnotežnom stanju iznose:

$$\Delta G_e(E) = \Delta G_e + \beta FE \quad (10.52)$$

$$\Delta G_d(E) = \Delta G_d - (1 - \beta)FE$$

Gdje je :

- F količina naboja u jednom molu donora
- E elektrodnog potencijal
- β dio energije električnog polja koji povećava energetska barijeru (promjena Gibbsove energije) u procesu elektronacije
- $(1-\beta)$ dio energije električnog polja koji smanjuje energetska barijeru (promjena Gibbsove energije) u procesu deelektronacije.

Stanje ravnoteže je prikazano jednakošću struje elektronacije i struje deelektronacije:

$$j_e(E) = \frac{kT}{h} F c_A \exp\left(-\frac{\Delta G_e + \beta FE}{RT}\right) = j_d(E) = \frac{kT}{h} F c_D \exp\left(-\frac{\Delta G_d - (1 - \beta)FE}{RT}\right) = j_0 \quad (10.53)$$

Struja j_0 se naziva **struja izmjene**. Intenzitet struja ovise o elektrodnom potencijalu i inicijalnim vrijednostima energetskih barijera te o koncentraciji donora odnosno akceptora. Sređivanjem ove jednadžbe dobiva se Nernstova jednadžba za elektrodnog potencijal. Posebna vrijednost elektrodnog potencijala dobiva se ako su koncentracije donora jednake, ta se ravnoteža proglašava standardnom a elektrodnog potencijal *standardnim ravnotežnim elektrodnim potencijalom*. Važno je reći da se apsolutna vrijednost elektrodnog potencijal nemože mjeriti nego se određuje njena relativna vrijednost prema standardom odabranoj elektrodi.

Uvrštavanjem $c_D = c_A$ dobiva se: $E^0 = -\frac{\Delta G_e - \Delta G_d}{F}$ ¹⁷. Ako se u reakciji jednog mola donora

izmjeni z elektrona i uzimajući da je $\Delta G_e - \Delta G_d$ totalna promjena Gibbsove energije odnosno ukupna energetska barijera za prijenos naboja u reakciji $A^{z+} + ze \rightarrow D$ dobiva se izraz za standardni elektrodnog potencijal jedne elektrode. Uspoređujući s izrazom (10.48) ukupna promjena Gibbsove energije jednaka je razlici $\Delta G_r = (\Delta G_e - \Delta G_d)_{katoda} - (\Delta G_e - \Delta G_d)_{anoda}$.

Razlika elektrodnih potencijala katode i anode naziva se elektromotorna sila galvanskog elementa. Spoji li se anoda posredstvom vodiča s katodom, poteći će električna struja. Ona teče dok sav aktivan akceptor ne izreagira (ovisno o kapacitetu). Protjecanjem struje kroz bilo koju od elektroda narušena je **ravnoteža struje elektronacije i deelektronacije**. Dakle struja kroz elektrodu (za svaku posebno) dana je izrazom

$$j = j_d - j_e \quad (10.54)$$

¹⁷ Vrijednost standardnog elektrodnog potencijala određuje se mjerenjem i nemože se odrediti "računski" za razliku od relativne promjene elektrodnog potencijala

S obzirom da struje elektronacije i deelektronacije jedino moguće mjenjati promjenom elektrodnog potencijala može se reći da je kod protjecanja električne struje kroz elektrodu došlo do promjene elektrodnog potencijala za neku vrijednost η . Dakle vrijedi:

$$j = \frac{kT}{h} F c_A \exp\left(-\frac{\Delta G_e - (1-\beta)F(E+\eta)}{RT}\right) - \frac{kT}{h} F c_D \exp\left(-\frac{\Delta G_d + \beta F(E+\eta)}{RT}\right) \quad (10.55)$$

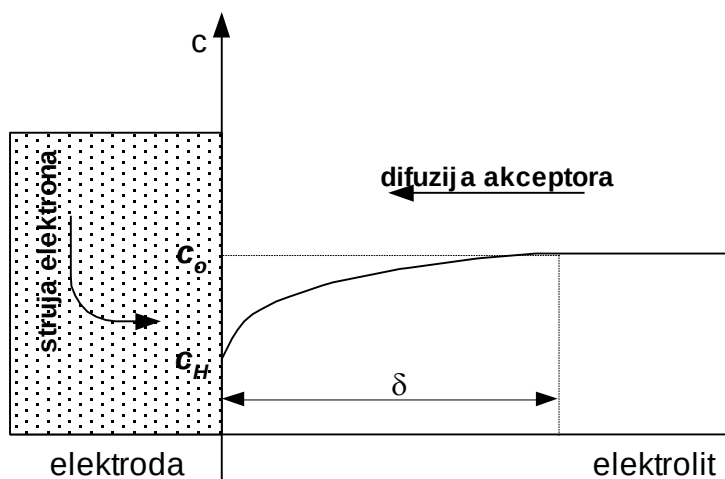
Kombiniranjem izraza (10.55) i (10.53) dobiva se Butler-Volmerova jednadžba:

$$j = j_0 \left[\exp\left(\frac{(1-\beta)F\eta}{RT}\right) - \exp\left(\frac{\beta F\eta}{RT}\right) \right] \quad (10.56)$$

Prema tome aktivacijski prenapon η je vanjski potencijal koji treba dodati postojećem elektrodnom potencijalu da bi potekla struja kroz elektrodu tj da bi se proces prijenosa naboja aktivirao.

10.12.2 Koncentracijski prenapon

Proces pretvorbe kemijske energije u električnu odnosno elektrokemijski proces odvija se uza samu granicu između elektrode i elektrolita. Kroz elektrodu, električnu energiju vode elektroni a kroz elektrolit ioni. Dakle ioni moraju iz unutrašnjosti difundirati na tzv. *Helmholtzovu plohu* gdje se fizički odvija proces redukcije odnosno oksidacije [lit 33]. Ako brzina pristizanja iona (donori ili akceptori) iz unutrašnjosti nije dovoljna s obzirom na jakost struje vanjskog kruga, doći će do smanjenja koncentracije iona na Helmholtzovoj ravni. Jednostavno više iona nestaje (reducira se elektronima) nego što pridolazi difuzijom. U tom slučaju Nernstova jednadžba mijenja oblik, pa umjesto koncentracije središnjeg elektrolita treba uzeti koncentraciju koja uistinu vlada na Helmholtzovoj površini, slika 10.18.



Slika 10.18 Koncentracijski prenapon

Razlika elektrodnih potencijala računatih s c_0 i s c_H je zapravo razlika elektrodnih potencijala bez protjecanja struje i kada ona postoji. Ova razlika potencijala naziva se koncentracijski prenapon:

$$\eta_c = \frac{RT}{zF} \ln \left(\frac{c_H}{c_0} \right) \quad (10.57)$$

S druge strane uslijed gradijenta koncentracije iona, postoji izvjestan tok iona koji odgovara toku struje kroz vanjski krug. Veza između toka iona i gustoće električne struje može se predstaviti sljedećim izrazom (jednodimenzionalno pojednostavljenje):

$$j = -zFD \frac{dc}{dx} \quad (10.58)$$

U blizini Helholtzovog sloja može se uzeti da je promjena koncentracije iona linearna, u tom slučaju dobiva se jednostavan izraz za struju elektrode u alučaju kada je migracija iona posljedica difuzije¹⁸.

$$j = -zFD \frac{c_0 - c_H}{\delta} \quad (10.59)$$

Pri čemu je δ Nernstov difuzijski sloj i ima fizikalno značenje dijela prostora gdje od Helmholtzovog sloja koncentracija iona postaje jednaka ravnotežnoj koncentraciji iona c_0 .

Posljednja jednadžba prikazuje vezu između gustoće struje i granične koncentracije donora odnosno akceptora. Prema tom u izrazu za dovoljno veliku struju, tzv. graničnu vrijednost struje elektrode j_{gr} , koncentracija iona na Helholtzovoj ravnini pada na nulu. Ta granična vrijednost struje iznosi:

$$j_{gr} = \frac{zFDc_0}{\delta} \quad (10.60)$$

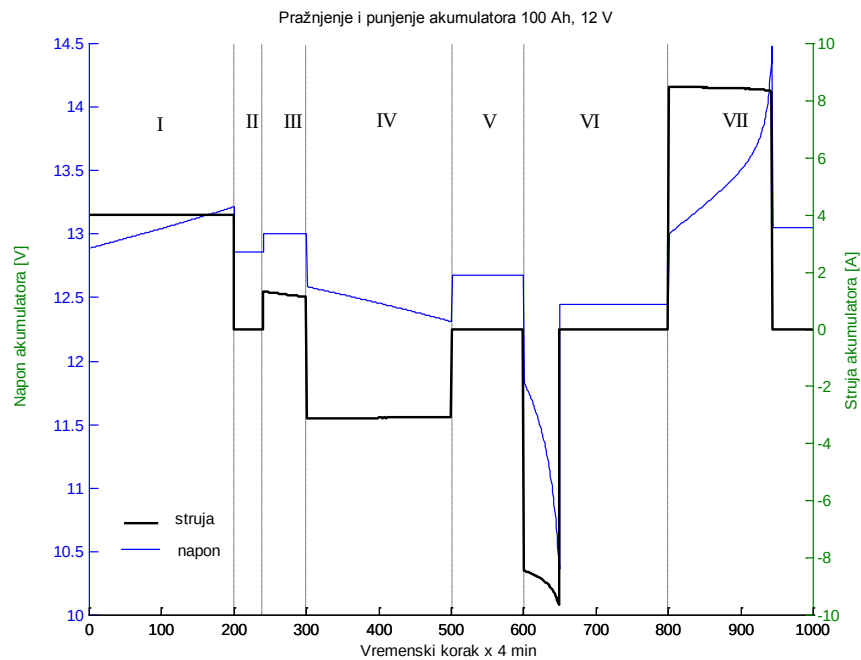
Kombinirajući izraze (10.57), (10.59) i (10.60).

$$\eta_c = \frac{RT}{zF} \ln \left(1 - \frac{j}{j_{gr}} \right) \quad (10.61)$$

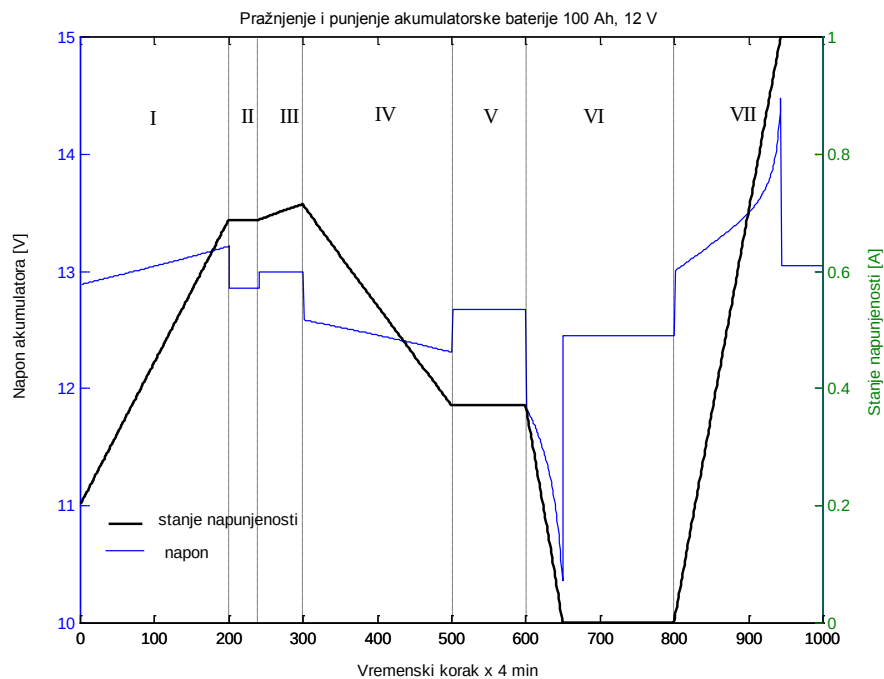
S obzirom da je izraz pod logaritmom uvijek manji od 1, koncentracijski prenapon je uvijek manji od nule.

¹⁸ Ioni akceptora odnosno donora mogu migrirati i konvekcijom elektrolita.

10.13 Rezultat simulacije modela akumulatorske baterije



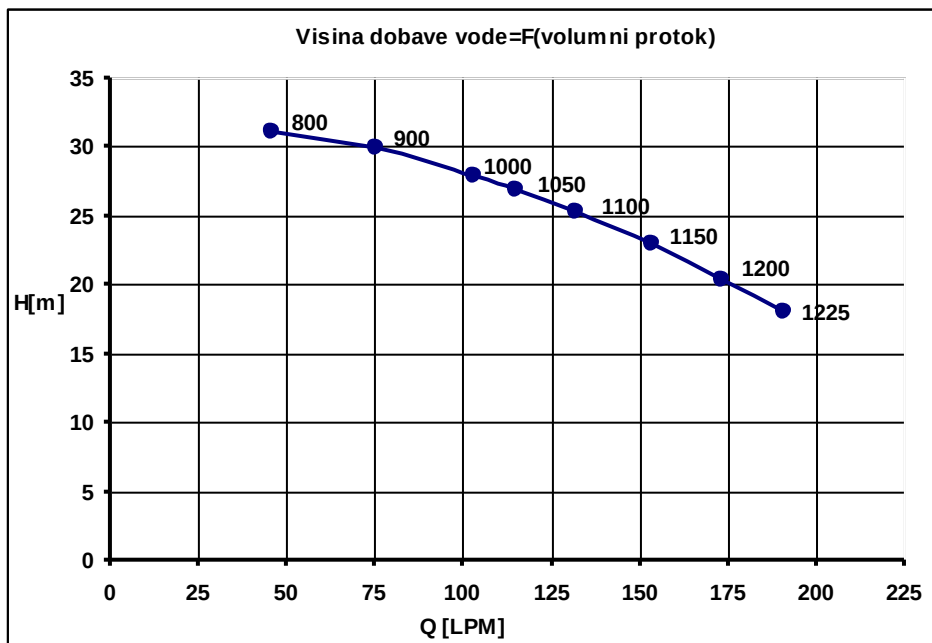
Slika 10.19 Napon akumulatora i stanje napunjenosti



Slika 10.20 Napon akumulatora i stanje napunjenosti

10.14 Primjer strujno naponske karakteristike pumpnog postrojenja

Tip pumpe: Dankof Solar centrifugalna pumpa 7340-36PV,
 Tip motora: Istosmjerni motor s nezavisnom uzbudom.
 Pumpno postrojenje: Pumpanje vode na visinu od 20 m,
 Promjer cijevi: 1,5 Zoll (38,1 mm),
 kinematička viskoznost 1,4 mm²/s,
 apsolutna hrapavost 0,01 mm.



Slika 10.21 QH karakteristika centrifugalne pumpe Dankof Solar 7340-36PV

Hidromehanička karakteristika pumpnog postrojenja predstavljena je funkcijonalnom ovisnošću hidromehaničkog tlaka izraženog u jedinici visine i protoka kroz cjevovod. Pad tlaka počevši od izvora čini, hidrostatički tlak i pad tlaka zbog trenja i zbog lokalnih gubitaka (ventili, prigušnice, koljena itd...). U ovom slučaju karakteristika postrojenja sukladno s (7.3) glasi:

$$H_{pp} = 20 + 3,53 \cdot 10^{-4} Q^2 \quad (10.62)$$

Hidromehanička karakteristika pumpe prikazana je također Q-H dijagramom, pri čemu se visina H naziva dobavna visina a Q je protok. Proizvođač pumpe koja se ovdje razmatra daje Q-H dijagram. Za pojedine vrijednosti protoka, daje se također električna snaga koja treba dovesti na stezaljke pumpe da bi se pri određenoj brzini ostvarila dobavna visina H uz protok Q. Polinomnom interpolacijom a sukladno s (7.3) dobivaju se jednadžbe koje karakteriziraju rad centrifugalne pumpe.

$$H_p = 32m^2 - 0,0001mQ - 4 \cdot 10^{-4} Q^2 \quad (10.63)$$

Radna točka postrojenja se dobiva iz uvjeta $H_{pp} = H_p$. Ovaj izraz daje funkcijsku zavisnost protoka o relativnoj brzini m^{19} .

$$Q^2 + 0,133mQ + 42496,68(0,625 - m^2) = 0 \quad (10.64)$$

Posljednji član u gornjem izrazu opisuje važno svojstvo pumpnih postrojenja: postoji određena minimalna brzina vrtnje centrifugalne pumpe pri kojoj se događa pumpanje, pri nižoj brzini pumpa razvija nedovoljnu velik moment da savlada protumoment vodenog stupca. Ovo svojstvo značajno definira način reguliranja pumpnih postrojenja. U ovom slučaju minimalna relativna brzina iznosi;

$$m_s = 0,790569 \quad (10.65)$$

Variranjem brzine od minimalne m_s do $m=2,5$ (250% nazivne brzine) u određenim koracima i rješavanjem kvadratne jednadžbe (10.64) dobiva se niz uređenih parova (m, Q) koji odgovarajućom interpolacijom daju funkciju $Q=Q(m)$. Odnosno ovisnost protoka kroz pumpno postrojenje u zavisnosti o relativnoj brzini:

$$Q = 93,8(m - m_s) + 232,6\sqrt{m - m_s} \quad (10.66)$$

Kao što je već u uvodu ovog poglavlja rečeno, proizvođač pumpi osim Q-H dijagrama pumpi daje niz vrijednosti električne snage pumpe za postizanje određenog protoka pri nazivnoj brzini i nazivnom naponu od 36 V. Dio te električne snage otpada na zagrijavnja otpora armature a dio na mehaničku energiju koja je odgovorna za moment na osovini motora. Prema tome moment motora pri nazivnoj brzini se može izračunati prema sljedećem izrazu:

$$M(Q) = \frac{P_{el}(Q) - I_a^2 R_a}{\omega_n} = 9,55 \frac{P_{el}(Q) - \left(\frac{P_{el}(Q)}{U_n} \right)^2 R_a}{n_n} \quad (10.67)$$

Iako nije vidljivo iz dostupnih podataka može se za demonstraciju uzeti da je nazivna brzina vrtnje $n_n=1000 \text{ okr/min}$ i vrijednost unutrašnjeg otpora armature $R_a=0,2 \Omega$. Uvrštavanjem ovih vrijednosti i računanjem momenta za različite vrijednosti protoka od $Q=0$ do $Q=250 \text{ l/min}$ dobiva se momentna karakteristika u ovisnosti o protoku kroz pumpu a u skladu s izrazom (7.4).

$$M_m(Q, m) = 5,186m^2 + 0,0352Qm - 7 \cdot 10^{-5} Q^2 \quad (10.68)$$

Gornji izraz predstavlja moment kojeg elektromotor osjeća na rotoru kada je cijelo postrojenje neposredno spojeno a njime protječe protok Q i rotor se vrti relativnom brzinom m . Uvrštavanjem u izraz za minimalnu radnu točku ($Q=0, m=m_s$) dobija se vrijednost potrebnog poteznog momenta od $M_p=3,24 \text{ Nm}$ za pokretanje sustava. Uvrštavanjem protoka u

¹⁹ Za razliku od izraza (7.3), u gornjem izrazu koristi se relativna brzina $m=\omega/\omega_n = n/n_n$.

zavisnosti o relativnoj brzini iz izraza (10.66) u izraz za moment $M_m(Q, m)$, napokon se dobiva momentna jednadžba cjelokupnog pumpnog sustava.

$$M_m(x) = 7,87x^2 + 5,135x\sqrt{x} + 7,02x + 6,47\sqrt{x} + 3,24 \quad (10.69)$$

$$x = m - m_s$$

Nazivni protok je ona vrijednost protoka pri kojoj je djelotvornost pumpe najveća. Hidraulička snaga pumpanja je snaga koju treba primijeniti na fluid da ostvaruje protok Q s određenom dobavnom visinom H . Analizom dostupnih podataka dobivaju se sljedeći nazivni podaci **Pn=1150 W, Qn=155 l/min, In=32 A**. Korištenjem nazivnih podataka, a uz suglasnost sa izrazom (7.2)²⁰ dobiva se funkcijska zavisnost napona motora o struji uz relativnu brzinu kao parametar:

$$U_a = 29,6m + 0,2I_a \quad (10.70)$$

Također prema izrazu (7.2) dobiva se sljedeća relacija:

$$I_a(x) = 3,54M(x) \quad (10.71)$$

odnosno:

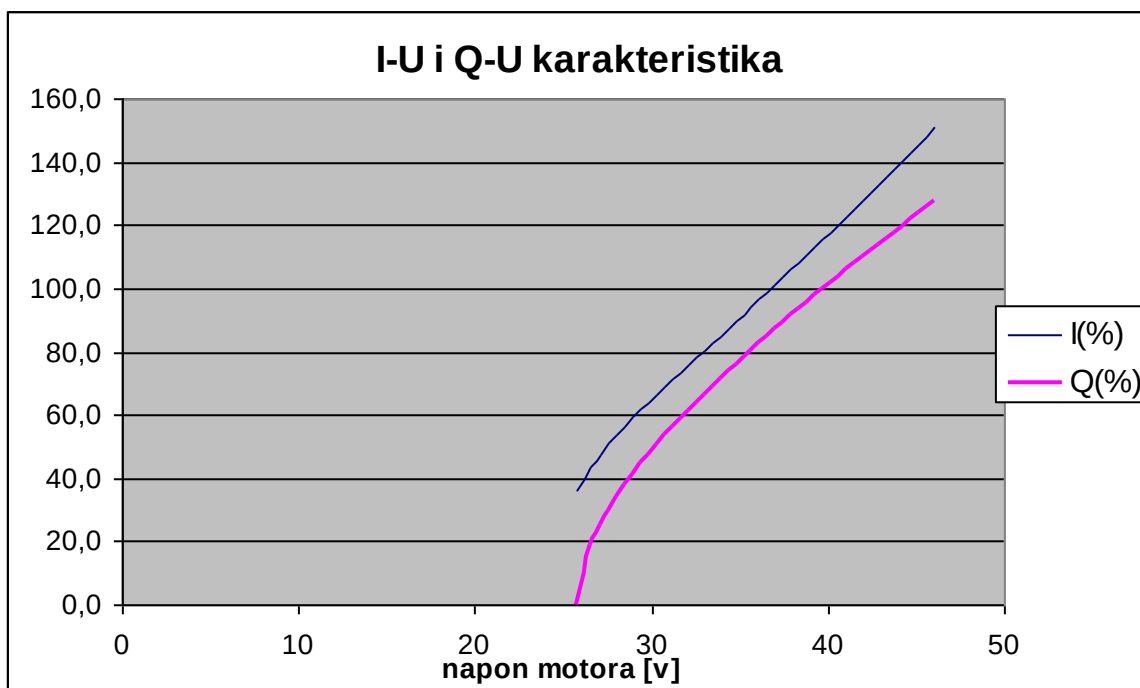
$$U_a(x) = 29,6x + 0,71M(x) + 23,4 \quad (10.72)$$

Izrazi (10.71) i (10.72) predstavljaju parametarski zadanu strujno naponsku karakteristiku pumpnog sustava. Variranjem parametra x od vrijednosti $x=0$ do vrijednosti pri kojoj je struja motora 120% nazivne dobiva se napokon strujno naponska karakteristika motornog pumpnog postrojenja. Pod pumpnim postrojenjem podrazumjeva se motor + pumpa + cjevovod + vodozahvat + spremnik. Dakle fotonaponski sustav osijeća sljedeću strujno naponsku karakteristiku trošila:

$$\boxed{\begin{aligned} I_a &= I_s + 1,51(U - U_s) + 1,23 * \sqrt{(U - U_s)} \\ I_s &= 11,47 A \quad U_s = 25,693 V \end{aligned}} \quad (10.73)$$

Ako je napon manji od U_s , pumpa je zaključena sigurnosnim ventilom koji sprječava protustrujanje, odnosno struja je jedna nuli. Kada napon prijeđe utvrđeni prag, struja motora nakon prestanka tranzijenta, dolazi na vrijednost I_s . Kao što je rečeno, to je potezna struja. Ako izvor nije ustanju dati toliku struju nužno ju je povećati koristeći DC-DC pretvarač. Na slici je prikazana strujno naponska karakteristika pumpe iz ovog primjera. Također je u relativnim jedinicama prikazan i protok kroz pumpni sustav.

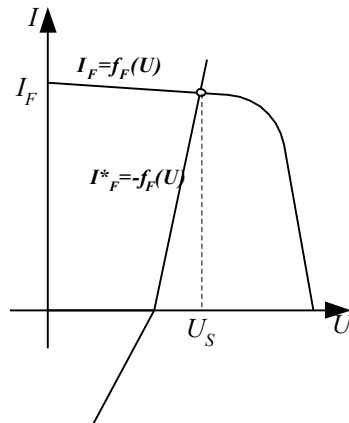
²⁰ U ovom slučaju magnetski tok je konstantan



Slika 10.22 Izlazna karakteristike pumpnog postrojenja

10.15 Algoritmi rada regulatora punjenja i pražnjenja baterije

Tip 1: Akumulatorska baterija + fotonaponski modul

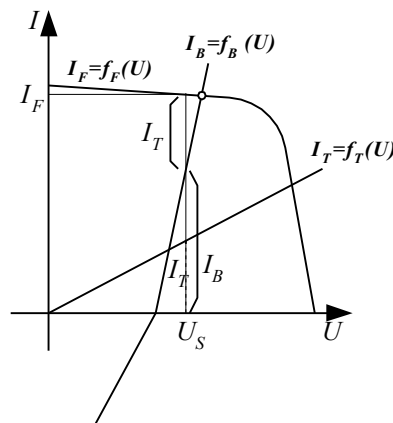


Slika 10.23 Strujno naponske prilike u tipu algoritma 1

Napon sustava se određuje prema slijedećem izrazu:

$$U : f_F(U) = f_B(U) \quad (10.74)$$

Tip 2: Akumulatorska baterija + fotonaponski modul + trošilo

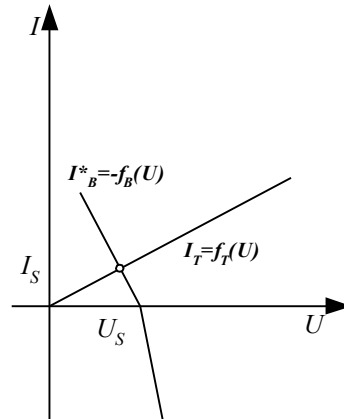


Slika 10.24 Strujno naponske prilike u tipu algoritma 2

Napon sustava se određuje prema slijedećem izrazu:

$$U_S : f_F(U) - f_B(U) - f_T(U) = 0 \quad (10.75)$$

Tip 3: Akumulatorska baterija + trošilo



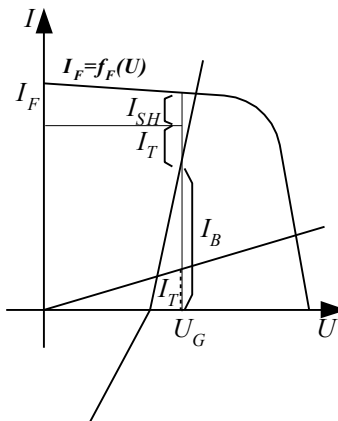
Slika 10.25 Strujno naponske prilike u tipu algoritma 3

Napon sustava se određuje prema slijedećem izrazu:

$$U_S : f_B^*(U) = f_T(U) \quad (10.76)$$

Pri čemu je $f_B^*(U) = -f_B(U)$.

Tip 4: Akumulatorska baterija + fotonaponski modul + trošilo + shunt



Slika 10.26 Strujno naponske prilike u tipu algoritma 4

Napon sustava se određuje prema slijedećim izrazima:

$$U_G = VR \quad (10.77)$$

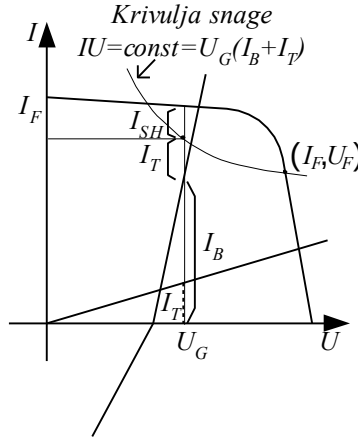
$$I_F = f_F(VR)$$

$$I_B = f_B(VR)$$

$$I_T = f_T(VR)$$

$$I_{SH} = I_F - I_B + I_T$$

Tip 5: Akumulatorska baterija + fotonaponski modul + trošilo + PWM regulacija



Slika 10.27 Strujno naponske prilike u tipu algoritma 5

Napon sustava je konstantan i jednak je U_G . Punjenje ovim naponom traje dok struja punjenja ne padne ispod određene vrijednosti. Struja baterije i struja trošila ovise o naponu U_G , dok se struja i napon modula mogu odrediti prema sljedećem izrazu.

$$U_G = VR$$

$$I_B = f_B(VR)$$

$$I_T = f_T(VR)$$

$$I_{F,\max} = f_F(VR)$$

$$I_{SH} = I_{F,\max} - I_B + I_T$$

$$I_F = f_F(U_F)$$

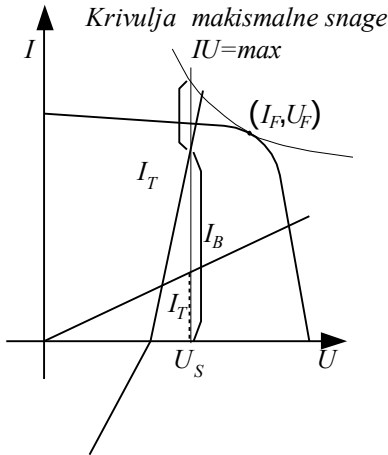
(10.78)

Gdje se struja I_F i U_F nalazi iz sljedeće transcendentne jednažbe.

$$U_F = \frac{U_G [f_B(U_G) + f_T(U_T)]}{\eta f_F(U_F)} \quad (10.79)$$

Tip 6: Akumulatorska baterija + fotonaponski modul + trošilo + PWM regulacija u fazi punjenja sa sniženim naponom U_{eq} . Sve je isto kao u tipu 5 ali umjesto U_G , koristi se niži napon U_{eq} .

Tip 7: Akumulatorska baterija + fotonaponski modul + trošilo + PWM regulacija + MPPT funkcija

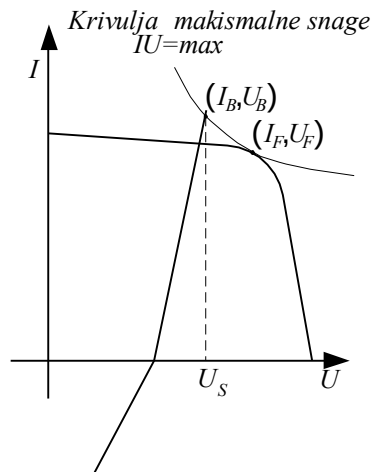


Slika 10.28 Strujno naponske prilike u tipu algoritma 7

Napon sustava U_S može se odrediti iz slijedećih izraza

$$\begin{aligned} I_F &= \frac{P_{\max}}{U_S} \\ I_B &= f_B(U_S) \\ I_T &= f_T(U_S) \\ U_S : I_F - I_B - I_T &= 0 \end{aligned} \quad (10.80)$$

Tip 8: Akumulatorska baterija + fotonaponski modul + PWM regulacija + MPPT funkcija



Slika 10.29 Strujno naponske prilike u tipu algoritma 8

$$I_F = \frac{P_{\max}}{U_S}$$

$$I_B = f_B(U_S)$$

$$U_S : I_F - I_B = 0$$
(10.81)

10.16 Dijagram toka

U ovom poglavlju prikazan je skraćeni dijagram toka simulacijskog programa. Dijagrami opisuju rad na pojedinom sučelju kao i rad glavnog programa. Za razumjevanja dijagrama u njemu su ko rištene slijedeće oznake i simboli:



Blok koji označava početak ili kraj programa



Blok koji označava radnju, funkciju ili proceduru



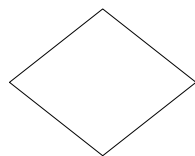
Blok skup procedura ili cjelovit program odnosno podprogram



Blok koji označava spremljene podatke na disk ili organizirane u bazu podataka



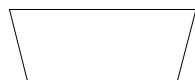
Blok koji označava podatak ili više podataka s kojim se trenutno operira



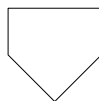
Blok koji označava odluku (grananje programa)



Blok koji označava ispis na sučelje odnosno na monitor



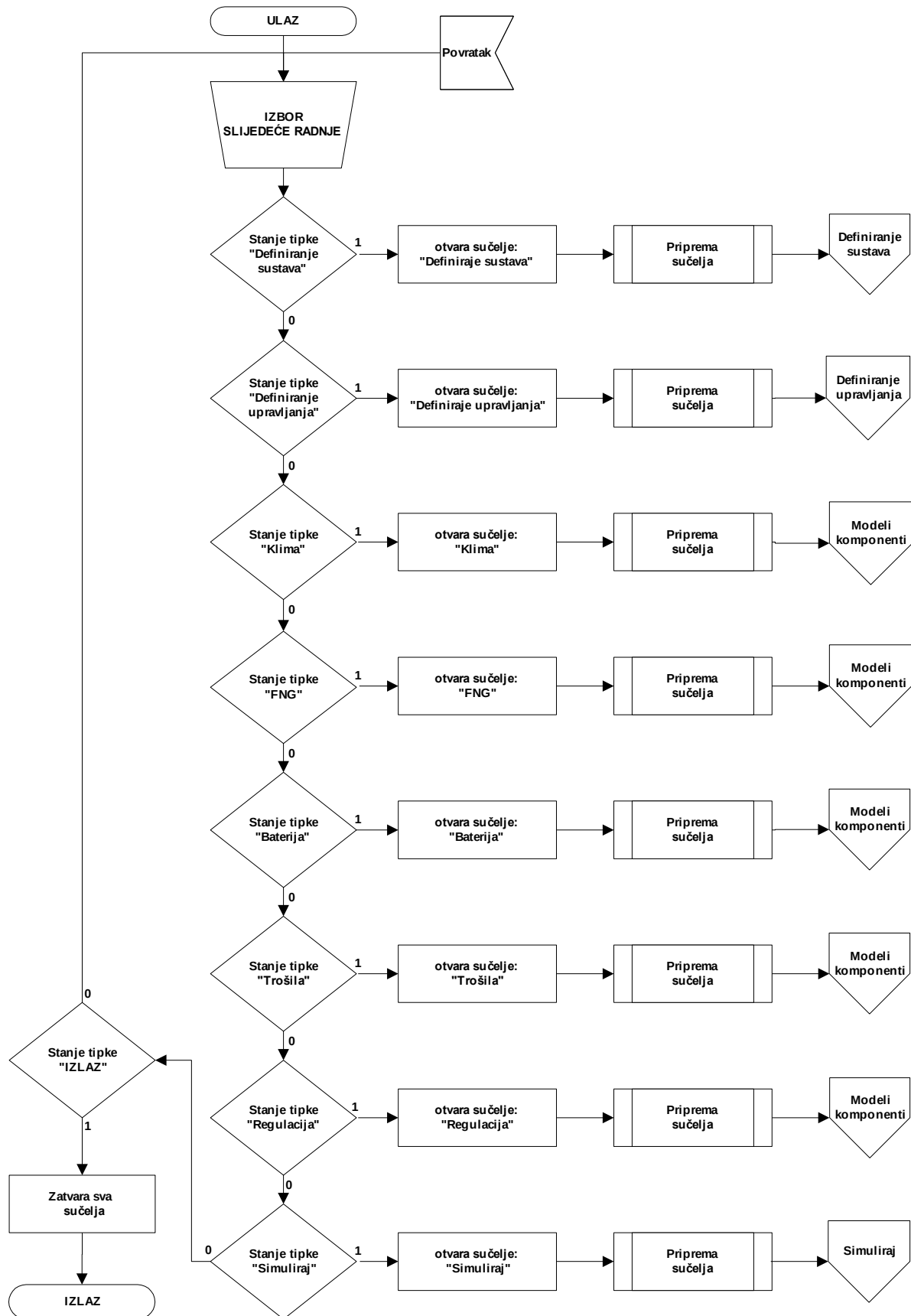
Blok koji označava intervencije korisnika programa (ručni unos podatak)



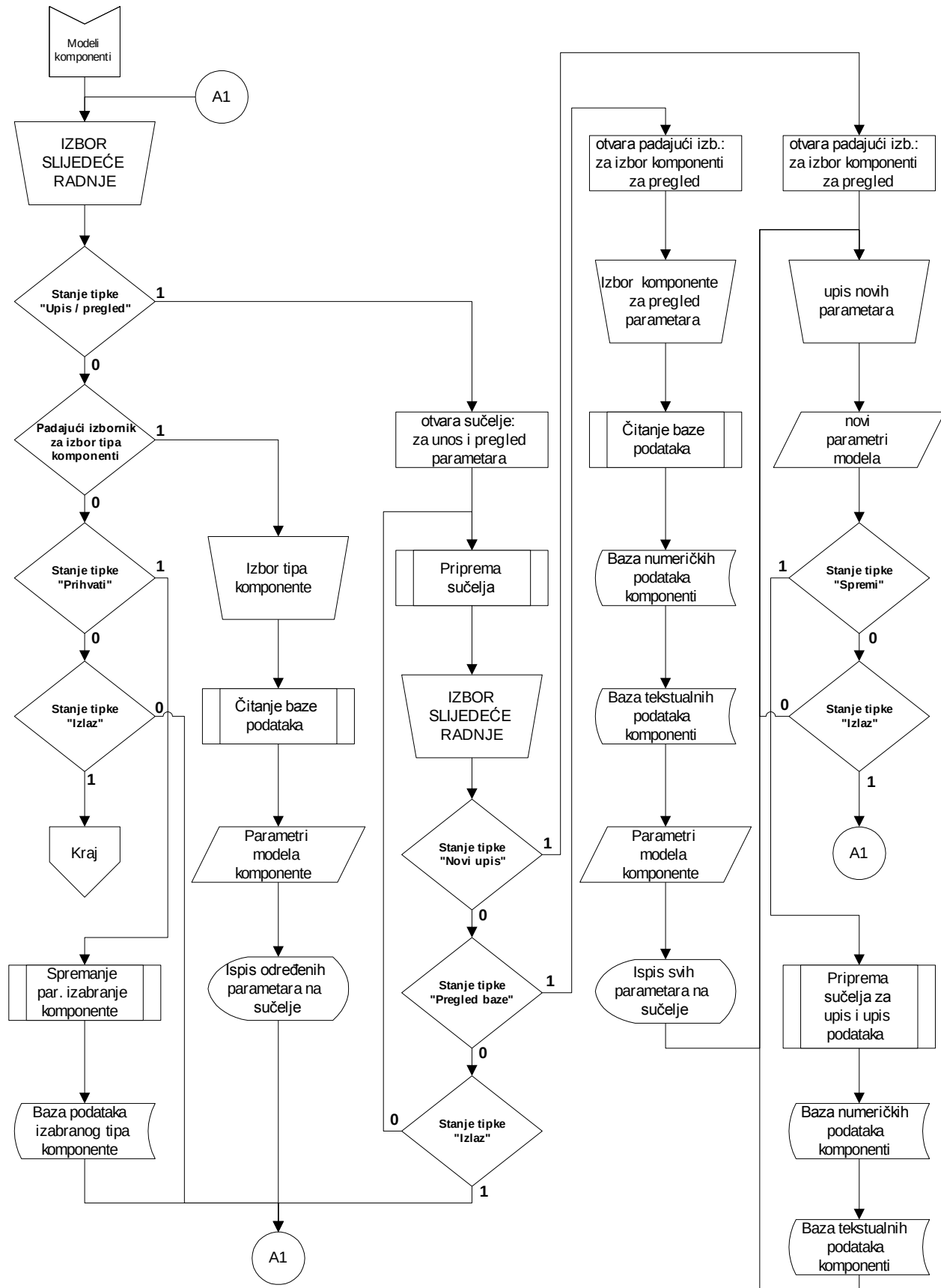
Blok koji označava prekid programa s nastavkom na drugom listu



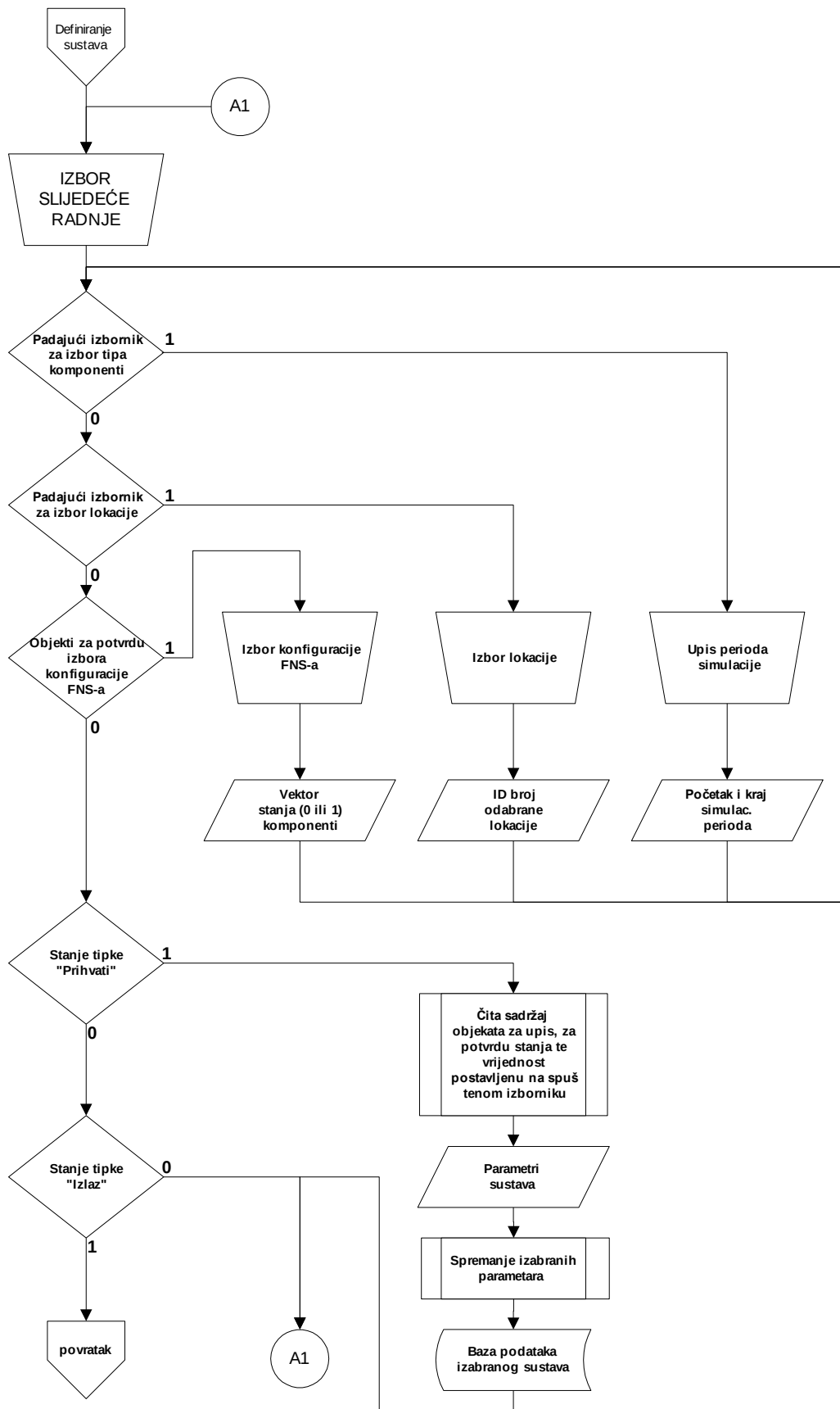
Blok koji označava prekid programa s nastavkom na istom listu



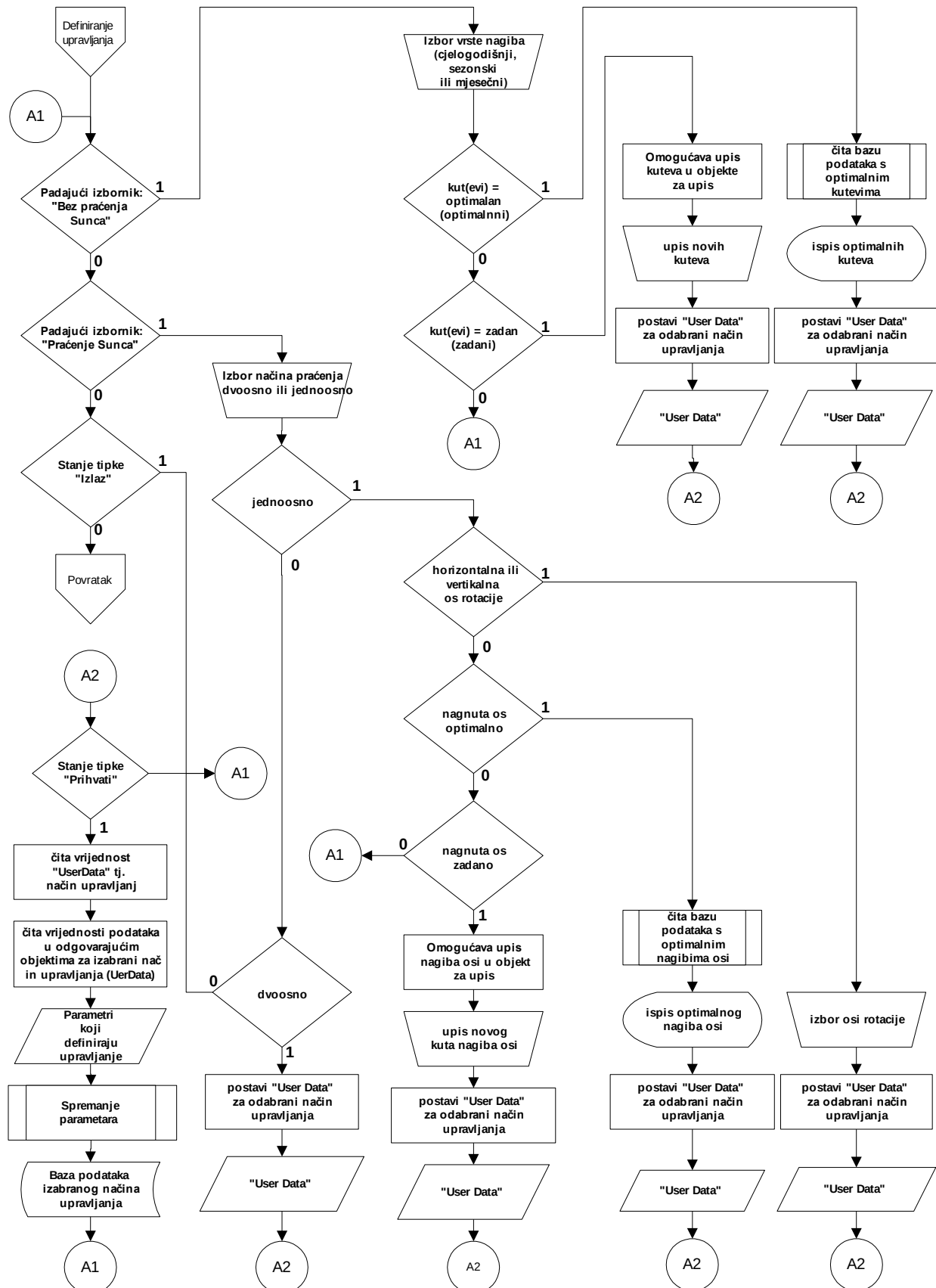
Slika 10.30 Dijagram toga glavnog izbornika



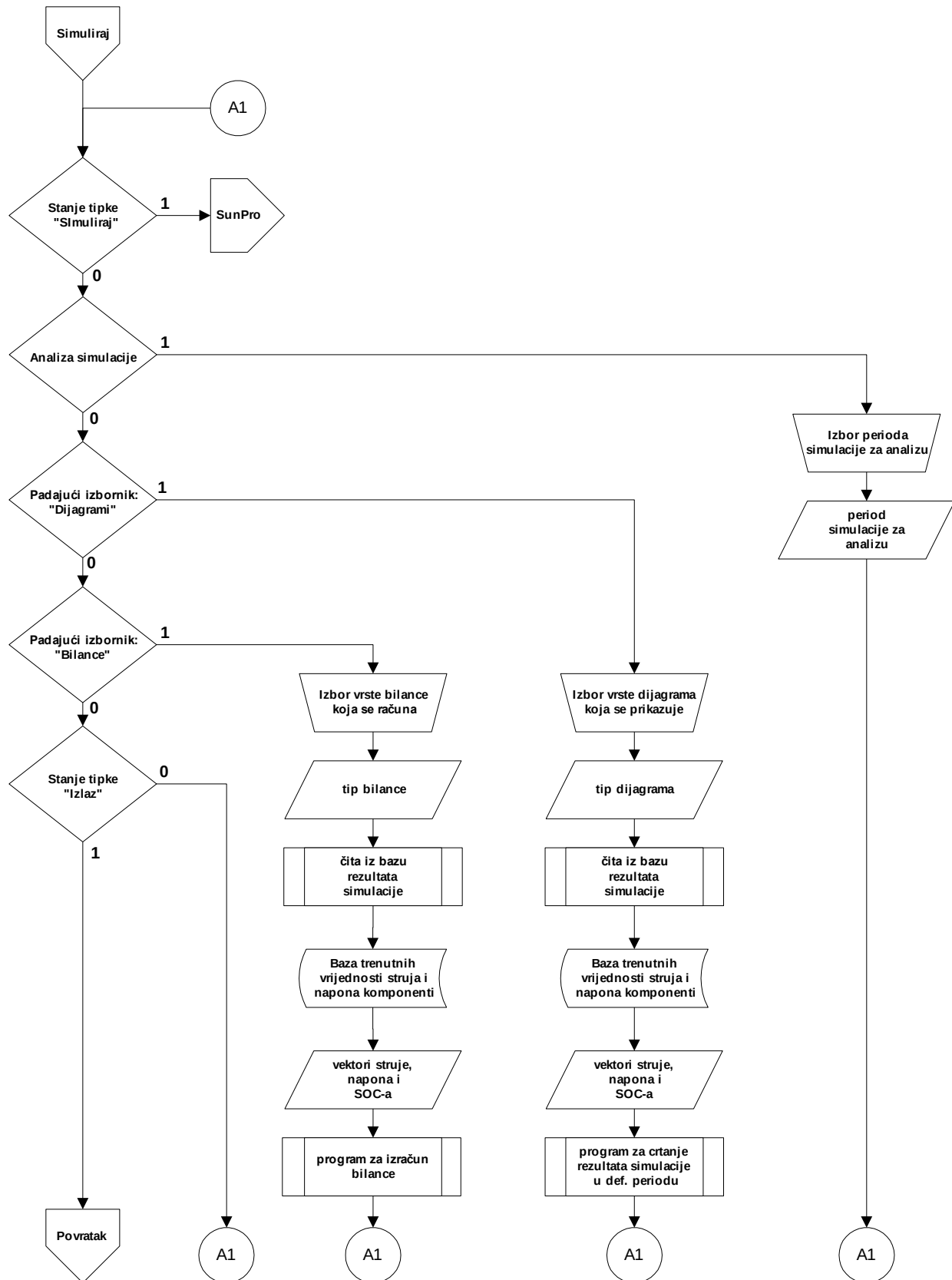
Slika 10.31 Dijagram toka sučelja za unos modela komponenti



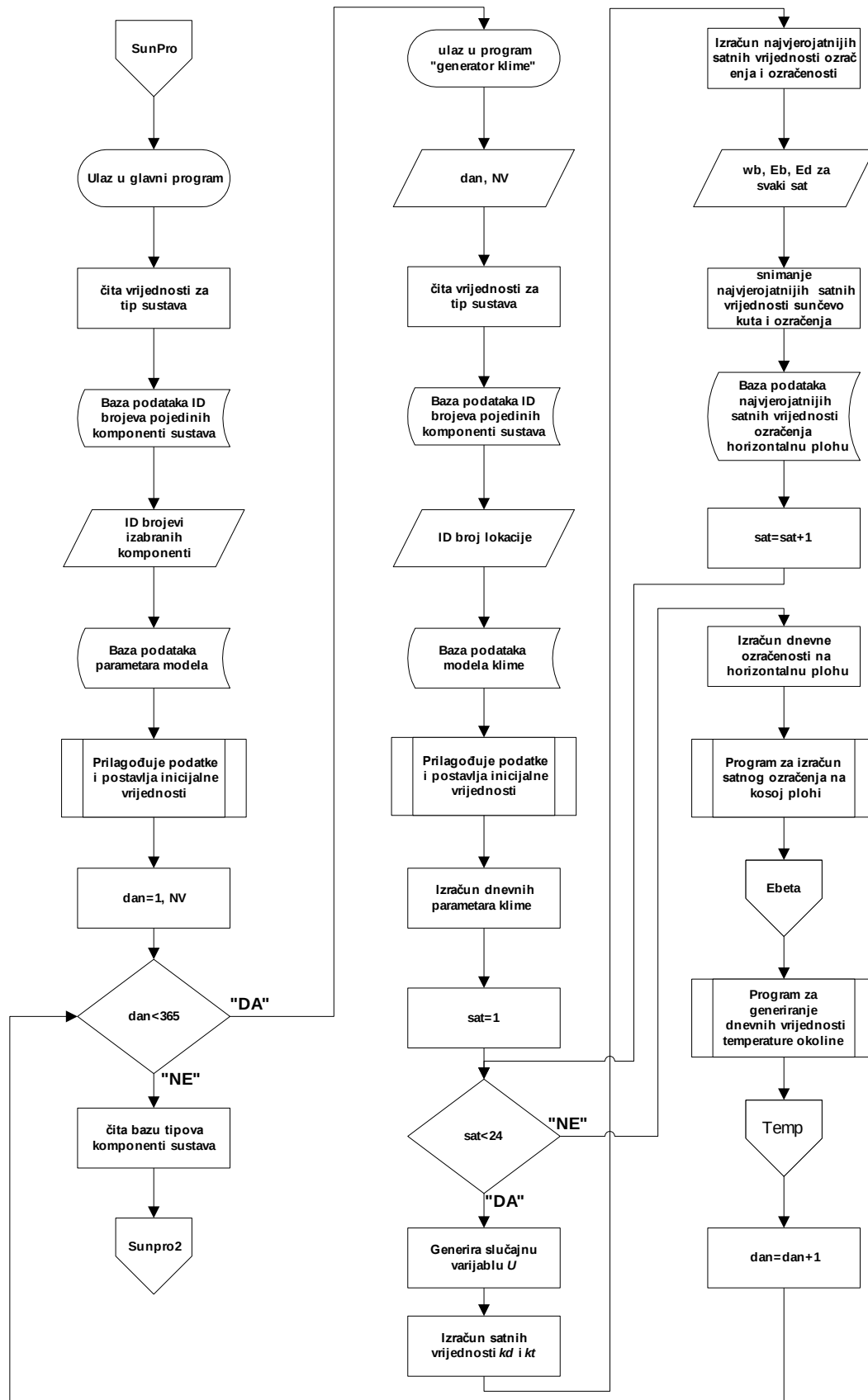
Slika 10.32 Dijagram toka sučelja "Definiranje sustava"



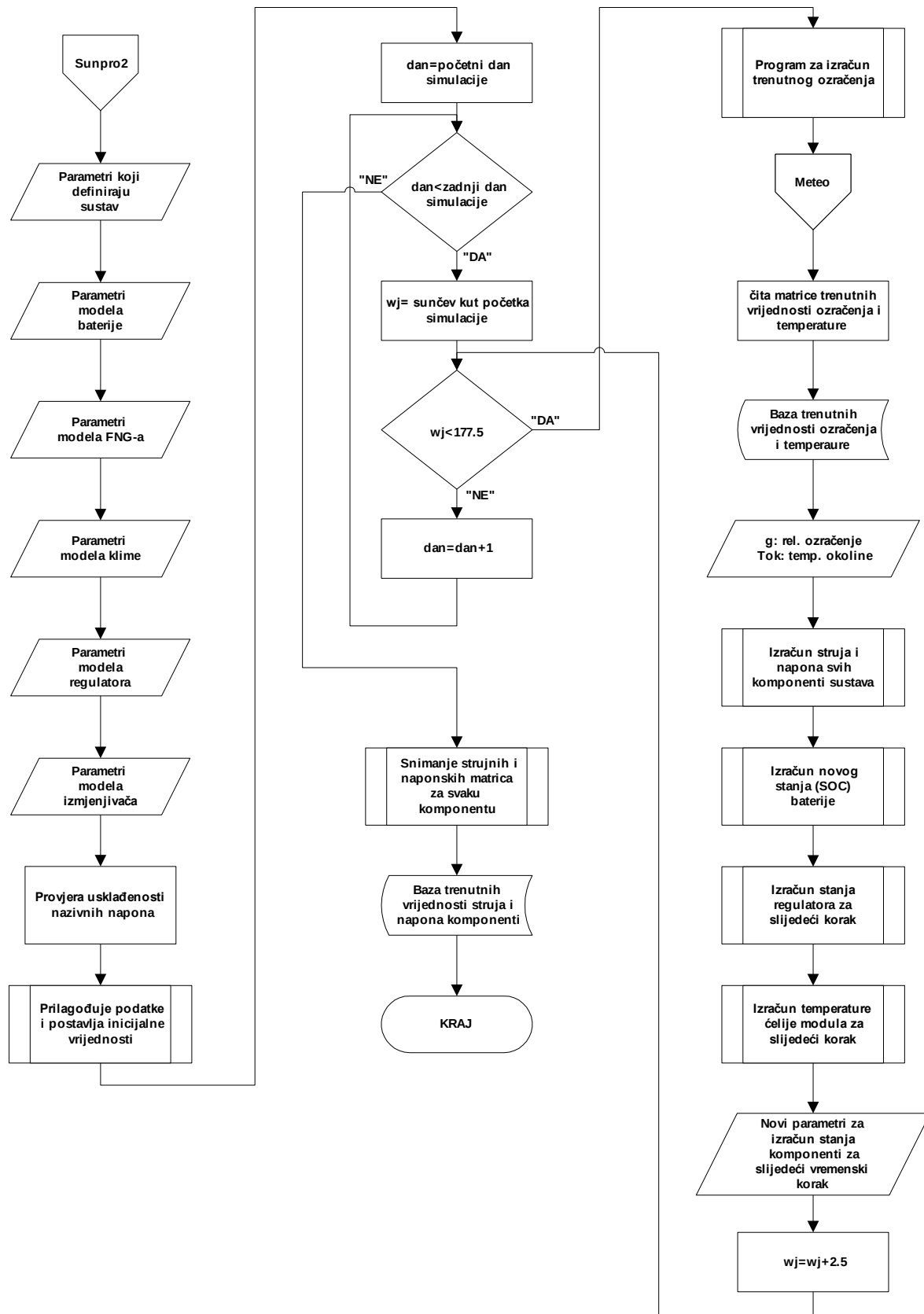
Slika 10.33 Dijagram toka sučelja: "Definiranje upravljanja"



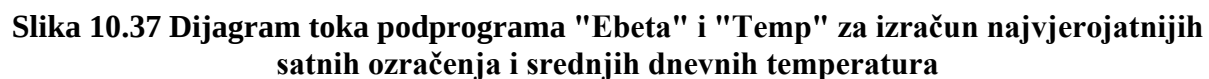
Slika 10.34 Dijagram toka sučelja: "Simuliraj"

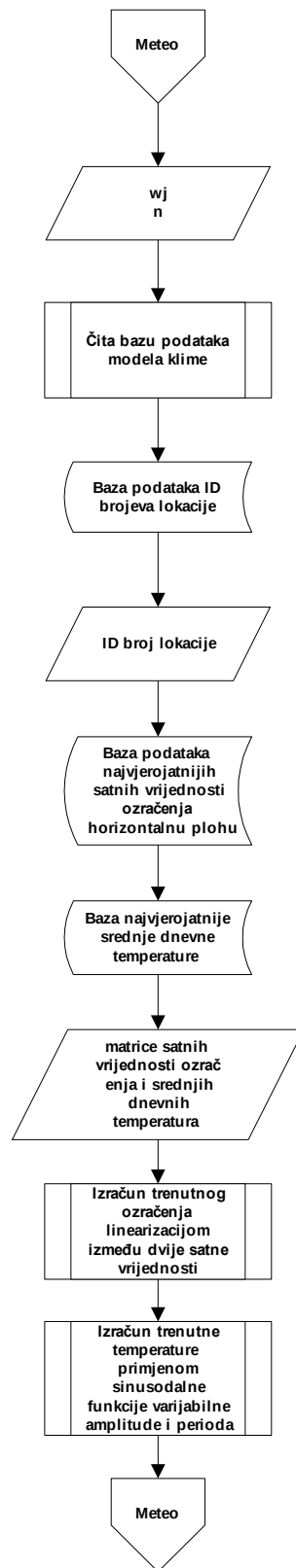


Slika 10.35 Dijagram toka glavnog programa "SunPro"



Slika 10.36 Dijagram toka glavnog programa: "SunPro"- nastavak





Slika 10.38 Dijagram toka podprograma "Meteo" za izračun trenutnih vrijednosti ozračenja i temperature

11. LITERATURA

- [1] Knapp V., Colić P., *Uvod u električna i magnetska svojstva materijala*, Školska knjiga Zagreb, 1990.
- [2] Kulišić, P., *Sunčane ćelije*, Školska knjiga, Zagreb 1994.
- [3] Kulišić, P., *Novi Izvori energije II dio. Sunčana energija i energija vjetra*, Školska knjiga, Zagreb 1991.
- [4] Charles K., *Uvod u fiziku čvrstog stanja*, Savremena administracija, Beograd, 1970
- [5] Šribar J., Divković-Pukšec J., *Elektronički elementi-zbirka riješenih zadataka i izvoda I dio*,
- [6] Martin G., *Solar Cells. Operating Principles, Technology, and System Application*.
- [7] Benner J.P., Kazmerski L. *Photovoltaics and gaining greater visibility*. IEEE Spectrum Vol. 26., No p., 1999, pp 34-42.
- [8] Coors S., Schneider B., Böhm M., *Towards an analytic model for curve correction procedure for amorphous silicon a-Si:H solar cells*. Proc. 2nd World Conference and Exhibition on photovoltaic solar energy conversion, July 6-10, 1998, Vienna, Austria, pp 902-905.
- [9] Veissid N., Nubile P., *Results of the solar cell experiment of the first Brazilian satellite*. Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol 46, No 1 1997, pp 1-16
- [10] Zechner C., Fath P., Willeke G., Bucher E., *Two-and three-dimensional optical carrier generation determination in crystalline silicon solar cells*. Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol 51, No 3-4 1998, pp 25-
- [11] King D.L., *Photovoltaic Module and Array Performance Characterization Methods for All System Operating Conditions*, Proc. NREL/SNL Photovoltaics Program Review Meeting, November 18-22, 1996, Lakewood, CO, AIP Press, New York, 1997., pp 347-368
- [12] King D.L., *PVSIM[®]: A Simulation Program for Photovoltaic Cells, Modules, and Arrays*, Proc. 25th IEEE PVSC, May 13-17, 1996, Washington DC, pp 1295-1297
- [13] Goldstein L. H., *PVSS: A Photovoltaic System Simulation Program*, Solar Energy Vol.21, No 1. pp 37-43, 1978
- [14] Zulim I., *Procijena karakterističnih veličina fotonaponskog sustava jednostavnim metodam u određenim uvijeima*, doktorska disertacija, Zagreb, 1990.
- [15] King D.L., *Field Experience With a New Performance Characterization Procedure For Photovoltaic Arrays*, Proc. 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, July 6-10, 1998, pp 1947-1952.
- [16] *Database of Photovoltaic Module Performamce Parameters*, <http://www.sandia.gov/pv/pvc.htm>
- [17] Iannone F., Noviello G., Sarno A., *Monte Carlo techniques to analyse the electrical mismatch losses in large-scale photovoltaic generators*, Solar Energy, Vo.l 62, No. 2, 1998 pp. 85-92,
- [18] Sayigh A.A.M., *Solar Energy Engineering*, Academic Press, Ney York 1977
- [19] Twindell I., Weir T., *Renewable energy resources*, The University Press, Cambridge 1986.

- [20] Ventre J., Messenger R., *Photovoltaic Systems Engineering*, CRC Press, New York 2000
- [21] Rabl A., *Active Solar Collectors and Their Applications*, Oxford University Press, Oxford 1985.
- [22] grupa autora, *Tehnička enciklopedija, svezak 8, str 454-462*, Jugoslavenski leksikografski zavod, Zagreb, 1982.
- [23] Luque A., *Solar Cells and Optics for Photovoltaic Concentration*, Adam Higler Press, Bristol, England, 1989.
- [24] Beckmen W.A., Klein S.A., Duffie J.A., *Solar Heating Design*, John Wiley & Sons, New York, 1977.
- [25] Pauše Ž., *Vjerojatnost, informacija, stohastički procesi*, Školska knjiga, Zagreb 1974.
- [26] Filipović I., Lipanović S., *Opća i anorganska kemija*, Školska knjiga, Zagreb 1995.
- [27] grupa autora, *Tehnička enciklopedija svezak 1, , Jugoslavenski leksikografski zavod*, Zagreb 1973. str 48-56.
- [28] Ocepek M., *Tehnički priručnik za olovne baterije*, Informator 1985.
- [29] Ross J. N., Markvart T., He W., *Modelling Battery Charge Regulation for a Stand-Alone Photovoltaic System*, Solar Energy Vol 69, No 2, pp 181-190, 2000.
- [30] Jurković-Periša B., *Poznavanje i održavanje kemijskih izvora energije*, Tehnička vojna akademija kopnene vojske JNA, 1975 Zagreb.
- [31] Duryea S., Islam S., Lawrance W., *A Battery Management System for Stand-Alone Photovoltaic Energy Systems*, IEEE Industry Applications Magazine, May/June 2001., pp 67-72
- [32] Roberts S., *Solar Electricity – A Practical Guide to Designing and Installing Small Photovoltaic Systems*, Prentice Hall, New York 1991.
- [33] grupa autora, *Tehnička enciklopedija, svezak 4*, Jugoslavenski leksikografski zavod, Zagreb 1973., str 363-387.
- [34] grupa autora, *Tehnička enciklopedija svezak 11*, Jugoslavenski leksikografski zavod, Zagreb 1973., str 307-339,
- [35] Perić M., *Simulacija fotonaponskog sustava za opskrbu vodom*- Seminarski rad, FER Zagreb, 2000.
- [36] Perić M., *Solarno-vodikov energetska sustav za Jadranske otoke*- Diplomski rad, FER, Zagreb, 1997
- [37] grupa autora *Maintance and Operation of Stand-Alone Photovoltaic Systems*, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, 1991
- [38] Mashelini H., Carelse X.F., *Microcontroller-Based Charge Controller for Stand-Alone Photovoltaic Systems*, Solar energy Vol 6. No 4, 1997, pp 225-230.
- [39] Enslin J.H., Wolf M.S., Snyman D.B., Swingers W., *Integrated Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Converter*, IEEE Transactions on industrial electronics, Vol 44, no. 6, 1997, pp 769-773.
- [40] Calais M., Hinz H., *A Riple-Based Maximum Power Point Tracking Algoritam for Single-Phase, Grid-Connected Photovoltaic System*, Solar Energy, Vol 63. No 5, 1998, pp 277-282.
- [41] Mummadi V.C *Steady-State and Dynamic Performance Analysis of PV Supplied DC Motors Fed From Intermediate Power Converter*, Solar Energy Materials & Solar Cells, No. 61., 2000, pp 365-381.
- [42] Mishra P.R., Joshio J.C., Roy B., *Design of a solar photovoltaic-powered mini chatodic protection system*, Solar Energy Materials & Solar Cells, No. 61., 2000, pp 383-391.

12. SAŽETAK

Cilj magistarskog rada je definirati izgled računalne aplikacije za simuliranje fotonaponskih sustava. Na početku opisano je porijeklo sunčeve energije, geometrija prijenosa sunčeve energije te ozračenje horizontalne odnosno nagnute plohe. Zatim je opisan stohastički model ozračenja na horizontalnu plohu na primjeru otoka Lastova. Polazeći od teorije fotoelektričnog efekta razvijene su osnove za matematičko modeliranje rada fotonaponske ćelije. Prikazano je nekoliko tipova modela fotonaponske ćelije. S obzirom na važnost akumulatorskih baterija u fotonaponskim sustavima, detaljno je opisana akumulatorska baterija. Također je opisan kemijski proces punjenja i pražnjenja sekundarnih električnih baterija. Pored toga matematičkim modelom opisani su efekti kao što je polarizacija, samopražnjenje, isplinjavanje. Dan je pregled svih tipova akumulatorskih baterija koje se koriste u fotonaponskim sustavima. Nekoliko modela je opisano detaljno. Opisani su modeli tipičnih trošila u fotonaponskim sustavima, kao i uređaji za regulaciju i prilagodbu. Posebna pozornost je dana algoritmima rada regulatora punjenja. Dan je opis simulacijskog programa kao i dijagram toka. Prikazan je primjer rada simulacijskog programa za otok Lastovo. U dodatku prikazani su proračuni i analize koje upotpunjuju matematičke modele komponenti sustava, kao i dijagram toka programa.

KLJUČNE RIJEČI:

Sunčeva energija, Fotonaponski sustav, model ozračenja, model fotonaponske ćelije, model akumulatorske baterije, model trošila, model regulatora.

13. ABSTRACT

The goal of this thesis is to define the basic shapes of computer application for the simulation of photovoltaic systems. First, the origin of solar energy, geometry of solar energy transfer and irradiance on a horizontal and inclined surface is described. The stochastic model of irradiance on a horizontal surface applied for the Island of Lastovo is described. Starting from the photoelectric effect theory, basics of mathematical modeling of photovoltaic cells are developed. Some types of photovoltaic cells are presented. Taking into consideration the importance of batteries in photovoltaic systems, they are described in detail. Also, chemical proceses of charging and discharging of batteries are considered. The effects of polarization, self-discharging and gassing are also described using a mathematical model. An overview of battery types used in photovoltaic systems is given. Some battery models are shown at the as well. The models of typical loads, and the devices for control and adjustment in photovoltaic systems are presented. Special attention is given to the algorithms of charge controllers. Description of the simulation program is given. One example of simulation for the Island of Lastovo is given. All caculations and analyses related to the mathematical models of the system component are shown in appendix and the flowchart of the program is presented.

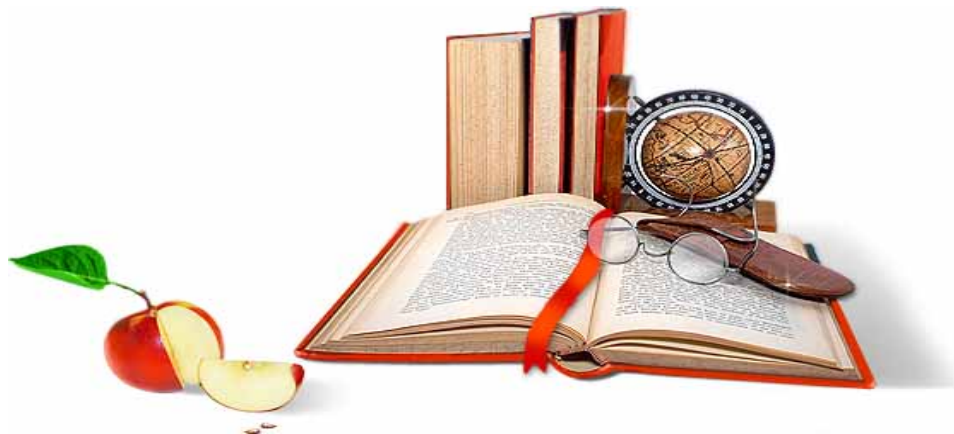
Keywords:

Solar energy, photovoltaic system, model of irradiance, model of photovoltaic cells, model of battery, model of load, model of controllers.

[illegible]

BESPLATNI GOTOVI SEMINARSKI, DIPLOMSKI I MATURSKI RAD.

**RADOVI IZ SVIH OBLASTI, POWERPOINT PREZENTACIJE I DRUGI EDUKATIVNI
MATERIJALI.**



WWW.SEMINARSKIRAD.ORG

WWW.MATURSKIRADOVI.NET

WWW.MATURSKI.NET

WWW.SEMINARSKIRAD.INFO

WWW.MATURSKI.ORG

WWW.ESSAYSX.COM

WWW.FACEBOOK.COM/DIPLOMSKIRADOVI

NA NAŠIM SAJTOVIMA MOŽETE PRONAĆI SVE, BILO DA JE TO **[SEMINARSKI](#)**, **[DIPLOMSKI](#)** ILI **[MATURSKI](#)** RAD, POWERPOINT PREZENTACIJA I DRUGI EDUKATIVNI MATERIJAL. ZA RAZLIKU OD OSTALIH MI VAM PRUŽAMO DA POGLEDATE SVAKI RAD, NJEGOV SADRŽAJ I PRVE TRI STRANE TAKO DA MOŽETE TAČNO DA ODABERETE ONO ŠTO VAM U POTPUNOSTI ODGOVARA. U BAZI SE NALAZE **[GOTOVI SEMINARSKI, DIPLOMSKI I MATURSKI RADOVI](#)** KOJE MOŽETE SKINUTI I UZ NJIHOVU POMOĆ NAPRAVITI JEDINSTVEN I UNIKATAN RAD. AKO U **[BAZI](#)** NE NAĐETE RAD KOJI VAM JE POTREBAN, U SVAKOM MOMENTU MOŽETE NARUČITI DA VAM SE IZRADI NOVI, UNIKATAN SEMINARSKI ILI NEKI DRUGI RAD RAD NA LINKU **[IZRADA RADOVA](#)**. PITANJA I ODGOVORE MOŽETE DOBITI NA NAŠEM **[FORUMU](#)** ILI NA **MATURSKIRADOVI.NET@GMAIL.COM**