

UNIVERZA V MARIBORU
FAKULTETA ZA ELEKTROTEHNIKO,
RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Sebastijan Seme

**Optimalno sledenje fotonapetostnega sistema soncu ob
upoštevanju izgub pogonskega sklopa**

Doktorska disertacija

Maribor, april 2011



Univerza v Mariboru

*Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko*

Doktorska disertacija

**Optimalno sledenje fotonapetostnega sistema soncu ob
upoštevanju izgub pogonskega sklopa**

Avtor: Sebastijan Seme

Mentor: red. prof. dr. Gorazd Štumberger

Somentor: red. prof. dr. Jože Voršič

UDK: 621.383.5:621.311.243(043.3)

Maribor, april 20. 4. 2011



Univerza v Mariboru

*Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko*

Avtor: Sebastijan Seme, univ. dipl. inž. el.

Naslov: Optimalno sledenje fotonapetostnega sistema soncu ob upoštevanju izgub pogonskega sklopa

Naslov v angleščini: Optimal sun-tracking of a photovoltaic system considering the electric drive losses

UDK: 621.383.5:621.311.243(043.3)

Ključne besede: fotonapetostni sistem, sledilni sistem, pogonski sklop, optimizacija

Število strani: 159 (113)

Obdelava besedila in slik: Sebastijan Seme, univ. dipl. inž. el.

Število izvodov: 10

Jezikovna recenzenta: Dragica Prosenjak in Barbara Prosenjak

Kraj in datum: Maribor, april 2011



Univerza v Mariboru

Maribor, 21. 6. 2010
Številka: DR 71/2010/425-MGM

Na osnovi 287., 140., 142. in 144. člena Statuta Univerze v Mariboru (Statut UM-UPB8, Ur. l. RS, št. 1/2010) ter sklepa 33. redne seje Senata Univerze v Mariboru z dne 21. 6. 2010 v zvezi z vlogo doktorskega kandidata Sebastijana Semeta za sprejem odločitve o predlagani temi doktorske disertacije in mentorja,

izdajam naslednji

SKLEP

Odobri se tema doktorske disertacije Sebastijana Semeta s Fakultete za elektrotehniko, računalništvo in informatiko z naslovom »Optimalno sledenje fotonapetostnega sistema soncu ob upoštevanju izgub pogonskega sklopa«. Kandidatu se za mentorja imenuje red. prof. dr. Gorazd Štumberger, za somentorja pa red. prof. dr. Josip Voršič. Kandidat mora članici predložiti izdelano doktorsko disertacijo v zadostnih izvodih najpozneje do 20. 6. 2014.

Obrazložitev:

Kandidat Sebastijan Seme je dne 12. 4. 2010 na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko vložil vlogo za potrditev teme doktorske disertacije z naslovom »Optimalno sledenje fotonapetostnega sistema soncu ob upoštevanju izgub pogonskega sklopa«. Za mentorja je bil predlagan red. prof. dr. Gorazd Štumberger, za somentorja pa red. prof. dr. Josip Voršič.

Senat Fakultete za elektrotehniko, računalništvo in informatiko je na osnovi pozitivnega mnenja komisije za oceno teme doktorske disertacije, ki je ugotovila, da kandidat izpolnjuje pogoje za pridobitev doktorata znanosti, in ocenila, da je predlagana tema ustrezna, sprejel pozitivno mnenje in poslal predlog teme doktorske disertacije s predlogom mentorja in somentorja v odobritev Senatu univerze.

Senat Univerze v Mariboru je po proučitvi vloge in na osnovi določil Statuta Univerze v Mariboru sprejel svojo odločitev o predlagani temi doktorske disertacije in imenoval mentorja in somentorja, kot izhaja iz izreka.

V skladu s 144. členom Statuta Univerze v Mariboru mora kandidat za pridobitev doktorata znanosti najpozneje v štirih letih od dneva izdaje tega sklepa, članici predložiti izdelano doktorsko disertacijo v zadostnih izvodih. Kandidatu je bil določen rok glede na datum sprejetja teme na pristojnem organu.

Pouk o pravnem sredstvu:

Zoper ta sklep je možna pritožba na Senat Univerze v Mariboru v roku 8 dni od prejema tega sklepa.

Obvestiti:

1. Kandidata.
2. Fakulteto.
3. Arhiv.



Rektor:
Prof. dr. Ivan Rozman

IR *G.*

Delo je opravljeno na Univerzi v Mariboru, Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Maribor

Zahvala

Mentorju prof. dr. Gorazdu Štumbergerju, ki mi je omogočil pripravo doktorske disertacije, se iz srca zahvaljujem za vso izkazano vsestransko strokovno pomoč, vodenje, nasvete in podporo.

Za somentorstvo in predloge, ki so bili nadvse koristni pri raziskovalnem delu in pisanju, se zahvaljujem prof. dr. Jožetu Voršiču.

Zahvaljujem se tudi vsem sodelavcem, ki so mi kakorkoli pomagali pri pripravi tega dela, še posebej pa vsem sodelavcem v Laboratoriju za energetiko, ki so mi s pogovori in pripombami, pomagali pri oblikovanju nekaterih zamisli.

Zahvala gre tudi mami Idi in bratu Alešu, ki sta mi omogočila študij in me v življenju usmerila na pravo pot.

Moji Barbari se zahvaljujem za vso podporo, pomoč in spodbujanje, predvsem pa potrpljenje in odrekanje v času pripravljanja doktorske disertacije

Sebastijan Seme

Research is what I'm doing when
I don't know what I'm doing.

Wernher Von Braun
(1912 - 1977)

UDK: 621.383.5:621.311.243(043.3)

Optimalno sledenje fotonapetostnega sistema soncu ob upoštevanju izgub pogonskega sklopa

Ključne besede: fotonapetostni sistem, sledilni sistem, pogonski sklop, optimizacija

Povzetek

Doktorska disertacija obravnava optimalno sledenje fotonapetostnega sistema soncu, pri čemer upoštevamo električne izgube pogonskega sklopa. Sledenje fotonapetostnega sistema soncu omogoča, da pri tem na sončne module pade čim več razpoložljive energije sončnega sevanja. Pogonski sklop, ki omogoča sledenje, predstavlja za fotonapetostni sistem porabo električne energije. Idealni izplen pretvorbe razpoložljive energije sončnega sevanja bi bil dosežen ob zveznem sledenju sledilnega sistema poti sonca. Ker imajo pogonski sklopi konstantno hitrost in diskreten način sledenja, se lahko idealnemu izplenu energije sončnega sevanja le približajo.

V doktorski disertaciji je predstavljeno, kako diskretno slediti poti sonca, da na sončne module pade čim več razpoložljive energije sončnega sevanja, pri čemer so upoštevane električne izgube pogonskega sklopa. Za doseg želenega cilja so potrebne čim bolj natančne vrednosti o razpoložljivi energiji sončnega sevanja pri tleh v danem trenutku. Zato je v okviru doktorske disertacije razvit model za napoved celotnega in difuznega sončnega sevanja v obliki časovno odvisne funkcije za jasne dni. Model je potrjen s primerjavo med izmerjenim in napovedanim sončnim sevanjem za jasne dni. Napoved sončnega sevanja v obliki časovno odvisne funkcije in izgube pogonskih sklopov, kot funkcije naklona in azimuta, so uporabljeni za določitev optimalnih trajektorij sledilnega sistema. Za iskanje rešitve nelinearnega in omejenega problema je uporabljena stohastična metoda, imenovana Diferenčna evolucija. Tovrstni pristop za iskanje maksimalnega izplena fotonapetostnega sistema še ni bil raziskan v nobeni literaturi. Uporablja se točno določena kriterijska funkcija, ki je minimalna v optimizacijskem postopku glede na optimizacijske meje. S tem je zagotovljena največja možna pretvorba energije sončnega sevanja, upoštevajoč uporabljen model fotonapetostnega sistema, porabe sledilnega sistema, napovedi sončnega sevanja in lastnosti optimizacijskega postopka. Uporaba drugačnih in bolj naprednih modelov fotonapetostnega sistema, porabe sledilnega sistema ali napovedi sončnega sevanja lahko privede tudi do drugačnih optimalnih trajektorij sledilnega sistema. Vendar to nikakor ne zmanjša teže predlagane metode. Predlagana metoda daje maksimalni izplen fotonapetostnega sistema za uporabljene modele in podatke.

Optimal sun-tracking of a photovoltaic system considering the electric drive losses

Keywords: photovoltaic system, tracking system, electric drive, optimization

Abstract

Doctoral thesis deals with optimal sun-tracking of a photovoltaic system considering the electric drive losses. The Sun tracking PV system assures that the highest possible share of the available solar radiation reaches the surface of the PV modules. The electric drive which enables tracking is considered as the loss of the energy produced in the PV system. The maximum of the energy produced in the PV system is achieved by the continuous tracking of the PV system. Since the electric drives are determined by constant speed and time, and angle quantization the maximum of the energy produced can only approximate.

The doctoral thesis presents a new method for determining such trajectories of the PV modules that change the position of the PV modules in such a way that the production of the electric energy in the given time interval of the observation reaches its maximum. The goal is to determine the maximum efficiency of the PV tracking system considering the tracking system energy consumption. To achieve this, exact values of the available solar energy are needed for a given moment. To do this, a new method for predicting direct and diffuse solar radiation on the Earth's surface, in the form of the time dependent function, is developed. The method is confirmed by the comparison of the measured and the predicted solar radiation for clear days. The developed method for predicting the solar radiation in the form of the time dependent function and energy consumption of the tracking system, given as the functions of the azimuth and tilt angle change, are applied together to determine those trajectories of the PV module, where the PV system energy production, gives the maximum. To find a solution of the nonlinear and bounded optimization problem, a stochastic search algorithm called Differential Evolution is applied. The approach for determining the maximum of the energy produced in the PV system has not been researched yet. The explicitly defined objective function, which is minimized in the optimization procedure considering the optimization bounds, is used. Thus it is assured the maximum of the possible energy produced in the PV system, considering the applied model of the PV system, tracking system consumption, predicted solar radiation, and the properties of the applied optimization method. The use of the different and more advanced models of the PV system, the sun tracking system consumption or prediction of the solar radiation, can lead to the

different optimal trajectories of the sun tracking system. However, this cannot reduce the importance of the proposed method. The proposed method gives the maximum of the possible energy produced in the discussed PV system, considering the applied models and data.

Vsebina

1	Uvod	1
1.1	Motivacija in cilji.....	1
1.2	Stanje raziskav in pregled uporabljene literature	4
1.3	Znanstveni prispevki.....	8
1.4	Pregled po poglavjih.....	9
2	Sončne elektrarne.....	11
2.1	Sončna celica	13
2.1.1	Fizikalne osnove delovanja sončne celice	13
2.1.2	Matematični model sončne celice	15
2.1.3	Vpliv različnih parametrov na delovanje sončne celice	21
2.2	DC/DC pretvornik	25
2.2.1	Pretvornik navzgor	26
2.2.2	Pretvornik navzdol.....	27
2.2.3	Kombinacija pretvornika navzgor in navzdol	29
2.3	DC/AC razsmernik	31
2.3.1	Enofazni razsmernik	31
2.3.2	Trifazni razsmernik	32
2.3.3	Omrežno voden razsmernik	34
2.4	Zaključek poglavja	36
3	Sistemi za sledenje	37
3.1	Dvoosni sledilni sistemi	38
3.2	Električne izgube dvoosnega sledilnega sistema	40
3.3	Zaključek poglavja	46
4	Napoved sončnega sevanja	47
4.1	Sončno sevanje in osnovne geometrijske relacije med Soncem in Zemljo.....	47
4.2	Sončno sevanje pri tleh na vodoravno površino	54
4.3	Sončno sevanje pri tleh na poljubno usmerjeno ploskev	56

4.4	Modeli sončnega sevanja, temelječi na dolgoročnem merjenju sončnega sevanja na vodoravno površino	58
4.4.1	Mesečno povprečje sončnega sevanja na poljubno usmerjeno površino	59
4.4.2	Dnevno povprečje sončnega sevanja na poljubno usmerjeno površino.....	63
4.4.3	Sončno sevanje v obliki časovno odvisne funkcije na poljubno usmerjeno površino..	65
4.5	Meritve sončnega sevanja.....	71
4.5.1	Inštrument za merjenje sončnega sevanja.....	71
4.5.2	Inštrument za merjenje števila ur sončnega sevanja	72
4.6	Zaključek poglavja	72
5	Določitev trajektorij sledilnega sistema	74
5.1	Izvedba optimizacije z uporabo diferenčne evolucije	75
5.2	Primeri optimizacije trajektorij sledilnega sistema	82
5.2.1	Optimalni trajektoriji sledilnega sistema za poletni solsticij	82
5.2.2	Optimalni trajektoriji sledilnega sistema za zimski solsticij	90
5.2.3	Optimalni trajektoriji sledilnega sistema za pomladno enakonočje	97
5.2.4	Optimalni trajektoriji sledilnega sistema za jesensko enakonočje.....	104
5.3	Zaključek poglavja	111
6	Sklep	112
	Literatura	114
	Dodatek A	122
	Življenjepis.....	123

Slike

Slika 1.1: Zgoraj, od leve proti desni: Alexandre Edmond Becquerel, Willoughby Smith in Charles Fritts. Spodaj, od leve proti desni: Albert Einstein, Robert Andrews Millikan in Jan Czochralski.....	2
Slika 1.2: <i>Bell-ov laboratorij in satelit Telstar</i>	2
Slika 2.1: Osnovni gradniki fotonapetostnega sistema. a) sončna celica, b) sončni modul, c) panel in d) polje.....	11
Slika 2.2: Osnovni način priključitve sončne elektrarne na električno omrežje.....	12
Slika 2.3: Kemijski element silicij in kristalna mreža silicijevih atomov.	14
Slika 2.4: Prerez sončne celice.....	15
Slika 2.5: Nadomestno vezje sončne celice.....	16
Slika 2.6: Prikaz izgub sončne celice.....	17
Slika 2.7: Vzorec sončne celice.	18
Slika 2.8: <i>UI</i> in <i>UP</i> karakteristiki sončne celice.	21
Slika 2.9: Vpliv sončnega sevanja na karakteristike sončne celice.....	22
Slika 2.10: Vpliv temperature na karakteristike sončne celice.	22
Slika 2.11: Vpliv površine sončne celice na njene karakteristike.	23
Slika 2.12: Vpliv števila sončnih celic na karakteristiko.....	23
Slika 2.13: Nadomestno vezje.	24
Slika 2.14: <i>UI</i> in <i>UP</i> karakteristiki modula z vrisanimi obratovalnimi točkami.....	25
Slika 2.15: Pretvornik navzgor.....	26
Slika 2.16: Nadomestno vezje pretvornika navzgor: a) ko tranzistor prevaja in b) ko tranzistor ne prevaja.....	27
Slika 2.17: Pretvornik navzdol.	28
Slika 2.18: Časovna poteka napetosti na vhodu nizko pasovnega sita (u_{oi}) in na njegovem izhodu (U_2).	28
Slika 2.19: Nadomestno vezje pretvornika navzdol; a) ko tranzistor prevaja in b) ko tranzistor ne prevaja.....	29
Slika 2.20: Pretvornik navzdol-navzgor.	30
Slika 2.21: Nadomestno vezje pretvornika navzdol/navzgor za primer a) ko tranzistor prevaja in b) ko tranzistor ne prevaja.	30
Slika 2.22: Enofazni razsmernik.....	31
Slika 2.23: Časovni potek napetosti znotraj intervala T_S	32
Slika 2.24: Trifazni razsmernik.....	33
Slika 2.25: Povezave razsmernikov v "master-slave" in "verižni" izvedbi.....	35

Slika 2.26: Izkoristek a) samostojnega razsmernika, b) dveh razsmernikov v "verižni" kombinaciji in c) dveh razsmernikov v "master-slave" kombinaciji.	36
Slika 3.1: Sledilni sistemi: a) eno-osni, b) dvo-osni polarni in c) dvo-osni azimutni.....	37
Slika 3.2: Dvo-osni sledilni sistem.	39
Slika 3.3: Trenutni vrednosti napetosti $u(t)$ in tokov $i(t)$ za PS1.....	42
Slika 3.4: Trenutni vrednosti električnih izgub $E_c(t)$ in spremembe kota $\Delta\beta(t)$ za PS1.	43
Slika 3.5: Električne izgube E_c v odvisnosti od spremembe kota $\Delta\beta(t)$ za PS1.....	44
Slika 3.6: Trenutni vrednosti napetosti $u(t)$ in tokov $i(t)$ za PS2.....	44
Slika 3.7: Trenutni vrednosti električnih izgub $E_c(t)$ in spremembe kota $\Delta\alpha_w(t)$ za PS2.....	45
Slika 3.8: Električne izgube E_c v odvisnosti od spremembe kota $\Delta\alpha_w(t)$ za PS2.	45
Slika 4.1: Vrtenje Zemlje okrog Sonca.	49
Slika 4.2: Naklon osi Zemlje za: a) poletni solsticij, b) pomladno in jesensko enakonočje in c) zimski solsticij.....	50
Slika 4.3: Deklinacija δ , podana kot funkcija dneva v letu n	51
Slika 4.4: Popravek časa E_t kot funkcija dneva v letu n	51
Slika 4.5: Urni kot sonca h_s kot funkcija časa t	52
Slika 4.6: Analemma.	53
Slika 4.7: Geografski koordinatni sistem: zemljepisna širina L in zemljepisna dolžina l	53
Slika 4.8: Definicije kotov: zemljepisna širina L (AC), deklinacije δ (AB), urni kot sonca h_s (CD) in kotna višina sonca α (EF).	54
Slika 4.9: Kotna višina sonca α , azimut sonca α_s in zenitni kot z	56
Slika 4.10: Ponazoritev naklonskega kota površine β , njenega azimuta α_w in vpadnega kota sončnih žarkov i na poljubno usmerjeno površino	57
Slika 4.11: Polurne vrednosti gostote moči sončnega sevanja za celotno I_h in difuzno $I_{d,h}$ komponento na vodoravno površino v kW/m^2 , za obdobje sedmih let.	58
Slika 4.12: Mesečna povprečja celotne H_h in difuzne D_h komponente energije sončnega sevanja na vodoravno površino.	59
Slika 4.13: Mesečno povprečje dnevne energije sončnega sevanja H_c [Wh/m^2] za januar, februar, marec in april za mesto Maribor, podano v odvisnosti od naklonskega kota β in orientacije α_w	61
Slika 4.14: Mesečno povprečje dnevne energije sončnega sevanja H_c [Wh/m^2] za maj, junij, julij in avgust za mesto Maribor, podano v odvisnosti od naklonskega kota β in orientacije α_w	61
Slika 4.15: Mesečno povprečje dnevne energije sončnega sevanja H_c [Wh/m^2] za september, oktober, november in december za mesto Maribor, podano v odvisnosti od naklonskega kota β in orientacije α_w	62
Slika 4.16: Letno povprečje dnevne energije sončnega sevanja H_c [Wh/m^2] za mesto Maribor, podano v odvisnosti od naklonskega kota β in orientacije α_w	63
Slika 4.17: Dnevna povprečja celotne I_h in difuzne $I_{d,h}$ komponente energije sončnega sevanja na vodoravno površino.	64
Slika 4.18: Dnevna povprečja energije sončnega sevanja I_c [Wh/m^2] za poletni in zimski solsticij ter za pomladno in jesensko enakonočje za mesto Maribor podana v odvisnosti od naklonskega kota β in orientacije α_w	64

Slika 4.19: Dnevna povprečja energije sončnega sevanja I_c [Wh/m ²] za poletni in zimski solsticij ter za pomladno in jesensko enakonočje za mesto Maribor podana v odvisnosti od naklonskega kota β in orientacije a_w	65
Slika 4.20: Dolžina poti sončnih žarkov skozi atmosfero.....	67
Slika 4.21: Izmerjen celotni K_{t-mer} in difuzni K_{d-mer} faktor prepustnosti ozračja za jasne dni v odvisnosti od dolžine poti sončnih žarkov skozi atmosfero za obdobje šestih let.....	68
Slika 4.22: Primerjava med izmerjenim (mer) in izračunanim (izr) celotnim K_t in difuznim K_d faktorjem prepustnosti ozračja za jasne dni v odvisnosti od dolžine poti sončnih žarkov skozi atmosfero za obdobje šestih let.....	69
Slika 4.23: Primerjava med izmerjenim (mer) in z modelom napovedanim (izr) celotnim I_h in difuznim $I_{d,h}$ sončnim sevanjem na vodoravno površino za naključno izbrani jasni dan.	69
Slika 4.24: Primerjava med izmerjenim (mer) in z modelom napovedanim (izr) celotnim I_h in difuznim $I_{d,h}$ sončnim sevanjem na vodoravno površino za 12 jasnih dni.....	70
Slika 4.25: Inštrumenti za merjenje sončnega sevanja; a) piranometer, b) piranometer s senčilnim obročem, c) pirheliometer in d) Campbell-Stokecov heliograf.....	72
Slika 5.1: Shematska predstavitev trajektorij sledilnega sistema v obliki diskretnih vrednosti sprememb v naklonu β in azimutu a_w s časi med spremembami in začetnimi vrednostmi.	78
Slika 5.2: Shematski prikaz poteka izračuna med optimizacijo.....	83
Slika 5.3: Napoved celotnega $I_h(t)$, direktnega $I_{b,h}(t)$ in difuznega $I_{d,h}(t)$ sončnega sevanja na vodoravno površino kot funkcije časa za poletni solsticij.	84
Slika 5.4: Optimalni trajektoriji naklona $\beta_{optimalni}(t)$ in azimuta $a_{w\,optimalni}(t)$, določeni z DE in trajektoriji naklona $\beta_{idealni}(t)$ in azimuta $a_{w\,idealni}(t)$ za idealno zvezno sledenje za poletni solsticij. .	85
Slika 5.5:Primerjava izračunane moči sončne elektrarne $P_{optimalni}(t)$ za trajektoriji, določeni z optimizacijo in izračunane moči sončne elektrarne $P_{idealni}(t)$ za trajektoriji, ki zvezno sledita soncu. Primerjava je narejena za poletni solsticij.....	86
Slika 5.6: Urni trajektoriji naklona $\beta_{stopnični}(t)$ in azimuta $a_{w\,stopnični}(t)$ in trajektoriji naklona $\beta_{idealni}(t)$ in azimuta $a_{w\,idealni}(t)$ za idealno zvezno sledenje za poletni solsticij.....	87
Slika 5.7: Primerjava izračunane moči sončne elektrarne $P_{optimalni}(t)$ za trajektoriji, določeni z optimizacijo, izračunane moči sončne elektrarne $P_{idealni}(t)$ za trajektoriji, ki zvezno sledita soncu in izračunane moči sončne elektrarne $P_{stopnični}(t)$ za trajektoriji, ki urno sledita soncu. Primerjava je narejena za poletni solsticij.....	88
Slika 5.8: Primerjava izračunane moči sončne elektrarne $P_{optimalni}(t)$ za trajektoriji, določeni z optimizacijo, izračunane moči sončne elektrarne $P_{idealni}(t)$ za trajektoriji, ki zvezno sledita soncu, izračunane moči sončne elektrarne $P_{stopnični}(t)$ za trajektoriji, ki urno sledita soncu, izračunane moči fiksne sončne elektrarne $P_{fiks}(t)$ in izmerjene moči fiksne sončne elektrarne $P^*_{fiks}(t)$. Primerjava je narejena za poletni solsticij.....	89
Slika 5.9: Primerjava proizvedene električne energije sončne elektrarne $E_{idealni}$, ki zvezno sledi soncu (stolpec I), proizvedene električne energije $E_{optimalni}$, ki sledi soncu po trajektorijah določenih z optimizacijo (stolpec II), proizvedene električne energije sončne elektrarne $E_{stopnični}$, ki urno sledi soncu in proizvedene električne energije fiksne sončne elektrarne E_{fiks} . Primerjava je narejena za poletni solsticij.	89
Slika 5.10: Napoved celotnega $I_h(t)$, direktnega $I_{b,h}(t)$ in difuznega $I_{d,h}(t)$ sončnega sevanja na vodoravno površino kot funkcije časa za zimski solsticij.	91

Slika 5.11: Optimalni trajektoriji naklona $\beta_{\text{optimalni}}(t)$ in azimuta $a_{w \text{ optimalni}}(t)$, določeni z DE in trajektoriji naklona $\beta_{\text{idealni}}(t)$ in azimuta $a_{w \text{ idealni}}(t)$ za idealno zvezno sledenje za zimski solsticij....	92
Slika 5.12: Primerjava izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{optimalni}}(t)$ za trajektoriji, določeni z optimizacijo in izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{idealni}}(t)$ za trajektoriji, ki zvezno sledita soncu. Primerjava je narejena za zimski solsticij.	93
Slika 5.13: Urni trajektoriji naklona $\beta_{\text{stopnični}}(t)$ in azimuta $a_{w \text{ stopnični}}(t)$ in trajektoriji naklona $\beta_{\text{idealni}}(t)$ in azimuta $a_{w \text{ idealni}}(t)$ za idealno zvezno sledenje za zimski solsticij.	94
Slika 5.14: Primerjava izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{optimalni}}(t)$ za trajektoriji, določeni z optimizacijo, izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{idealni}}(t)$ za trajektoriji, ki zvezno sledita soncu in izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{stopnični}}(t)$ za trajektoriji, ki urno sledita soncu. Primerjava je narejena za zimski solsticij.	95
Slika 5.15: Primerjava izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{optimalni}}(t)$ za trajektoriji, določeni z optimizacijo, izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{idealni}}(t)$ za trajektoriji, ki zvezno sledita soncu, izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{stopnični}}(t)$ za trajektoriji, ki urno sledita soncu in izračunane moči fiksne sončne elektrarne $P_{\text{fiks}}(t)$. Primerjava je narejena za zimski solsticij.....	96
Slika 5.16: Primerjava proizvedene električne energije sončne elektrarne E_{idealni} , ki zvezno sledi soncu (stolpec I), proizvedene električne energije $E_{\text{optimalni}}$, ki sledi soncu po trajektorijah, določenih z optimizacijo (stolpec II), proizvedene električne energije sončne elektrarne $E_{\text{stopnični}}$, ki urno sledi soncu in proizvedene električne energije fiksne sončne elektrarne E_{fiks} . Primerjava je narejena za zimski solsticij.	96
Slika 5.17: Napoved celotnega $I_h(t)$, direktnega $I_{b,h}(t)$ in difuznega $I_{d,h}(t)$ sončnega sevanja na vodoravno površino kot funkcije časa za pomladno enakonočje.	98
Slika 5.18: Optimalni trajektoriji naklona $\beta_{\text{optimalni}}(t)$ in azimuta $a_{w \text{ optimalni}}(t)$, določeni z DE in trajektoriji naklona $\beta_{\text{idealni}}(t)$ in azimuta $a_{w \text{ idealni}}(t)$ za idealno zvezno sledenje za pomladno enakonočje.	99
Slika 5.19: Primerjava izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{optimalni}}(t)$ za trajektoriji, določeni z optimizacijo in izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{idealni}}(t)$ za trajektoriji, ki zvezno sledita soncu. Primerjava je narejena za pomladno enakonočje.....	100
Slika 5.20: Urni trajektoriji naklona $\beta_{\text{stopnični}}(t)$ in azimuta $a_{w \text{ stopnični}}(t)$ in trajektoriji naklona $\beta_{\text{idealni}}(t)$ in azimuta $a_{w \text{ idealni}}(t)$ za idealno zvezno sledenje za pomladno enakonočje.....	101
Slika 5.21: Primerjava izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{optimalni}}(t)$ za trajektoriji, določeni z optimizacijo, izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{idealni}}(t)$ za trajektoriji, ki zvezno sledita soncu in izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{stopnični}}(t)$ za trajektoriji, ki urno sledita soncu. Primerjava je narejena za pomladno enakonočje.	102
Slika 5.22: Primerjava izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{optimalni}}(t)$ za trajektoriji, določeni z optimizacijo, izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{idealni}}(t)$ za trajektoriji, ki zvezno sledita soncu, izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{stopnični}}(t)$ za trajektoriji, ki urno sledita soncu, izračunane moči fiksne sončne elektrarne $P_{\text{fiks}}(t)$ in izmerjene moči fiksne sončne elektrarne $P^*_{\text{fiks}}(t)$. Primerjava je narejena za pomladno enakonočje.	103
Slika 5.23: Primerjava proizvedene električne energije sončne elektrarne E_{idealni} , ki zvezno sledi soncu (stolpec I), proizvedene električne energije $E_{\text{optimalni}}$, ki sledi soncu po trajektorijah, določenih z optimizacijo (stolpec II), proizvedene električne energije sončne elektrarne $E_{\text{stopnični}}$, ki	

urno sledi soncu in proizvedene električne energije fiksne sončne elektrarne E_{fiks} . Primerjava je narejena za pomladno enakonočje.	103
Slika 5.24: Napoved celotnega $I_h(t)$, direktnega $I_{b,h}(t)$ in difuznega $I_{d,h}(t)$ sončnega sevanja na vodoravno površino kot funkcije časa za jesensko enakonočje.	105
Slika 5.25: Optimalni trajektoriji naklona $\beta_{\text{optimalni}}(t)$ in azimuta $a_{w\text{ optimalni}}(t)$, določeni z DE in trajektoriji naklona $\beta_{\text{idealni}}(t)$ in azimuta $a_{w\text{ idealni}}(t)$ za idealno zvezno sledenje za jesensko enakonočje.	106
Slika 5.26: Primerjava izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{optimalni}}(t)$ za trajektoriji, določeni z optimizacijo in izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{idealni}}(t)$ za trajektoriji, ki zvezno sledita soncu. Primerjava je narejena za jesensko enakonočje.	107
Slika 5.27: Urni trajektoriji naklona $\beta_{\text{stopnični}}(t)$ in azimuta $a_{w\text{ stopnični}}(t)$ in trajektoriji naklona $\beta_{\text{idealni}}(t)$ in azimuta $a_{w\text{ idealni}}(t)$ za idealno zvezno sledenje za jesensko enakonočje.	108
Slika 5.28: Primerjava izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{optimalni}}(t)$ za trajektoriji, določeni z optimizacijo, izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{idealni}}(t)$ za trajektoriji, ki zvezno sledita soncu in izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{stopnični}}(t)$ za trajektoriji, ki urno sledita soncu. Primerjava je narejena za jesensko enakonočje.	109
Slika 5.29: Primerjava izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{optimalni}}(t)$ za trajektoriji, določeni z optimizacijo, izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{idealni}}(t)$ za trajektoriji, ki zvezno sledita soncu, izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{stopnični}}(t)$ za trajektoriji, ki urno sledita soncu, izračunane moči fiksne sončne elektrarne $P_{\text{fiks}}(t)$ in izmerjene moči fiksne sončne elektrarne $P^*_{\text{fiks}}(t)$. Primerjava je narejena za jesensko enakonočje.	110
Slika 5.30: Primerjava proizvedene električne energije sončne elektrarne E_{idealni} , ki zvezno sledi soncu (stolpec I), proizvedene električne energije $E_{\text{optimalni}}$, ki sledi soncu po trajektorijah, določenih z optimizacijo (stolpec II), proizvedene električne energije sončne elektrarne $E_{\text{stopnični}}$, ki urno sledi soncu in proizvedene električne energije fiksne sončne elektrarne E_{fiks} . Primerjava je narejena za jesensko enakonočje.	110
Slika A.1: Dvo-osni sledilni sistem.	122

Tabele

Tabela 2.1: Simboli, uporabljeni v izrazih (2.7).	20
Tabela 2.2: Parametri celice.	20
Tabela 2.3: Prikaz prevajanja tranzistorjev: shematska predstavitev, logični izrazi ter izhodne napetosti v posameznih vejah pretvornika.	34
Tabela 4.1: Refleksijski faktor.	60
Tabela 4.2: Parametri aproksimacijskih funkcij $K_{t-izr}(I)$ in $K_{d-izr}(I)$	68
Tabela 5.1: Nastavitve parametrov DE med optimizacijo.	81
Tabela 5.2: Povzetek rezultatov o proizvodnji električne energije sončne elektrarne in električnih izgubah zaradi sledenja za poletni solsticij.	90
Tabela 5.3: Povzetek rezultatov o proizvodnji električne energije sončne elektrarne in električnih izgubah zaradi sledenja za zimski solsticij.	97
Tabela 5.4: Povzetek rezultatov o proizvodnji električne energije sončne elektrarne in električnih izgubah zaradi sledenja za pomladno enakonočje.	104
Tabela 5.5: Povzetek rezultatov o proizvodnji električne energije sončne elektrarne in električnih izgubah zaradi sledenja za jesensko enakonočje.	111

Simboli in oznake

Poglavje 2:

Oznaka	Enota	Pomen
α	[% / °C]	temperaturni koeficient toka kratkega stika
β	[% / °C]	temperaturni koeficient napetosti odprtih sponk
γ	[% / °C]	temperaturni koeficient vršne moči
ρ_c	[Ωcm ²]	kontaktna upornost (contact resistance)
ρ_{lb}	[Ω/cm]	upornost zbiralk (line resistance busbar)
ρ_f	[Ω/cm]	upornost prstov (line resistance fingers)
ρ_t	[Ω/cm]	upornost trakov (line resistance tab)
$\rho_{s,i}$	[Ω]	upornost silicija (sheet resistance Si)
C	[μF]	kondenzator
D		dioda
D	-	prevajalno razmerje
E	[As/m ²]	gostota električnega polja
FF	-	faktor polnjenja
I	[A]	tok
I_{01} in I_{02}	[A/cm ²]	zaporni tok diode
i_C	[A]	tok skozi kondenzator
i_d	[A]	tok skozi diodo
I_{KS}	[A]	tok kratkega stika
I_l	[A]	tok sončne celice
i_L	[A]	tok skozi tuljavo
I_{max}	[A]	maksimalni tok
i_R	[A]	tok na izhodu
k	[J/K]	Boltzmannova konstanta
L	[mH]	tuljava
L_b	[cm]	dolžina celice
$L_{b,e}$	[cm]	dodatna dolžina trakov (additional tab length)
m	-	faktor kakovosti diode
n_f	-	število prstov (number of fingers)

n_s	-	število spajkanih spojev (number of solder joints/tab)
n_t	-	število trakov (number of tabs)
P	[W]	moč
p_s	-	izgube senčenja (total shadow fraction)
p_{sb}	-	izgube senčenja zaradi trakov (shadow fraction busbars)
p_{sf}	-	izgube senčenja zaradi prstov (shadow fraction fingers)
q	[As]	naboj elektrona
R_b	[Ω]	ohmske izgube zbiralk (busbar resistance loss)
R_c	[Ω]	ohmske izgube kontaktov (contact resistance loss)
R_e	[Ω]	ohmske izgube oddajnika (emitter resistance loss)
R_f	[Ω]	ohmske izgube prsta (finger resistance loss)
R_p	[Ω]	paralelna/vzporedna upornost
R_s	[Ω]	serijska/zaporedna upornost
$R_{se,pat}$	[Ω]	skupne ohmske izgube
R_t	[Ω]	ohmske izgube traka (tab resistance loss)
R_{te}	[Ω]	izgube na podaljšanju traka (tab extension loss)
R_x	[Ω]	spremenljiva upornost
S	[cm]	razdalja med prsti (finger distance)
$S_1 - S_6$	-	stikala
T	[K]	absolutna temperatura
t_b	-	učinkovitost zbiralk (effective busbar transparency)
t_f	-	učinkovitost prsta (effective finger transparency)
t_{off}	[s]	čas neprevajanja
t_{on}	[s]	čas prevajanja
T_s	[s]	interval na katerem opazujemo povprečno vrednost napetosti
U	[V]	napetost
U_1	[V]	vhodna napetost
U_2	[V]	izhodna napetost
u_A	[V]	povprečna vrednost napetosti
u_{ab}, u_{bc} in u_{ca}	[V]	medfazne napetosti med
U_d	[V]	napetost diode
U_{DC}	[V]	enosmerna napetost
u_L	[V]	napetost na tuljavi
U_{max}	[V]	maksimalna napetost
U_{OS}	[V]	napetost odprtih sponk
U_T	[V]	termična napetost
W_c	[cm]	širina celice (cell width)
W_f	[cm]	širina prsta (finger width)
W_t	[cm]	širina trakov (tab width)

Poglavje 3:

Oznaka	Enota	Pomen
β	[$^{\circ}$]	naklon ploskve
Δ		sprememba
a_w	[$^{\circ}$]	azimut ploskve
E_c	[Wh]	poraba električne energije
$i(t)$	[s]	tok
$u(t)$	[s]	napetost

Poglavje 4:

Oznaka	Enota	Pomen
Φ	[W]	izsevana moč Sonca
σ	[W/m ² K ⁴]	Stefan-Boltzmannova konstanta
δ	[$^{\circ}$]	deklinacija
α	[$^{\circ}$]	kotna višina sonca
ρ	-	refleksijski faktor površine
a_s	[$^{\circ}$]	azimut sonca
A_s	[m ²]	površina sonca
B_h	[Wh/m ²]	direktno mesečno povprečje sončnega sevanja
D_h	[Wh/m ²]	difuzno mesečno povprečje sončnega sevanja
E_t	[min]	popravek časa
h	[km]	razdalja med površjem Zemlje in zgornjo mejo ozračja
H_c	[Wh/m ²]	mesečno povprečje sončnega sevanja na poljubno usmerjeno ploskev
H_h	[Wh/m ²]	celotno mesečno povprečje sončnega sevanja
h_s	[$^{\circ}$]	urni kot
I	[W/m ²]	gostota moči sončnega sevanja
i	[$^{\circ}$]	vpadni kot sončnih žarkov
I_0	[W/m ²]	solarna konstanta
$I_{b,h}$	[W/m ²]	direktno sončno sevanje
I_c	[W/m ²]	sončno sevanje na poljubno usmerjeno ploskev
$I_{d,h}$	[W/m ²]	difuzno sončno sevanje
$I_{d,h-mer}$	[W/m ²]	izmerjene vrednosti difuznega sončnega sevanja
I_h	[W/m ²]	celotno sončno sevanje
I_{h-mer}	[W/m ²]	izmerjene vrednosti celotnega sončnega sevanja
K_d	-	faktor difuzne prepustnosti ozračja
K_t	-	faktor prepustnosti ozračja
L	[$^{\circ}$]	zemljepisna širina
l	[$^{\circ}$]	zemljepisna dolžina
l	[km]	dolžina poti sončnih žarkov

L_c	[min]	popravek časa zaradi zemljepisne širine
L_{local}	[°]	opazovana zemljepisna širina
L_{zone}	[°]	standardna zemljepisna širina
M	[W/m ²]	gostota moči sončnega sevanja
n	-	dan v letu
r_0	[km]	razdalja med Zemljo in Soncem
R_b	-	faktor nagnjenosti za direktno komponento sončnega sevanja
R_d	-	faktor nagnjenosti za difuzno komponento sončnega sevanja
R_r	-	faktor nagnjenosti za odbito komponento sončnega sevanja
r_s	[km]	polmer Sonca
r_z	[km]	polmer Zemlje
T_s	[K]	temperatura Sonca
z	[°]	zenitni kot

Poglavje 5:

Oznaka	Enota	Pomen
η	-	izkoristek sončne elektrarne
ε	[kWh]	učinkovitost sledenja sončne elektrarne
β	[°]	naklon ploskve
$\Delta\beta$	[°]	sprememba naklona ploskve
β_0	[°]	začetni naklon ploskve
Δa_w	[°]	sprememba azimuta ploskve
•fiks		fiksna postavitvev
•idealni		idealno sledenje
•optimalni		optimalno sledenje
•stopnični		stopnično sledenje
Δt_β	[°]	časovni interval med spremembami naklona
Δt_{a_w}	[°]	časovni interval med spremembami azimuta
A_{PV}	[m ²]	površina sončne elektrarne
a_w	[°]	azimut ploskve
a_{w0}	[°]	začetni azimut ploskve
CR		krmilni parameter križanja
D		število iskanih parametrov
E_C	[Wh]	poraba električne energije
E_{fiks}	[kWh]	proizvedena električna energija fiksne sončne elektrarne
E_{PT}	[kWh]	proizvedena električna energija sončne elektrarne
$E_{PT\ ideal}$	[kWh]	proizvedena električna energija zvezno vodene sončne elektrarne
$E_{PT\ opt}$	[kWh]	proizvedena električna energija optimalno vodene sončne elektrarne

$E_{\text{stopnični}}$	[kWh]	proizvedena električna energija urno vodene sončne elektrarne
F		faktor skaliranja
G		trenutna generacija
G_{max}		največje število generacij
$I_{b,h}$	[W/m ²]	direktno sončno sevanje
I_c	[W/m ²]	sončno sevanje na poljubno usmerjeno ploskev
$I_{d,h}$	[W/m ²]	difuzno sončno sevanje
I_h	[W/m ²]	celotno sončno sevanje
j		števec
NP		velikost populacije
q	-	kriterijska funkcija
VTR		zaustavitvena vrednost
\mathbf{x}		vektor parametrov

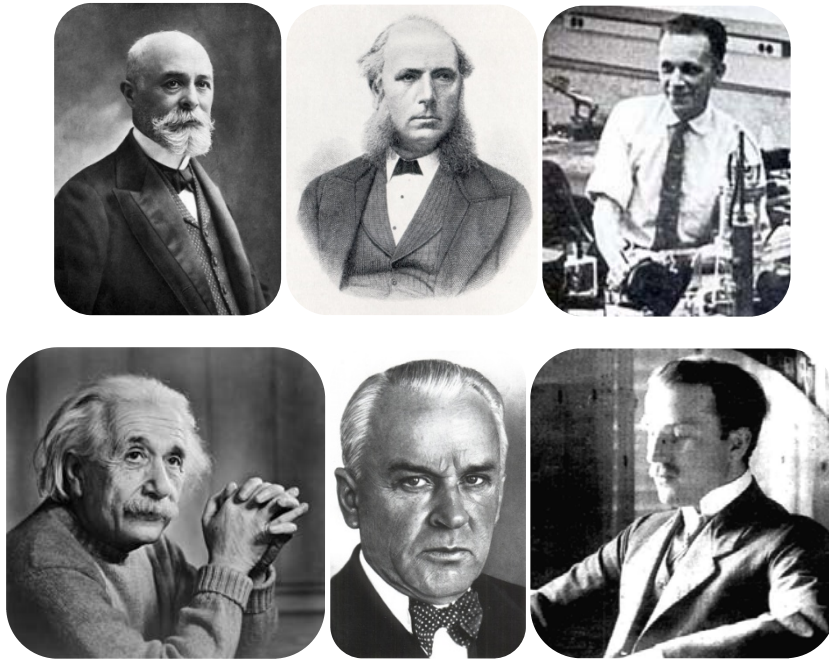
Kratice

Oznaka	Pomen
ARSO	Agencija Republike Slovenija za okolje
AU	astronomska enota
CET	centralni evropski poletni čas (Central European Summer Time)
FERI	Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko
MPPT	sledenje točki največje moči (Maximum power point tracking)
TLT	pravilni sončni čas (True local time)

1 Uvod

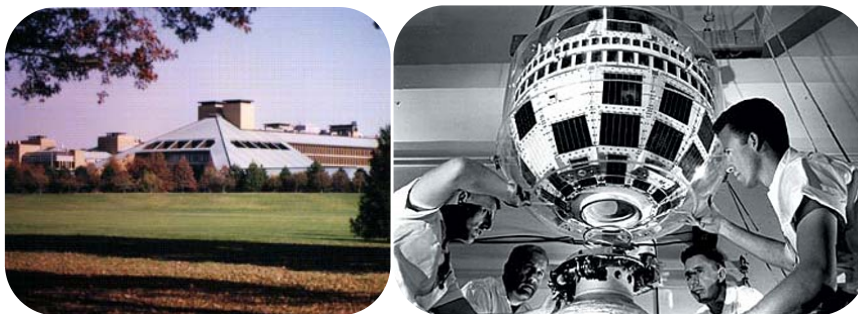
1.1 Motivacija in cilji

Fizikalni pojav, ki opisuje pretvorbe energije sončnega sevanja, natančneje energije svetlobnih delcev fotonov, v električno energijo, je leta 1839 pri svojih devetnajstih letih odkril francoski fizik Alexandre Edmond Becquerel. Pojav je odkril naključno pri eksperimentiranju z dvema kovinskima elektrodama, potopljenima v razredčeno kislino. Njegovo odkritje je ostalo bolj ali manj pozabljeno vse do leta 1873, ko je podobno odkritje uspelo Willoughby Smithu, le da tokrat za selen. Pri tem je dognal, da je prevodnost selena sorazmerna količini svetlobe, ki ji je material izpostavljen. To so bili temelji za izdelavo prve selenske sončne celice leta 1877, katere natančen opis je podal Charles Fritts leta 1883. Prve selenske sončne celice so imele izkoristek od 1 % do 2 %. Leta 1904 je fotoefekt z dvojnimi značajem svetlobe, ki jo obravnavamo kot valovanje ali kot tok delcev, teoretično razložil Albert Einstein. Vpeljal je tudi pojem svetlobnega delca, imenovanega foton. Dobro desetletje (1916) za tem je Einsteinovo teorijo praktično dokazal Robert Andrews Millikan, medtem ko je poljski znanstvenik Jan Czochralski v tem času razvil metodo za pridobivanje monokristalnega silicija. Einstein je leta 1921 dobil Nobelovo nagrado za doprinos k teoretični fiziki in posebej za odkritje ter razlago zakona o fotoefektu.



Slika 1.1: Zgoraj, od leve proti desni: Alexandre Edmond Becquerel, Willoughby Smith in Charles Fritts. Spodaj, od leve proti desni: Albert Einstein, Robert Andrews Millikan in Jan Czochralski.

Z razvojem metod za pridobivanje monokristalnega silicija je sledila tudi izdelava prve silicijeve sončne celice leta 1941. Intenzivne raziskave vesolja sredi devetnajstega stoletja so v tedanjih časih pospešile razvoj in proizvodnjo sončnih celic. Tako so leta 1954 v Bellovih laboratorijih objavili prve rezultate delovanja sončne celice s 4,5 % izkoristkom. Čez nekaj mesecev so izkoristek povečali na 6 %. Izjemno drage monokristalne sončne celice so uporabljali izključno v satelitski tehniki za preskrbo z energijo. Vanguard I, izstreljen v vesolje leta 1958, je prvi satelit, ki je kot vir električne energije uporabljal sončne celice. Med bolj znanimi sateliti v vesolju s sončnimi celicami je tudi Telstar, ki je prenašal neposredni prenos inavguracije predsednika Johna Kennedyja.



Slika 1.2: Bellov laboratorij in satelit Telstar.

Sledila je kriza, ki jo je povzročil arabski naftni embargo v začetku sedemdesetih let. Predsednik James Carter je državljane pozval k nacionalni energetske politiki, v kateri bi imela sončna energija pomembno vlogo. Cene nafte so zaradi islamske revolucije znova porasle. Tristo kilometrov

jugovzhodno od Las Vegasa sta konec sedemdesetih let nastali dve veliki polji sončnih elektrarn s paraboličnimi zrcali. V ZDA jima je sledilo še sedem takih elektrarn. Ameriška vlada je leta 1975 spodbudila raziskave na področju fotonapetostnih sistemov za uporabo na Zemlji. Vendar razvoj v tej smeri ni trajal dolgo. Cena nafte je zopet padla in gospodarstvo si je opomoglo. Sončna energija je tako postala obrobna postavka v energetske enačbi. Po kratkem zatišju je v začetku osemdesetih let proizvodnja, kot tudi uporaba sončnih celic, zopet začela naraščati. Začela so se ustanavljati podjetja in projekti, tako v Ameriki kakor tudi na Japonskem. Poleg klasičnih sončnih elektrarn so se v osemdesetih začele tudi intenzivnejše raziskave za uporabo sončnih celic na drugih področjih. Sredi osemdesetih (1985) je raziskovalcem na univerzi v Avstraliji uspelo izdelati silicijevo sončno celico, z izkoristkom večjim od 20 %. V devetdesetih so se podjetja začela združevati, in tako so nastala največja podjetja za proizvodnjo sončnih celic. V letu 2000 so prva podjetja, ki so se ukvarjala z obnovljivimi viri, vstopila na borzo [1].

V današnjem času so vse večja energetska odvisnost in negativni vplivi fosilnih goriv na okolje glavni razlogi za vnovičen zagon proizvodnje električne energije iz energije sončnega sevanja. Proizvodnja električne energije iz energije sončnega sevanja je sredi 21. stoletja strmo narasla. Tako je inštalirana moč sončnih elektrarn do leta 2011 po svetu narasla na več kot 22,8 GWp [2], medtem ko v Sloveniji na več kot 33,0 MWp (podatek Javne agencije RS za energijo). Skupna inštalirana moč sončnih elektrarn se bo povečevala, kot se bo povečeval tudi izkoristek sončnih elektrarn. Izkoristek sončne elektrarne je definiran kot razmerje med generirano električno energijo in vpadno energijo sončnega sevanja na sončne module.

V doktorski disertaciji nas zanima maksimum proizvedene električne energije iz sončne elektrarne, ki je odvisen predvsem od tega, koliko energije sončnega sevanja pade na sončne module. Koliko energije sončnega sevanja pade na sončne module, je odvisno od atmosferskih razmer v ozračju, na katere ne moremo vplivati, in od tega, pod kakšnim kotom sončni žarki padejo na modul. Maksimum proizvedene električne energije sončne elektrarne ni odvisen samo od energije sončnega sevanja, temveč tudi od vrste in kvalitete modulov, temperature in povezave panelov, impedančne prilagoditve modulov in izkoristka pretvorniških vezij.

V doktorski disertaciji smo se omejili na povečanje izplena energije sončnega sevanja, ki pade na module, s pomočjo sledilnih sistemov. Sledilni fotonapetostni sistemi sledijo poti sonca tako, da pri tem na sončne module pade čim več energije sončnega sevanja. Pri tem za svoje delovanje uporabljajo pogonske sklope, ki so porabniki električne energije. Idealni izplen energije sončnega sevanja bi bil dosežen ob zveznem sledenju sledilnega sistema trajektoriji sonca. Ker imajo pogonski sklopi končno hitrost in diskreten način sledenja, se lahko idealnemu izplenu energije sončnega sevanja le približajo.

Kako diskretno slediti trajektoriji sonca tako, da na sončne module pade čim več energije direktnega sončnega sevanja, upoštevajoč še električne izgube v obliki porabe pogonskega sklopa, še ni bilo raziskano. V okviru doktorske naloge bomo zato skušali najti povezavo med čim večjim izplenum pri pretvorbi energije sončnega sevanja v električno energijo ob diskretnem sledenju sledilnega sistema trajektoriji sonca ter danemu sledenju točki maksimalne moči in izkoristku pretvornikov, ki so upoštevani kot konstanta. V kolikor želimo to izvesti, bo potrebno opraviti podrobno analizo razpoložljive energije sončnega sevanja, ki jo prejme fotonapetostni sistem.

Prav tako tudi analizo električnih izgub pogonskega sklopa, ki se kažejo kot električna poraba, potrebna za premikanje. Pri tem si bomo pomagali z lastnim modelom za izračun energije sončnega sevanja, s katerim bomo raziskali vpliv sledenja na izplen energije sončnega sevanja. Upoštevali bomo tudi električne izgube, ki nastanejo pri sledenju pogonskega sklopa. Z analizo sledenja sledilnega sistema ugotovimo, kdaj in za koliko je potrebno v posameznem trenutku premakniti sledilni sistem, da je na koncu opazovanega intervala energijski izplen iz sončne elektrarne maksimalen.

1.2 Stanje raziskav in pregled uporabljene literature

V doktorski nalogi obravnavana tematika združuje dve področji, ki ju je v literaturi mogoče zaslediti ločeno. Ti področji sta: napoved sončnega sevanja in sistemi za sledenje sončnih modulov. Pregled literature je opravljen za vsako področje posebej, izpostavljena pa so dela tistih avtorjev, ki tej nalogi dajejo potrebno osnovo.

Najprej se osredotočimo na dela s področja napovedi sončnega sevanja. Njihova skupna lastnost je ta, da so plod fizikalno teoretičnih analiz sončnega sevanja za določeno regijo. Modele za napoved sončnega sevanja lahko razvrstimo v več skupin. V prvo skupino spadajo statistični modeli, v drugo pa deterministični modeli [3]. Nadalje lahko modele razdelimo še v kombinirane, ki so kombinacija statističnih in determinističnih modelov, ter še v modele, ki jih uporabljajo meteorologi, in niso primerni za splošno uporabo.

Pri statističnih modelih število ur sončnega sevanja povežemo z energijo sončnega sevanja. Z drugimi besedami, preprostejši statistični modeli temeljijo na dejstvu, da čim dalj sonce sije, torej čim več je sončnih ur, tem več energije sončnega sevanja bo doseglo opazovano površino na Zemlji. Najbolj razširjen in znan model za računanje energije sončnega sevanja, izraženega iz relativnega trajanja sončnega obseva, je Ångström-Prescott-Pageov [3] model iz leta 1924. Omenjeni model je tesno povezan z lokacijo na Zemlji in se spreminja glede na letni čas. Postal je osnova za vse nadaljnje raziskave na tem področju. Tako so nastali različni modeli, ki zraven ali namesto trajanja sončnega sevanja upoštevajo še druge parametre. Tako nekateri med njimi upoštevajo tudi maksimalno temperaturo, srednjo temperaturo, temperaturo tal, relativno vlažnost, oblačnost, število deževnih dni, zemljepisno širino in dolžino [4] - [39].

Med pregledovanjem literature smo naleteli na več kot 50 modelov za napoved sončnega sevanja. Izmed del, ki se ukvarjajo s statističnimi modeli, je potrebno še posebej izpostaviti dela naslednjih avtorjev: B. Y. H. Liu in R. C. Jordan [4], P. S. Koronakis [6], J. I. Jimenez in Y. Castro [7] in tudi F. H. Al-Sadah [8]. Omenjeni modeli spadajo med tako imenovane izotropne modele. Druga pomembna skupina modelov so anizotropni modeli, opisani v delih: M. Iqbal [9], R. C. Temps in K. L. Coulson [10], J. W. Buger [11], T. M. Klucher [12], Hay [13], C. J. Wilmott [14], C. C. Y. Ma in Iqbal [17], A.

Skartveit in J. A. Olseth [17], D. T. Reindl [19], T. Muneer [20] in [23], R. Perez [24] - [26] in C. Gueymard [31] in [32], ki so nadgradnja izotropnih modelov.

Sončno sevanje na vodoravno površino čez dan sta raziskala Liu in Jordan [4]. Pokazala sta, da je trajanje ur sončnega obseva v razmerju z lokalno dolžino dneva in urnim kotom. Za urni čas je bil uporabljen srednjeevropski čas in predpostavka, da je dan simetričen okrog sončnega poldneva. Rezultate Liu in Jordana sta potrdila Collares-Pereira in Rabl [40], pri čemer sta uporabila široko bazo podatkov. Model za urno sončno sevanje je razvil tudi Al-Sadah [8], pri tem je uporabil lokalni čas opazovanega dne. Pri omenjenih modelih je potrebno biti pazljiv, saj je razpoložljivo sončno sevanje za opazovano lokacijo odvisno od vremenskih pogojev kraja. Določena razmerja tako ne veljajo za vsa mesta enako, saj imajo kraji različne vremenske razmere. Srivastava in soavtorji v [41] - [43] primerjajo že omenjene metode, pri tem pa ugotavljajo, da najboljše rezultate dajejo metode Collares-Pereira in Rabl.

Deterministični modeli [44] in [45] so bolj zapleteni in upoštevajo različne vplive, ki nastanejo pri sipanju in absorpciji sončnega sevanja skozi ozračje. Sipanje in absorpcijo povzročajo različne sestavine v zraku (plini, aerosoli), ki pri različnih valovnih dolžinah različno močno vplivajo na sevanje. Za sončno sevanje največkrat obravnavajo pet vplivov: vpliv ozona, ki predvsem na vrhu ozračja absorbira ultravijolično svetlobo; vpliv vodne pare, saj se njena gostota iz dneva v dan zelo spreminja; vpliv absorpcij v suhem delu zraka; vpliv ozračja na razprševanje svetlobe in vpliv aerosolov (prahu, drobnih kapelj v ozračju). Za podrobno obravnavo bi pri omenjenih modelih morali računati svetilnost za vsako valovno dolžino sončne svetlobe posebej. Postopek determinističnega računanja je precej zapleten, zato ga v tem delu le navajamo.

Če v model za napoved sončnega sevanja vključimo več parametrov, zahtevnost problema povečamo. V takih primerih se je pokazala velika uporabnost umetnega nevronskega omrežja. Umetno nevronske omrežje predstavlja orodje za reševanje realnih problemov, za katere klasične (analitične) metode ne zadostujejo. Dela avtorjev, ki so umetna nevronska omrežja vključili v modele za napoved sončnega sevanja, so podana v [46] - [50]. Umetno nevronske omrežje lahko poišče skrite relacije, vzorce in trende med podatki, ki bi jih ljudje lahko spregledali. Z odkrivanjem informacij ustvari novo znanje ter zaznava nepravilnosti in izjemnosti, ki izhajajo iz velike količine podatkov. Umetno nevronske omrežje klasificira, organizira in povzema podatke ter dela napovedi.

Avtorji v [51] pravijo, da umetna nevronska omrežja na splošno dajejo boljše napovedi sončnega sevanja v primerjavi s statističnimi linearnimi metodami, zlasti tistimi, kjer se analizirajo nelinearni problemi. V [52] so avtorji uporabili model nevronskega omrežja za napoved sončnega sevanja na področjih, ki niso zajeta z neposrednim meritvami. Lokacija, mesec, povprečni tlak, povprečna temperatura, srednja relativna vlažnost, povprečna hitrost vetra in povprečno trajanje sončnega obsevanja so uporabili kot vhodni podatek v omrežje. S tem napovedujejo sončno obsevanje s 93 % natančnostjo.

Proizvedena električna energija sončne elektrarne je odvisna predvsem od razpoložljivega sončnega sevanja, ki doseže sončne module, kakovosti in vrste uporabljenih sončnih modulov, njihove temperature, DC/DC pretvornika in DC/AC razsmernika. Na gostoto moči sončnega sevanja, ki doseže zemeljsko površino, ne moremo neposredno vplivati, saj je odvisna predvsem od razmer v atmosferi in geografske lege. Gostota moči sončnega sevanja, ki doseže površino sončnih modulov, je največja, kadar žarki padejo pravokotno na normalo površine modula. Slednje dosežemo s pravilno uporabo in vodenjem pogonskega sklopa sledilnega sistema.

Različni tipi sončnih modulov in njihova uporabnost so predstavljeni v [53] in [55], medtem ko je vpliv temperature modulov na izkoristek pretvorbe predstavljen v [56] in [57]. Ob znanih tehnologijah in drugih vplivih na sončne module je izkoristek pretvorbe energije sončnega sevanja v električno energijo odvisen predvsem od impedančne prilagoditve. Z drugimi besedami to imenujemo tudi doseganje točke maksimalne moči (Maximum Power Point Tracking – MPPT). Mnogi članki med njimi [57] – [65] predstavljajo optimizacijo električnih parametrov, da bi dosegli maksimum proizvodnje električne energije iz sončne elektrarne s pomočjo MPPT sistema.

Tako se drugo področje, ki je vključeno v doktorsko disertacijo, nanaša na sisteme za sledenje sončnih modulov trajektoriji sonca. Sledilni sistemi, ki omogočajo sledenje sončnih modulov soncu, so elektromehanski sistemi. Sledilne sisteme ločimo glede na način sprejemanja energije sončnih žarkov, in sicer na: sledilni sistemi brez koncentradorjev oziroma klasične sledilne sisteme in sledilne sisteme s koncentradorji. Za nas zanimivi klasični sledilni sistemi sprejemajo energijo sončnih žarkov neposredno na sončne module. Tovrstni sistemi se nadalje ločijo še glede na število prostostnih stopenj. Tako poznamo enoosne [66] - [73] in dvoosne [74] - [83] sledilne sisteme. Enoosni sledilni sistemi, kot že ime pove, sledijo trajektoriji sonca s premikanjem okoli ene osi, najpogosteje od vzhoda proti zahodu. Dvoosni sledilni sistem je v primerjavi z enoosnim lahko preciznejši, saj sledi trajektoriji sonca s premikanjem v dveh oseh, vzhod-zahod in sever-jug. Dvoosni sledilni sistem za svoje delovanje uporablja dva pogonska sklopa, ki sta običajno neodvisna med seboj.

Pri pogonskih sklopih, tako pri enoosnem kot tudi pri dvoosnem sledilnem sistemu, potrebujemo ustrezn sistem vodenja. Za sledilne sisteme se najpogosteje uporablja zaprtozančni [84] in odprtozančni [85] sistem vodenja. Zaprtozančni sistem vodenja uporablja enega ali več fotosenzorjev za svoje delovanje. Tako fotosenzor pošilja signal krmilni enoti za premik osi sledilnega sistema. Odprtozančni sistem vodenja uporablja matematični algoritem, ki je naložen/zapisan v krmilniku procesorja in skrbi za krmiljenje položaja osi sledilnega sistema. Položaj posamezne osi sledilnega sistema se tako določa glede na izračunan položaj Sonca, meritve sončnega sevanja se v tem primeru ne izvajajo. Kombinacija zaprtozančnega in odprtozančnega sistema vodenja predstavlja tako imenovani hibridni sistem vodenja. Dvoosni sledilni sistem s hibridnim sistemom vodenja je predstavljen v [86]. Pri tem odprtozančni sistem vodenja temelji na napovedi sončnega sevanja, medtem ko zaprtozančni sistem vodenja primerja izračunano in napovedano energijo sončnega sevanja. S tem zagotavljamo potrebno točnost sledilnega sistema, hkrati pri tem ostajajo električne izgube pogonskega sklopa na sprejemljivi ravni.

Avtorji v [67] so predstavili svojo rešitev za sledilni sistem, medtem ko se avtorji v [75] ukvarjajo z optimalnim naklonom in azimutom za fiksne postavitve sončnih elektrarn. Rezultati meritev, predstavljeni v [67] in [75], kažejo na od 22 % do 29 % povečanje dnevne proizvodnje električne energije ob nadgradnji fiksnega sistema s sistemom za sledenje. Vendar v omenjenih primerih avtorji ne podajajo opisa sistemov za vodenje sledilnih sistemov.

Cenovno ugodnejši enoosni tripoložajni sledilni sistem s koncentradorji je obravnavan v [69]. Sistem omogoča namestitve enega sončnega modula in ob tem spremeni položaja le trikrat v dnevu.

Avtorji v [87] - [90] predstavljajo optimalno sledenje azimutnega sledilnega sistema trajektoriji sonca. Pri tem je cilj avtorjev maksimalno povečanje proizvedene električne energije sončne elektrarne z azimutnim sledilnim sistemom ob minimalnem številu premikov. Optimizacija je določena za en dan, s primerjavo karakteristik, dobljenih pri različnem številu premikov. Rezultati bi morali dati odgovor na vprašanje, kdaj in za koliko stopinj bi bilo potrebno spremeniti azimut, da bi bila proizvodnja električne energije maksimalna.

V [91] - [101] se avtorji ukvarjajo z načrtovanjem in optimizacijo sistemov za sledenje. Pri tem uporabljajo dinamične (multi-body) modele sledilnih sistemov skupaj z dinamičnimi modeli pogonskih sklopov in vodenja, ki jih drugače imenujejo virtualni modeli oziroma virtualni prototipi. Pri tem uporabljajo že znane modele za izračun sončnega sevanja. Omenjena orodja se uporabljajo za načrtovanje in zvezno vodenje enoosnih sledilnih sistemov. Optimizacija se izvaja, da bi dosegli največjo proizvedeno električno energijo v časovnem intervalu nekaj dni, glede na začetni in končni položaj sledilnega sistema, kot tudi vrnitev v prvotno lego. Avtorji pri tem pokažejo proizvedeno električno energijo sončne elektrarne in električne izgube pogonskega sklopa sledilnega sistema.

Pri pregledovanju literature nismo zasledili, da bi avtorji za optimizacijo trajektorij sledilnega sistema uporabili katero izmed stohastičnih optimizacijskih metod. Ena izmed stohastičnih optimizacijskih metod, ki je primerna za tovrstno reševanje, je tudi Diferenčna evolucija (DE) [102]. Avtorji v [103] – [105] so DE uporabili za reševanje različnih nelinearnih optimizacijskih problemov, ki pa s sledilnimi sistemi nimajo neposredne povezave.

V doktorski disertaciji je obravnavan dvoosni sledilni sistem za sledenje sončnih modulov trajektoriji sonca. Pri tem je predstavljena nova metoda za optimalno sledenje trajektoriji sonca, ki upošteva tudi izgube pogonskega sklopa dvoosnega sledilnega sistema. Cilj optimalnega sledenja je maksimalna pretvorba energije sončnega sevanja v električno energijo glede na električne izgube pogonskega sklopa. Določitev trajektorije sledilnega sistema predstavlja v optimizaciji nelinearni in omejen problem, kjer ciljna funkcija ni na voljo v eksplisitni obliki. Za optimizacijski postopek se je uporabila stohastična metoda, imenovana Diferenčna evolucija. Pri tem je ciljna funkcija podana z napovedjo razpoložljivega sončnega sevanja, izgubami pogonskega sklopa in izkoristkom sončne elektrarne. Omejitve problema predstavljajo konstantna hitrost premikanja in minimalna sprememba kota premika pogonskega sklopa sledilnega sistema. Podani rezultati kažejo, da je optimalna trajektorija sledilnega sistema odvisna predvsem od razpoložljivega

sončnega sevanja, izkoristka sončne elektrarne, izgub pogonskega sklopa in omejitev, ki jih upoštevamo v sami optimizaciji.

1.3 Znanstveni prispevki

Izhodišča raziskav, ki jih bomo opravili v doktorski disertaciji, se nanašajo na že opravljene rezultate teoretičnega in praktičnega dela raziskovalcev, ki so svoja dela objavili v predstavljeni literaturi. Literature, ki se nanaša na napoved energije sončnega sevanja, je veliko; dosti manj pa je tiste, ki se osredotoča na optimalno sledenje sledilnega sistema poti sonca. Izmed vseh objav je največ tistih, pri katerih so pokazani primeri, kako število in interval preklpov vplivata na proizvodnjo električne energije sončnih elektrarn, pri tem pa električne porabe oziroma električnih izgub pogonskega sklopa ne upoštevajo. V številnih objavah v literaturi so izgube pogonskega sklopa določene, niso pa eksplicitno vezane na pogon sledilnega sistema sončne elektrarne. Tako nobeno delo ne zajema hkrati vpliva števila in intervalov preklpov pogonskega sklopa in električnih izgub, ki pri tem nastanejo in vplivajo na proizvedeno električno energijo sončne elektrarne. Prav tako se nobeno delo ne ukvarja z določitvijo števila in intervalov preklpov pogonskega sistema z uporabo optimizacijskega algoritma in kriterijske funkcije, s čimer so v tej doktorski disertaciji določene optimalne trajektorije sistema sledenja.

Sledenje fotonapetostnega sistema soncu namreč omogoča, da pri tem na sončne module pade čim več razpoložljive energije sončnega sevanja. Idealni izplen razpoložljive energije sončnega sevanja bi bil dosežen ob zveznem sledenju poti sonca. Ker imajo pogonski sklopi končno hitrost in diskreten način sledenja, se lahko idealnemu izplenu energije sončnega sevanja le približajo. Kako diskretno slediti poti Sonca, da na sončne module pade čim več razpoložljive energije sončnega sevanja, pri čemer upoštevamo še električne izgube pogonskega sklopa, je pokazano v tem delu. V okviru dela je narejena povezava med čim večjim izplenom pri pretvorbi razpoložljive energije sončnega sevanja v električno energijo. Zato potrebujemo model za napoved sončnega sevanja, ki bo čim bolj natančno opisal energijo sončnega sevanja. V okviru doktorske disertacije je razvit model za napoved sončnega sevanja v obliki časovno odvisne funkcije. Model preko dolgoročnih meritev sončnega sevanja upošteva vpliv atmosfere in je narejen za napoved sončnega sevanja za jasne dni brez oblakov. Sončno sevanje v obliki časovno odvisne funkcije smo uporabili kot vhodni podatek v optimizaciji za določitev optimalnih trajektorij sledilnega sistema. Pri tem upoštevamo tudi same omejitve pogonskih sklopov, ki se kažejo v končni hitrosti premikanja in minimalni spremembi kota, ki ne sme biti manjša od dveh stopinj. Tako s pomočjo optimizacije določimo, kdaj in za koliko je potrebno premakniti sledilni sistem, da je na koncu opazovanega intervala energijski izplen iz fotonapetostnega sistema maksimalen.

V doktorski disertaciji so predstavljeni naslednji izvirni znanstveni prispevki:

- model za napoved gostote moči sončnega sevanja v poljubni točki na površini Zemlje, pri čemer sta gostoti moči celotnega in razpršenega sevanja predstavljeni kot funkciji dolžine poti sončnih žarkov skozi atmosfero;
- aproksimaciji faktorjev prepustnosti ozračja z eksponentnima funkcijama in določitev parametrov aproksimacijskih funkcij na osnovi rezultatov večletnih meritev;
- model za časovno odvisno napoved gostote moči sončnega sevanja na poljubno orientirani površini;
- na meritvah temelječ dinamični model sledilnega sistema in model za izračun porabe energije v sledilnem sistemu;
- na Diferenčni evoluciji temelječ postopek za določitev optimalnih trajektorij naklonskega kota in azimuta, ki ob upoštevanju porabe energije v sistemu sledenja omogoča največjo dnevno proizvodnjo električne energije.

1.4 Pregled po poglavjih

Doktorska disertacija obravnava problematiko fotonapetostnih elektrarn s sistemom za sledenje soncu. Pri tem so s pomočjo optimizacije določene tiste trajektorije naklonskega kota in azimuta, pri katerih je dnevna proizvodnja električne energije največja, upoštevajoč porabo električne energije za premikanje sledilnega sistema.

V drugem poglavju predstavimo celovit, vendar ne poglobljen opis vseh elementov sončne elektrarne. Tako so opisani posamezni elementi sončne elektrarne – vse od sončnih celic, modula, panela ter polja in nato še pretvornikov za impedančno prilagoditev, vse do razsmernikov za pretvorbo enosmernih električnih veličin v izmenične. Najprej so podane fizikalne osnove delovanja in matematični model sončne celice. S pomočjo matematičnega modela sončne celice so opisani različni parametri, ki vplivajo na samo delovanje. Sledi shematična predstavitev principa delovanja pretvornikov navzgor in navzdol, ki skrbijo za impedančno prilagoditev, in enofaznih ter trifaznih razsmernikov. Poglavje se zaključuje s predstavitev različnih povezav razsmernikov na javno električno omrežje.

V tretjem poglavju sledi predstavitev različnih izvedb sledilnih sistemov za sledenje sončnih modulov poti sonca. Pri tem je podrobneje opisan dvoosni sledilni sistem, ki je uporabljen v doktorski disertaciji. Spremembe naklonskega kota in azimuta dosežemo z vklapljanjem in izklapljanjem pogonskih sklopov. Na osnovi meritev so določene časovno odvisne karakteristike sprememb naklonskega kota in azimuta sledilnega sistema, ki jih v nadaljevanju uporabimo za predstavitev dinamičnega obnašanja sledilnega sistema. Na osnovi meritev so določene tudi karakteristike porabe električne energije, ki so odvisne od posameznih sprememb naklonskega

kota in azimuta. Vse omenjene karakteristike uporabimo kot model sledilnega sistema pri določitvi optimalnih trajektorij naklonskega kota in azimuta.

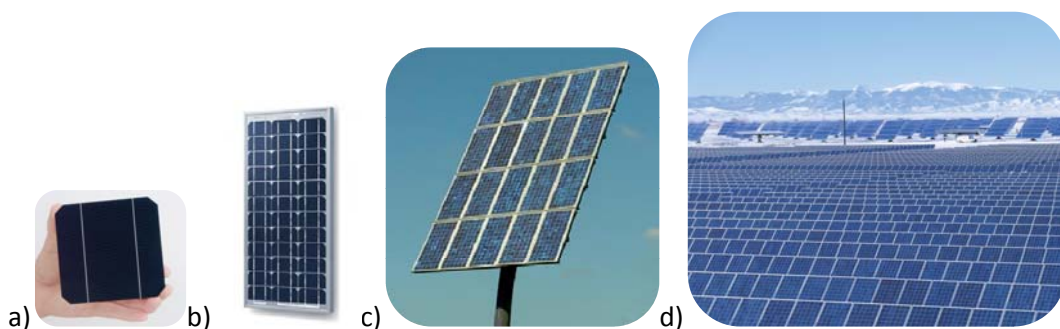
V četrtem poglavju se posvetimo modelom za napoved časovno odvisnega sončnega sevanja na poljubno usmerjeno površino. V začetku poglavja so za lažje razumevanje najprej podane osnovne geometrijske relacije med Soncem in Zemljo. Nato se posvetimo metodam za napoved sončnega sevanja izven zemljine atmosfere, ki temeljijo na opisu spreminjanja relativnega položaja Zemlje in Sonca. Sledijo modeli za napoved energije sončnega sevanja na poljubno usmerjeno površino, kjer s pomočjo dolgoročnih meritev sončnega sevanja upoštevamo še vpliv atmosfere. Modeli za napoved energije sončnega sevanja so podani za mesečna in dnevna povprečja. Pri tem velike težave povzročajo absorpcija moči sončnih žarkov v atmosferi. Tako sončno sevanje na površini Zemlje zapišemo kot vsoto direktnega in difuznega sončnega sevanja. Na osnovi analize rezultatov večletnih meritev ju predstavimo kot funkciji dolžine poti sončnih žarkov skozi atmosfero in ju aproksimiramo z eksponentnima funkcijama. Koeficiente aproksimacijskima funkcijama določimo tako, da je srednji kvadratični pogrešek odstopanja med izmerjenim in izračunanim direktnim in difuznim sončnim sevanjem minimalen. Pri tem se upoštevajo izključno vrednosti meritev za sončne dni brez oblakov. Na opisani način vpeljana faktorja prepustnosti ozračja nam ob znanem časovnem poteku sončnega sevanja izven atmosfere omogočata določitev časovno odvisnega sončnega sevanja na poljubno usmerjeno površino v poljubni točki na Zemlji.

Poraba električne energije sledilnega sistema in napoved sončnega sevanja v obliki časovno odvisne funkcije sta vhodna podatka za določitev naklonskega kota in azimuta sledilnega sistema. Tako je jedro doktorske disertacije zbrano v petem poglavju, kjer določamo trajektorije sledilnega sistema, ki ob upoštevanju porabe električne energije omogočajo največjo dnevno proizvodnjo električne energije sončne elektrarne. Trajektorije sledilnega sistema so določene z optimizacijo. Optimizacija je izvedena z uporabo Diferenčne evolucije, ki določi začetni vrednosti naklonskega kota in azimuta, hkrati pa določi vrednosti posameznih sprememb naklonskega kota ter čase, v katerih naj te spremembe nastopijo. Postopek optimizacije je temeljito opisan v prvem podpoglavju petega poglavja. Sledijo ji štirje praktični primeri, kjer z optimizacijo iščemo trajektorije sledilnega sistema za poletni in zimski solsticij ter pomladno in jesensko enakonočje.

Doktorsko disertacijo zaključimo s sklepnimi mislimi in zbranimi izvirnimi znanstvenimi prispevki v šestem poglavju.

2 Sončne elektrarne

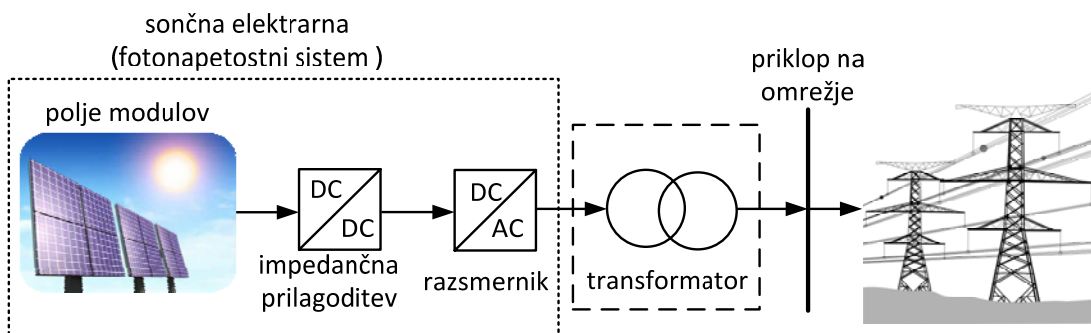
Ob uporabi izrazoslovja, ki je v skladu s standardom SIST-TP IEC TR 61836, lahko rečemo, da fotonapetostni sistemi pretvarjajo energijo vidnega dela spektra sončnega sevanja neposredno v električno energijo. Osnovni gradnik vsakega fotonapetostnega sistema je sončna celica (slika 2.1 a), ki generira električno moč, ko je izpostavljena sončnemu sevanju (IEC 60904-3). Več med seboj povezanih sončnih celic tvori modul (slika 2.1 b). Modul predstavlja najmanjšo, pred vplivi okolja zaščiteno celoto (IEC 60904-3 in IEC 61277). Skupina med seboj električno in mehansko povezanih modulov, ki tvorijo električno in mehansko zaključeno celoto, je panel (IEC 61277). Panel (slika 2.1 c) je namenjen kot inštalacijska enota polja (slika 2.1 d). Polje je mehansko zaključena celota modulov skupaj z nosilno strukturo, vendar brez temeljev, sledilnih mehanizmov, elementov termičnega nadzora in drugih podobnih elementov, ki tvorijo enoto za proizvodnjo električne energije v sistemu enosmernega toka (IEC 61277). Če polju panelov, ki tvori enoto za proizvodnjo električne energije v sistemu enosmernega toka, dodamo še DC/DC pretvornik za impedančno prilagoditev, DC/AC razsmernik za pretvorbo enosmernih električnih veličin v izmenične in algoritem za doseganje točke največje moči polja, dobimo fotonapetostni sistem oziroma sončno elektrarno.



Slika 2.1: Osnovni gradniki fotonapetostnega sistema. a) sončna celica, b) sončni modul, c) panel in d) polje.

Sončna elektrarna za svoje delovanje potrebuje porabnik oziroma ponor energije. Glede na način priključitve porabnika ločimo sončne elektrarne na elektrarne, ki niso namenjene za vzporedno obratovanje z javnim električnim omrežjem, in elektrarne, ki so priključene na javno električno omrežje. Sončne elektrarne, ki niso namenjene za vzporedno obratovanje z javnim električnim omrežjem, se pogosto uporabljajo za oskrbo porabnikov z električno energijo na težje dostopnih

krajih, za napajanje odročnih komunikacijskih postaj, napajanje vodnih črpalk in podobno. Tovrstne elektrarne, ki jih imenujemo tudi otočne sončne elektrarne, potrebujejo za fleksibilno obratovanje ustrezno akumulatorsko baterijo in regulator polnjenja. Otočne elektrarne niso neposredno predmet obravnavane doktorske disertacije in jih v nalogi ne bomo podrobneje obravnavali. Sončne elektrarne, ki so priključene na javno električno omrežje, imenujemo tudi omrežne sončne elektrarne; te so priključene vzporedno na električno omrežje in ne potrebujejo akumulatorske baterije in regulatorja polnjenja. Celotno proizvedeno električno energijo ali samo njen del oddajajo neposredno v električno omrežje. Osnovni način priključitve omrežne sončne elektrarne skupaj z njenimi gradniki je shematsko prikazan na sliki 2.2.



Slika 2.2: Osnovni način priključitve sončne elektrarne na električno omrežje.

Glavni elementi vsake omrežne sončne elektrarne so: polje panelov, DC/DC pretvornik in DC/AC razsmernik. Z ustrezno vezavo panelov, ki so izpostavljeni sončnemu sevanju, v polje, dosežemo na izhodu ustrezno amplitudo enosmerne napetosti. DC/DC pretvornik po eni strani prilagaja amplitudo izhodne enosmerne napetosti polja panelov zahtevani vrednosti vhodne enosmerne napetosti DC/AC razsmernika, ki je potrebna za razmerjanje. Po drugi strani DC/DC pretvornik skrbi tudi za impedančno prilagoditev polja panelov. Pri tem poskrbi, da polje ves čas čuti takšno upornost, da moduli v panelih obratujejo ves čas v točki največje moči. DC/AC razsmernik enosmerno napetost na svojem vhodu razmeri v izmenično napetost na izhodu. Pri tem se pogosto uporablja pulzno širinska modulacija. Izhodno napetost razsmernika zgladi izhodni filter, ki je pasovno propustno sito in prepušča napetost osnovne harmonske komponente. Izhodni filter je lahko priključen direktno na električno omrežje ali pa je nanj priključen preko transformatorja, kot je to prikazano na sliki 2.2. V primeru uporabe transformatorja ta poskrbi za amplitudno prilagoditev napetosti na izhodu razsmernika omrežni napetosti, v nasprotnem primeru, ko transformatorja ni, za to poskrbi DC/DC pretvornik.

Proizvedena električna energija sončne elektrarne je odvisna predvsem od razpoložljivega sončnega sevanja, ki doseže sončne module. S pomočjo sledilnega sistema zagotovimo, da čim več energije sončnega sevanja pade na aktivno površino sončnega modula. Izkoristek same pretvorbe sončne energije v električno je definiran kot razmerje med generirano električno močjo sončne elektrarne in zmnožkom aktivne površine sončnega polja ter gostote moči vpadnega sončnega sevanja. Izkoristek pretvorbe je odvisen predvsem od vrste in kvalitete modulov, temperature in povezave panelov, impedančne prilagoditve, DC/DC pretvornika in DC/AC razsmernika. V doktorski disertaciji smo osredotočeni predvsem na povečanje gostote moči sončnega sevanja na

površini modulov z ustreznim spreminjanjem le-teh, zato bomo za ostale parametre, ki vplivajo na izkoristek pretvorbe sončne energije v električno, podali le kratke opise.

Če se omejimo na povečanje gostote moči sončnega sevanja, ki doseže površino modulov, lahko le-tega povečamo na dva načina. Prvi način je pravilna izbira absorpcijskih materialov, ki s tem absorbirajo čim več energije sončnega sevanja. Drugi način, ki je predmet naloge, je povečanje gostote moči sončnega sevanja na površini modulov s pomočjo sledilnega sistema.

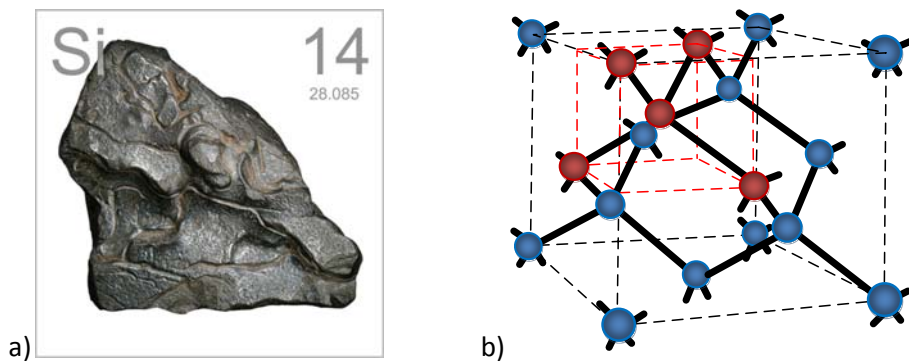
Da bomo lažje razumeli delovanje sončne elektrarne s sledilnim sistemom, v poglavju 2 podajamo kratek pregled osnovnih gradnikov vsake omrežne sončne elektrarne. V nadaljevanju je najprej opisana sončna celica in parametri, ki vplivajo na samo delovanje. Sledijo pretvorniška vezja: DC/DC pretvornik in DC/AC razsmernik, potrebna za ustrezno amplitudno prilagoditev in algoritem za vodenje v točki največje moči.

2.1 Sončna celica

Sončna celica je osnovni element, ki energijo sončnega sevanja, natančneje energijo fotonov, pretvori neposredno v električno energijo.

2.1.1 Fizikalne osnove delovanja sončne celice

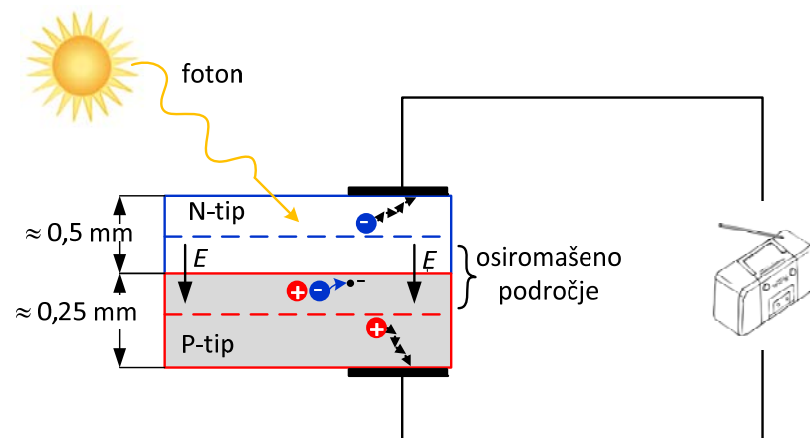
Osnovno delovanje sončne celice bomo opisali na modelu silicijeve kristalne mreže. Čist silicij, prikazan na sliki 2.3 a kot material za sončne celice in tudi polprevodniške elemente, nima primernih lastnosti, kar se nanaša predvsem na električno prevodnost. V primeru, da dodamo na zunanji ovojnici silicijevega atoma en elektron več oziroma en elektron manj, kot jih ima silicij, lahko dosežemo željene lastnosti. Pogosto kot primesi dodajamo bor ali fosfor. Ko dodamo bor, dobimo presežek vrzeli, v primeru; ko dodamo fosfor, dobimo presežek elektronov. V monokristalu silicija tvorijo atomi kristala mrežo v obliki kocke, pri čemer je vsak atom povezan s štirimi sosednjimi atomi preko štirih valentnih elektronov, kot je simbolično prikazano na sliki 2.3 b [107].



Slika 2.3: Kemijski element silicij in kristalna mreža silicijevih atomov.

Kot smo omenili, za sončne celice ne uporabljamo čistega silicija, temveč silicij s primesmi. Eno vrsto predstavljajo atomi, ki imajo več elektronov kot silicij. Polprevodnik, ki nastane na tak način, se imenuje polprevodnik tipa N. V drugo vrsto spadajo tisti, ki imajo manj elektronov od atoma silicija. Nastali polprevodnik se imenuje polprevodnik tipa P. Če polprevodnika tipa P in N »združimo«, nastane PN-spoj.

Za PN spoj je značilno, da dobimo vgrajeni električni potencial (električno polje), ki se razteza v prehodnem področju v bližini spoja, kar je na sliki 2.4 ponazorjeno z gostoto električnega polja E . Če vstopajo fotoni z dovolj veliko energijo, ki je večja od energijske reže med valenčnim in prevodnim pasom, za silicij je to 1,1eV, potem iz valenčnih elektronov ustvarjamo proste elektrone (na sliki 2.4 ponazorjeno z minus), za sabo pa puščajo praznine ali tako imenovane vrzeli. Oba, elektron in vrzel, se kot naboj lahko gibljeta in pod vplivom električnega polja tudi potujeta izven osiromašenega področja, ki je označeno na sliki 2.4. Ta pojav imenujemo tudi fotoefekt. Pod vplivom električnega polja se elektroni pomikajo v N-tip polprevodnika, vrzeli pa potujejo v nasprotno smer iz zaporne plasti in se nabirajo v območju P-tipa. Zaradi vedno več sproščenih elektronov v vrzeli iz zaporne plasti se v N-tipu pojavlja presežek negativnega naboja, v P-tipu pa presežek pozitivnega naboja. Posledica je električna napetost, imenovana tudi zaporna napetost, ki se pojavi med priključnima sponkama sončne celice, kot je prikazano na sliki 2.4.



Slika 2.4: Prerez sončne celice.

Če je sončna celica izpostavljena svetlobi z dovolj veliko energijo in če je med priključnima sponkama sončne celice breme/porabnik, se proces zbijanja elektronov nadaljuje in sončna celica ves čas generira enosmerni električni tok. Generiran enosmerni električni tok je sorazmeren z gostoto moči sončnega sevanja na sončno celico. V primeru, ko kratko sklenemo sponki sončne celice, dobimo tok kratkega stika.

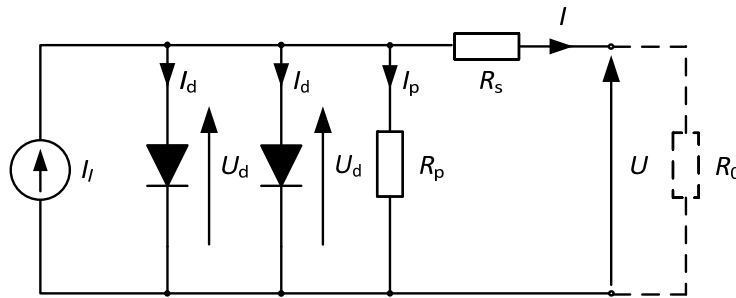
Na pretvorbo električne energije sončne celice vplivajo številni dejavniki, kot so: razpoložljiva gostota moči sončnega sevanja, kontaktne mreže, notranja upornost, refleksija. Gostota moči sončnega sevanja z večanjem valovne dolžine svetlobe pada, največja valovna dolžina, pri kateri ima svetloba še dovolj energije, da zbija elektrone v sončni celici, je odvisna predvsem od uporabljenih materialov. Sevanje z večjo valovno dolžino povzroča le segrevanje sončne celice, kar negativno vpliva na izkoristek le-te. Lastne izgube sončne celice so odvisne predvsem od kontaktne mreže, notranje upornosti in refleksije sončnega sevanja na površino celice. Da bomo prikazali vpliv različnih parametrov na delovanje sončne celice, bomo najprej opisali matematični model sončne celice.

2.1.2 Matematični model sončne celice

Razmere v sončni celici najlažje opišemo s pomočjo matematičnega modela sončne celice. Poznamo dva osnovna matematična modela sončne celice: poenostavljen in realni matematični model sončne celice. Za nas nesporejmljiv poenostavljen model sončne celice sestavljata dioda in tokovni izvor, ki sta vezana vzporedno. Realni model sončne celice, katerega bomo tudi opisali, upošteva razen serijske upornosti še izgube v sončni celici.

2.1.2.1 Nadomestno vezje sončne celice

Realni model sončne celice upošteva zraven diode in tokovnega izvora še serijsko/zaporedna upornost R_s in paralelna/vzporedno upornost R_p , katerih posledica so padec napetosti realne sončne celice in parazitni toki. Serijska upornost R_s je odvisna od materiala in izdelave sončne celice, medtem ko je paralelna upornost R_p odvisna od kvalitete in prevodnosti celice. Nadomestno vezje sončne celice je prikazano na sliki 2.5, z matematičnim opisom za tok I (2.1) [108] in s Shockley-jevo enačbo za tok diode (2.2) [108].



Slika 2.5: Nadomestno vezje sončne celice.

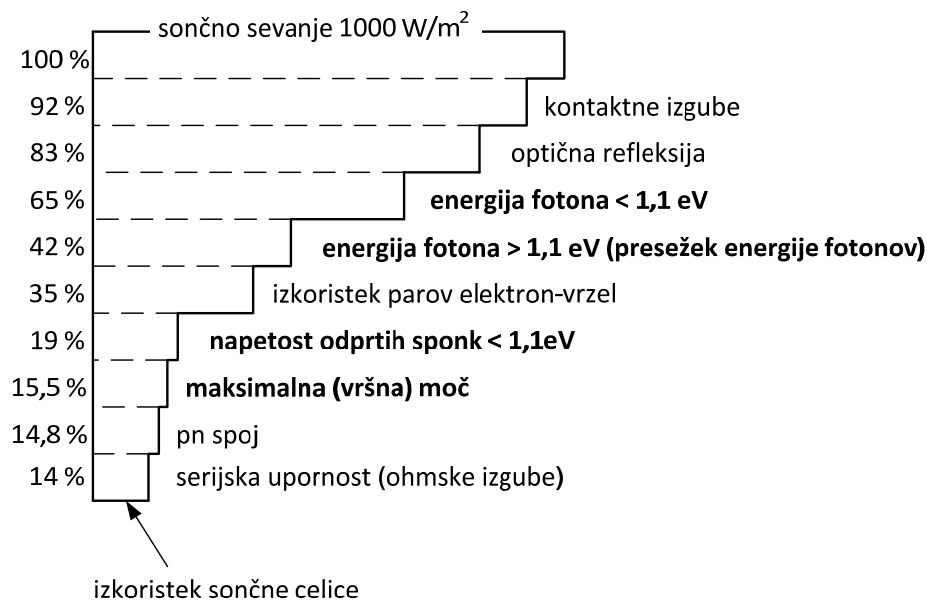
$$I = I_l - I_{01} \left(e^{\frac{U_d}{U_T}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{U_d}{2U_T}} - 1 \right) - \frac{U_d}{R_p} \quad (2.1)$$

$$U_d = U + R_s I \quad (2.2)$$

Kjer sta z I_{01} in I_{02} označena zaporna toka diod, I_l označuje tok sončne celice, U_T je termična napetost $U_T = mkT/q$, U_d napetost diode, R_p je paralelna/vzporedna upornost, R_s pa označuje serijsko/zaporedno upornost. m je faktor kakovosti diode, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K je Boltzmannova konstanta, T je absolutna temperatura v Kelvinih, $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ As pa je naboj elektrona. Tok in napetost na izhodu nadomestnega vezja sončne celice sta označena z I in U .

2.1.2.2 Izgube v sončni celici

Glede na omenjeno so izgube v sončni celici odvisne predvsem od svetlobnega spektra sončnega sevanja, kontaktne mreže, notranje upornosti in refleksije. Da bi lažje razumeli izgube v sončni celici, je na sliki 2.6 grafično prikazana razčlenitev izgub v realni monokristalni sončni celici, ki je povzeta po [108]. Na sliki 2.6 je prikazano, kako se energija vpadnega sončnega sevanja izgubi še pred pretvorbo v električno energijo v sončni celici. Izgube, na sliki 2.6 označene s krepko pisavo, so osnovne izgube vsake sončne celice.



Slika 2.6: Prikaz izgub sončne celice.

Če na kratko opišemo posamezne izgube iz slike 2.6, lahko rečemo, da največji delež izgub predstavljajo fotoni s premajhno energijo in fotoni s presežkom energije. Fotoni s premajhno energijo, energija je manjša od 1,1 eV, nimajo dovolj energije za vzbujanje elektronov v sončni celici. Fotoni s presežkom energije, energija je večja od 1,1 eV, imajo dovolj energije za nastanek parov elektron-vrzel v sončni celici, vendar pri tem ne more izkoristiti celotne energije. V obeh navedenih primerih se energija sprošča v obliki toplote.

Pričakovali bi, da pri normalnih pogojih obratovanja dosežemo napetost odprtih sponk, ki za silicijevo sončno celico znaša 1,1 eV. Vendar je napetost odprtih sponk za realno sončno celico vedno nižja od 1,1 eV. Trenutno najvišja vrednost napetosti odprtih sponk je dosežena pri 0,705 V [108].

Maksimalna moč sončne celice je produkt toka in napetosti. Ker UI karakteristika sončne celice ni pravokotna, ampak je eksponentno odvisna. Produkt maksimalnega toka in napetosti ($I_{\max} U_{\max}$) ne more biti nikoli enak površini pod krivuljo. Tako vpeljemo za merilo kakovosti faktor polnjenja FF (2.3), ki je razmerje med največjo močjo in zmnožkom napetosti odprtih sponk in kratkostičnega toka (IEC 60904-3).

$$FF = \frac{U_{\max} I_{\max}}{U_{OS} I_{KS}} \quad (2.3)$$

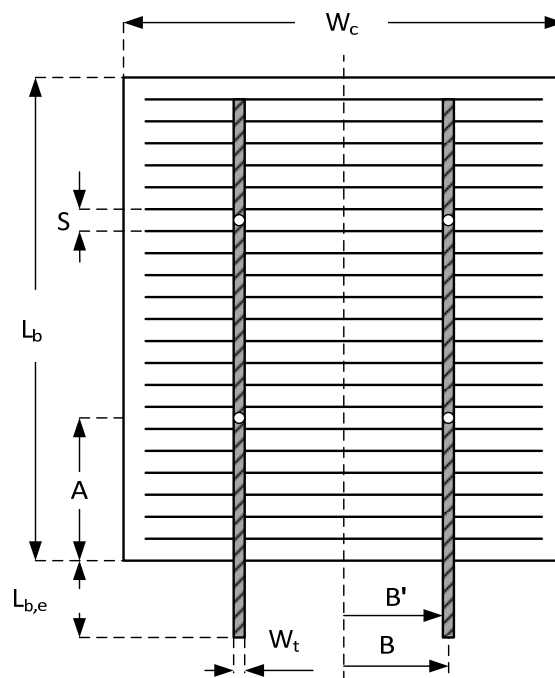
Pri tem sta z U_{OS} in I_{KS} označena napetost odprtih sponk in tok kratkega stika sončne celice. Trenutno dosežen največji faktor polnjenja FF je 81 % [108].

Idealna sončna celica bi bila črna in bi absorbirala celotno energijo sončnega sevanja. Prav tako silicijeve sončne celice absorbirajo precej slabo infrardečo svetlobo.

Zaradi kontaktov in povezav med P in N spoji se je nemogoče izogniti tudi ohmskim izgubam, ki so upoštevane s serijsko in paralelno upornostjo R_s in R_p .

Vsi ustvarjeni pari elektron-vrzel se ne ločijo in nekateri ne dosežejo elektrod, saj se rekombinacija zgodi prezgodaj v materialu ali na površini.

Da bi lažje opisali in nadalje tudi upoštevali izgube v sončni celici, je na sliki 2.7 prikazana sončna celica z vrisanimi trakovi in prsti, preko katerih se zbira in odvaja elektrina v zunanjo vezje. Tako so ene izmed glavnih izgub v sončni celici izgube zaradi senčenja trakov, senčenja prstov in ohmske izgube.



Slika 2.7: Vzorec sončne celice.

Izgube senčenja so odvisne od trakov (t_b) in prstov (fingers). Izgube senčenja zaradi trakov p_{sb} so podane z (2.4), medtem ko so izgube senčenja zaradi prstov p_{sf} podane z (2.5):

$$p_{sb} = \frac{n_t(1-t_b)W_t}{W_c} \quad (2.4)$$

$$p_{sf} = \frac{(1-t_f)W_f}{S} \quad (2.5)$$

kjer je n_t število trakov, t_b učinkovitost zbiralk (effective busbar transparency), W_t širina trakov in W_c širina celice. t_f predstavlja učinkovitost prsta (effective finger transparency), W_f širino prsta in S razdaljo med prsti. Skupne izgube senčenja so podane z (2.6) [108].

$$\rho_s = \rho_{sf} + \rho_{sb} - \rho_{sf}\rho_{sb} \quad (2.6)$$

Poleg izgub senčenja se pojavljajo še ohmske izgube. Ohmske izgube so definirane kot vsota vseh ohmskih izgub serijske upornosti $R_{se,pat}$ z (2.7):

$$R_{se,pat} = R_{te} + R_f + R_e + R_b + R_t + R_c \quad (2.7)$$

kjer so R_{te} izgube na podaljšanju traka (tab extension loss), R_f ohmske izgube prsta (finger resistance loss), R_e ohmske izgube oddajnika (emitter resistance loss), R_b ohmska upornost zbiralk (busbar resistance loss), R_t ohmska upornost traka (tab resistance loss) in R_c ohmska upornost kontaktov (contact resistance loss) (2.8).

$$\begin{aligned} R_{te} &= \frac{\rho_{lt} L_{b,e}}{n_t} \\ R_f &= \frac{1}{2n_t n_f} \frac{B'}{3} \rho_{lf} \\ R_e &= \frac{1}{n_t n_f} \frac{\rho_{s,l}(S - W_f)}{24B'} \\ R_b &= \frac{1}{2n_t n_f} \frac{A}{3} \rho_{lb} \\ R_t &= \rho_{lt} \frac{L_b}{3n_t} \left(1 + \frac{1}{2n_s^2} \right) \\ R_c &= \frac{1}{2n_t n_f} \frac{\rho_c}{B'W_f} \frac{\hat{R}/2}{\tanh(\hat{R}/2)} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Pri tem so simboli v (2.8) zapisani po abecednem vrstnem redu v tabeli 2.1, razen \hat{R} , ki je podan z (2.9).

$$\hat{R} = \sqrt{\rho_{s,l} / \rho_c} W_f \quad (2.9)$$

Tabela 2.1: Simboli, uporabljeni v izrazih (2.7).

ρ_c	kontaktna upornost (contact resistance)	L_b	dolžina celice (cell length)
ρ_b	upornost zbiralk (line resistance busbar)	$L_{b,e}$	dodatna dolžina trakov (additional tab length)
ρ_f	upornost prstov (line resistance fingers)	n_f	število prstov (number of fingers)
ρ_t	upornost trakov (line resistance tab)	n_s	število spajkanih spojev (number of solder joints/tab)
$\rho_{s,l}$	upornost silicija (sheet resistance Si)	n_t	število trakov (number of tabs)
A	glej sliko 2.7 (half the solder joint distance)	S	razmak med prsti (finger distance)
B'	glej sliko 2.7	W_f	širina prsta (finger width)

Če sedaj v matematičnem modelu sončne celice, opisanim z (2.1) in (2.2), upoštevamo še zgoraj opisane izgube (2.6) in (2.8), dobimo (2.10) in (2.11).

$$I = I_l(1 - p_s) - I_{01} \left(e^{\left(\frac{U_d}{U_r} \right)} - 1 \right) + I_{02} \left(e^{\left(\frac{U_d}{2U_r} \right)} - 1 \right) - \frac{U_d}{R_p} \quad (2.10)$$

$$U_d = U + (R_s + R_{se,pat}) I \quad (2.11)$$

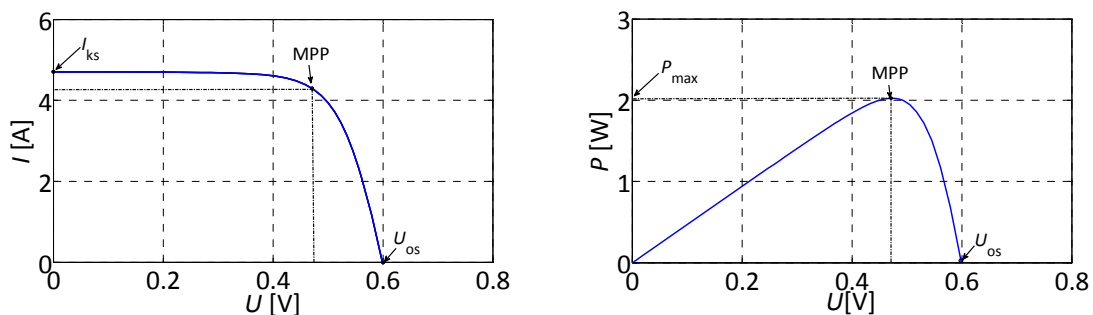
V tabeli 2.2 so po [108] zbrani parametri sončne celice, ki so uporabljeni v matematičnem modelu. Tako bomo v nadaljevanju z (2.10) in (2.11) simulirali delovanje sončne celice in s tem predstavili vpliv različnih parametrov na delovanje sončne celice.

Tabela 2.2: Parametri celice.

A_c	237.16 cm ²	$L_{b,e}$	0 cm	W_c	15.4 cm
A	0.625 cm	n_f	61	W_f	120 μm
B	2.55 cm	n_s	10	ρ_f	0.6 Ω/cm
B'	2.44 cm	n_t	2	ρ_c	5 mΩcm ²
$J_{01}=A_c I_{01}$	1.5e-8 A/m ²	R_{se}	2e-5 Ωm ²	ρ_b	15 mΩ/cm
$J_{02}=A_c I_{02}$	1e-3 A/m ²	T	298 K	$\rho_{s,l}$	50 Ω
$J_l=A_c I_l$	340 A/m ²	t_b	0	ρ_t	1 mΩ/cm
L_b	15.4 cm	t_f	0		

2.1.3 Vpliv različnih parametrov na delovanje sončne celice

Delovanje sončne celice najlažje opišemo s pomočjo UI karakteristike sončne celice. V prejšnjem razdelku, opisanim matematičnim modelom sončne celice (2.10) in (2.11) in s pomočjo parametrov celice, zbranih v tabeli 2.2, lahko sedaj pokažemo vpliv različnih parametrov na "obnašanje" UI karakteristike sončne celice. Ne glede na strukturo ali material sončne celice je karakteristika le-te v kvalitativnem smislu vedno enaka. Pri tem sta tok in napetost odvisna od gostote moči sončnega sevanja in obremenitve. Pri dotiku krivulje z abscisno osjo je dosežena vrednost odprtih sponk U_{os} . Z večanjem obremenitve sončne celice tok narašča, napetost na izhodu pa počasi pada. Največji tok je tok kratkega stika I_{ks} , ki teče v primeru, ko je izhod sončne celice v kratkem stiku. V tem primeru je izhodna napetost enaka nič. Točko največje (vršne) moči sončne celice dosežemo, ko je produkt toka in napetosti največji, kar dosežemo v kolenu UI karakteristike, prikazane na sliki 2.8 levo. Slika 2.8 kaže UI in UP karakteristiko sončne celice.

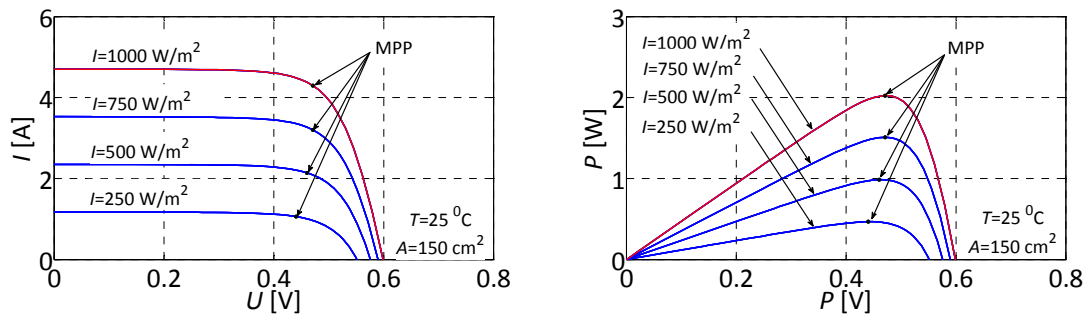


Slika 2.8: UI in UP karakteristiki sončne celice.

Glavni parametri, ki vplivajo na moč sončne celice, so: gostota moči sončnega sevanja, temperatura sončne celice, površina in število med seboj povezanih sončnih celic ter upornost bremena. Vplivi omenjenih parametrov so podrobneje predstavljeni v nadaljevanju.

2.1.3.1 Vpliv gostote moči sončnega sevanja na karakteristike sončne celice

Najizrazitejši parameter, ki vpliva na UI karakteristiko sončne celice, je vsekakor gostota moči sončnega sevanja. Moč sončne celice je sorazmerna z gostoto moči sončnega sevanja. Na sliki 2.9 je prikazan vpliv gostote moči sončnega sevanja na karakteristiko sončne celice. Karakteristike na sliki 2.9 so prikazane pri gostoti moči sončnega sevanja na površini sončne celice v iznosu 250 W/m^2 , 500 W/m^2 , 750 W/m^2 in 1000 W/m^2 .

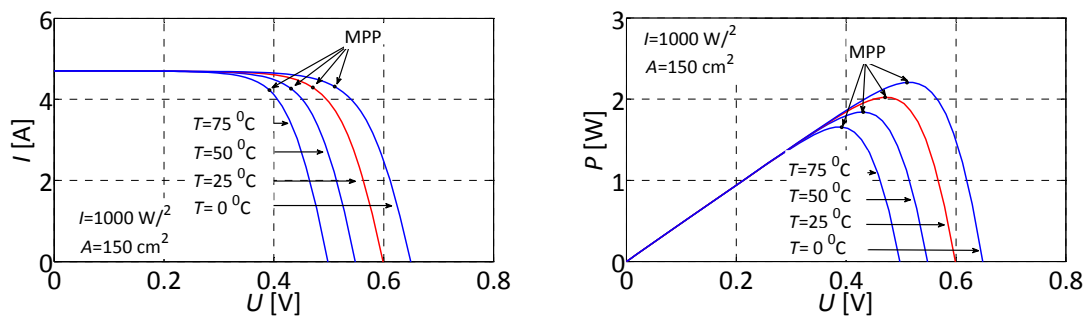


Slika 2.9: Vpliv sončnega sevanja na karakteristike sončne celice.

Iz slike 2.9 je razvidno, da z večanjem gostote moči sončnega sevanja izhodni tok sončne celice narašča. Z naraščanjem izhodnega toka sončne celice, posledično z naraščanjem gostote moči sončnega sevanja, narašča tudi temperatura sončne celice, ki prav tako vpliva na karakteristiko delovanja.

2.1.3.2 Vpliv temperature na karakteristike sončne celice

Pri konstantni gostoti moči sončnega sevanja na površini sončne celice se ta segreva in s tem se posledično spreminja tudi karakteristika delovanja. Pri gostoti moči sončnega sevanja 1000 W/m^2 in temperaturah, rastočih nad $0 \text{ }^\circ\text{C}$, napetost odprtih sponk U_{os} pada, kot je to prikazano na sliki 2.10.

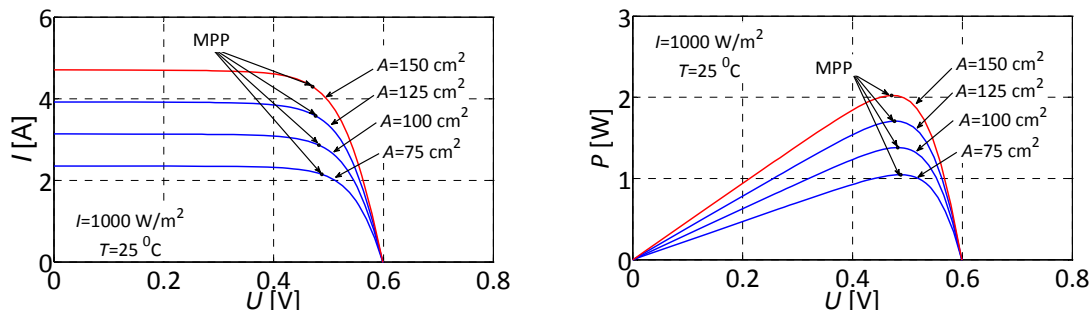


Slika 2.10: Vpliv temperature na karakteristike sončne celice.

V tehnični specifikaciji posamezne sončne celice oziroma modula so podani temperaturni koeficienti toka kratkega stika (α [%/ $^\circ\text{C}$]), koeficient napetosti odprtih sponk (β [%/ $^\circ\text{C}$]) in koeficient vršne moči (γ [%/ $^\circ\text{C}$]). Temperaturni koeficient kratkega stika je pozitiven, tako da pri povišanju temperature tok rahlo narašča. Napetost odprtih sponk pa zaradi negativnega temperaturnega koeficienta pada. Pri konstantni gostoti moči sončnega sevanja in konstantni temperaturi sončne celice, določa površino sončne celice kratkostični tok I_{KS} .

2.1.3.3 Vpliv površine na karakteristike sončne celice

Največji karakteristični tok sončne celice je določen z njeno površino. Z večanjem površine sončne celice se večja tudi kratkostični tok, kar je razvidno iz slike 2.11.

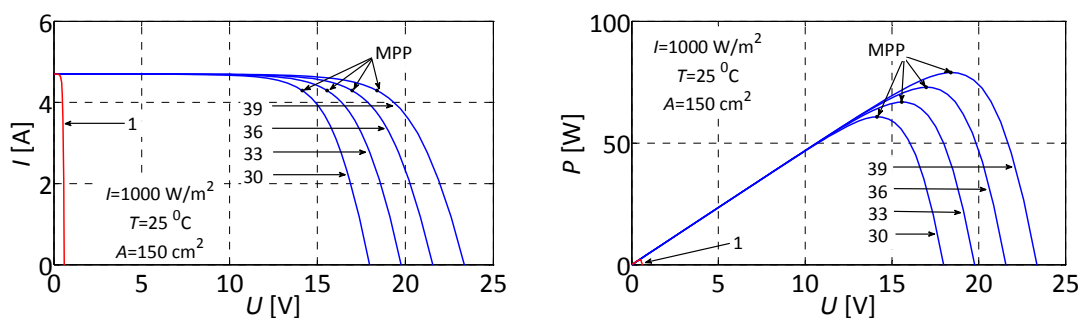


Slika 2.11: Vpliv površine sončne celice na njene karakteristike.

S površino sončnih celic spreminjamo kratkostični tok I_{KS} , medtem ko s številom zaporedno vezanih celic spreminjamo napetost odprtih sponk U_{OS} .

2.1.3.4 Vpliv števila sončnih celic na njene karakteristike

Vsaka sončna celica daje okrog 0,5 V napetosti pri svoji vršni moči. S serijsko vezavo sončnih celic vplivamo na izhodno napetost modula. Slika 2.12 kaže vpliv števila serijsko vezanih sončnih celic na karakteristiko delovanja modula. Pri tem so sončne celice vezane v serijo po 1, 30, 33, 36 in 39 skupaj.

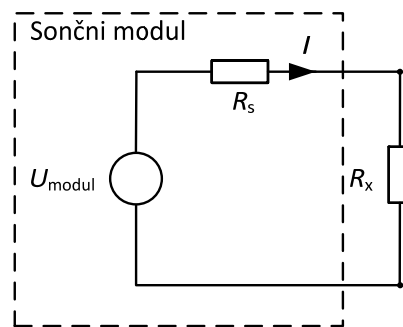


Slika 2.12: Vpliv števila sončnih celic na karakteristiko.

2.1.3.5 Vpliv sledenja točki največje moči (MPPT)

V poglavjih od 2.3.1.1 do 2.1.3.4 smo pokazali vplive različnih parametrov na delovanje sončnih modulov. Pokazali smo, da je izhodna moč iz modula odvisna predvsem od gostote moči sončnega sevanja, temperature modula, površine in števila zaporedno vezanih sončnih celic. V primeru, ko opazujemo sončni modul kot del sončne elektrarne, se pokaže, da tudi breme, ki je lahko akumulatorska baterija ali električno omrežje, vpliva na delovanje modula. To je izrazito še posebej v primeru nenadne spremembe gostote moči sončnega sevanja. Sledenje točki največje

moči (Maximum power point Tracking – MPPT) omogoča sončnemu modulu proizvajati v danem trenutku celotno moč, ki jo je sposoben generirati. Slednje pomeni, da se mora napetost sončnega modula oziroma polja modulov neprestano prilagajati zunanjim pogojem obratovanja. Pri tem se zastavi vprašanje, kdaj bo izhodna moč sončnega modula maksimalna. S pomočjo nadomestnega vezja, prikazanega na sliki 2.13, pokažimo, kako matematično določimo točko največje moči s prilagoditvijo impedanc izvora in bremena.



Slika 2.13: Nadomestno vezje.

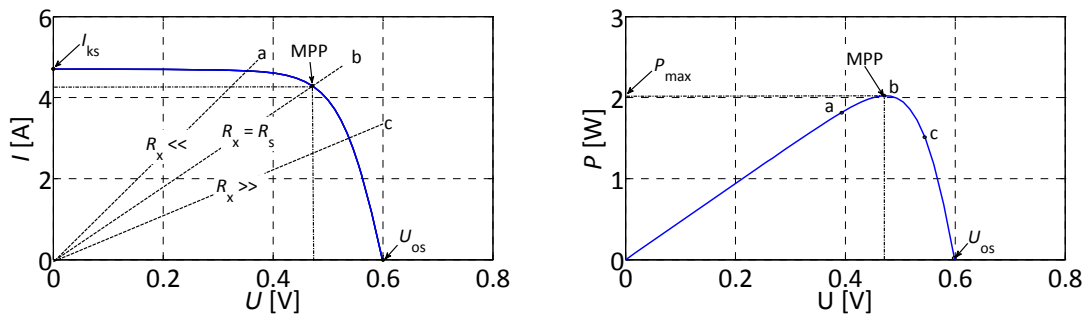
Če predpostavimo, da je izhodna moč iz sončnega modula maksimalna, lahko matematično pokažemo, da je moč na upor R_x največja takrat, ko je parcialni odvod moči enak nič. Izhodno moč modula za primer na sliki 2.13 zapišemo kot (2.12),

$$P = I^2 R_x = \left(\frac{U}{R_s + R_x} \right)^2 R_x \quad (2.12)$$

kjer sta U in I napetost in tok modula, R_s serijska upornost modula in R_x spremenljiva upornost. Maksimalno izhodno moč iz modula dosežemo, ko je parcialni odvod enak nič (2.13).

$$\frac{\partial P}{\partial R_x} = U^2 \frac{(R_s + R_x)^2 - 2R_x(R_s + R_x)}{((R_s + R_x)^2)^2} = 0 \quad (2.13)$$

Iz (2.13) sledi impedančna prilagoditev bremena glede na impedanco vira. Pri sončni celici je to ravno obratno, kjer impedančna prilagoditev pomeni nastavitve takšne upornosti R_x , da je produkt napetosti in toka največji. Na sliki 2.14 je podana UI in UP karakteristika sončnega modula z obratovalnimi točkami pri različnih upornostih R_x .



Slika 2.14: UI in UP karakteristiki modula z vrisanimi obratovalnimi točkami.

Da dosežemo željeno, torej, da je izhodna moč modula maksimalna, je potrebno med modul in breme vključiti električno vezje oziroma DC/DC pretvornik z ustreznim krmiljenjem tranzistorjev. Obstaja več načinov za sledenje točki največje moči, pri čemer izpostavimo dva, ki se uporabljata najpogosteje. Pri prvem načinu se optimalna obratovalna napetost določi glede na napetost odprtih sponk U_{os} [110]. Napetost odprtih sponk se izmeri tako, da se tok modula v določenih intervalih prekine za kratek čas. V tem primeru govorimo o prekinitvah v milisekundah. Pri drugem načinu se optimalna obratovalna napetost določi tako, da se meri sprememba moči glede na spremembo napetosti [110] in [111]. Zraven se lahko uporablja tudi mehka logika, ki dodatno izboljšuje funkcijo algoritma za sledenje točki največje moči [111].

Omenjeni metodi za sledenje točki največje moči iščejo maksimalno moč tako, da spreminjajo navidezno upornost, ki jo čuti sončni modul, s tem pa spreminjajo tudi razmerje med tokom in napetostjo. Omenjeno spreminjanje se pri nekaterih metodah odvija v frekvenčnem področju med 1 Hz in 50 Hz in je opazno tako v obliki ovojnice toka kot tudi trenutne moči na izhodu pretvornika. Iskanje točke največje moči je omogočeno s pomočjo različnih pretvornikov, ki so opisani v poglavju 2.2.

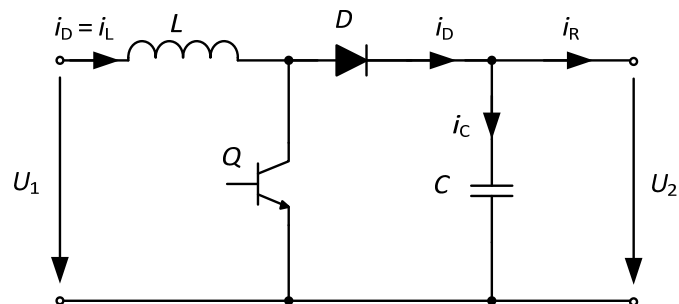
2.2 DC/DC pretvornik

Enosmerna napetost, ki je prisotna na izhodu iz polja modulov, je neregulirana in se spreminja v odvisnosti od trenutne gostote moči sončnega sevanja. Z DC/DC pretvornikom enosmerno napetost reguliramo in s tem zagotovimo ustrezno amplitudno vrednost enosmerne napetosti, ki je nadalje potrebna za razsmerjanje. Hkrati je z DC/DC pretvornikom potrebno zagotoviti takšno razmerje med tokom in napetostjo na izhodu polja modula, ki zagotavlja obratovanje sončnih modulov v bližini točke največje moči. Glede na funkcijo, ki jo DC/DC pretvorniki opravljajo, jih delimo na [113]:

- pretvornik navzgor (boost converter),
- pretvornik navzdol (buck converter) in
- pretvornik navzgor/navzdol (buck/boost converter).

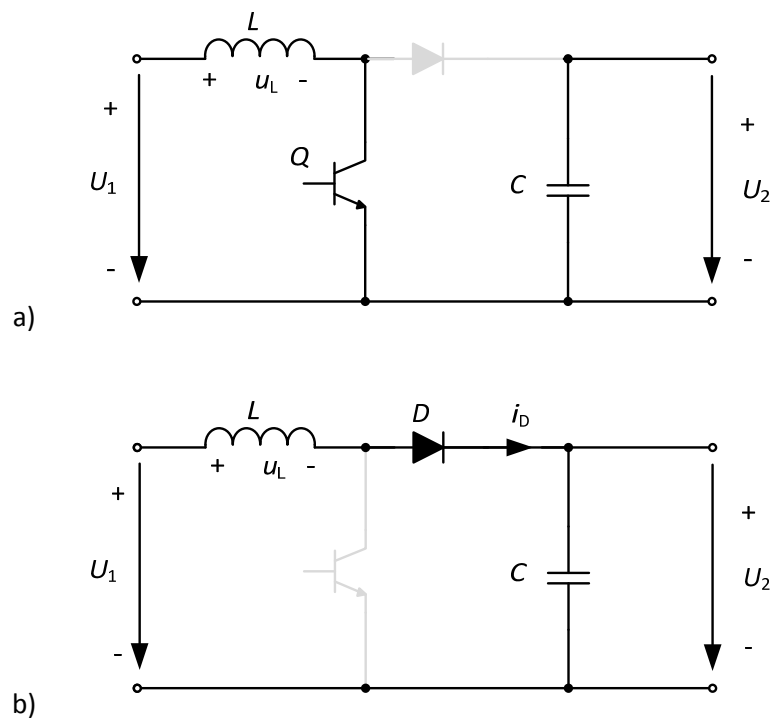
2.2.1 Pretvornik navzgor

Pretvornik navzgor na svojem izhodu daje napetost z višjo srednjo vrednostjo, kot je srednja vrednost napetosti na vходу. Slika 2.15 kaže osnovno vezje pretvornika navzgor, kjer je vhodna napetost pretvornika označena z U_1 , izhodna pa z U_2 .



Slika 2.15: Pretvornik navzgor.

Pri tem sta z i_L in i_D označena toka skozi dušilko z induktivnostjo L in diodo D . i_C označuje tok skozi kondenzator C , i_R pa tok na izhodu pretvornika. V primeru, ko tranzistor prevaja, je dioda D zaporno polarizirana, izhod pa je ločen od vhodnega dela, kar je prikazano z nadomestnim vezjem na sliki 2.16 a. Pri tem se energija pretaka od izvora k dušilki z induktivnostjo L . Ko gre tranzistor Q v neprevodno stanje, kar je prikazano z nadomestnim vezjem na sliki 2.16 b, se energija, ki je shranjena v dušilki D , prelije v kondenzator C . Na ta način je mogoče tvoriti izhodno napetost U_2 s srednjo vrednostjo večjo od srednje vrednosti vhodne napetosti U_1 .

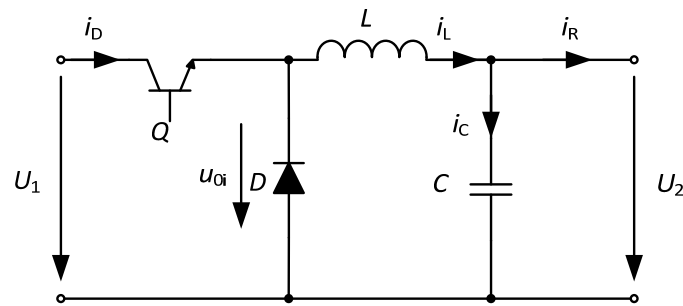


Slika 2.16: Nadomestno vezje pretvornika navzgor: a) ko tranzistor prevaja in b) ko tranzistor ne prevaja.

Na sliki 2.16 je z u_L označena napetost na dušilki z induktivnostjo L . Zaradi lastnosti stikalnih elementov v pretvorniku navzgor ločimo dva načina delovanja, in sicer zvezno področje delovanja, kjer tok ne pade na vrednost nič, in nezvezno področje delovanja, kjer tok pade tudi na vrednost nič. Pretvornik navzgor, se uporablja v sončnih elektrarnah za amplitudno prilagoditev enosmerne napetosti vhodu razsmernika, ki je potrebna za razsmerjanje.

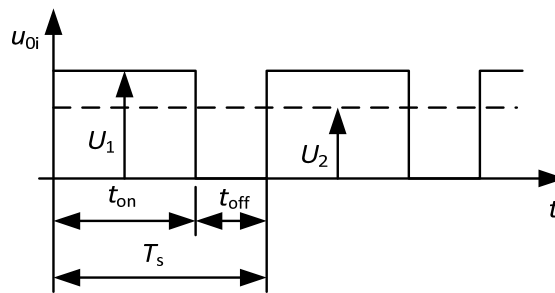
2.2.2 Pretvornik navzdol

Nasprotno kot pretvornik navzgor, pretvornik navzdol daje na svojem izhodu nižjo srednjo vrednost napetosti, kot je srednja vrednost napetosti na vhodu. Slika 2.17 kaže osnovno vezje pretvornika navzdol, pri čemer sta z U_1 in U_2 označeni vhodna in izhodna napetost.



Slika 2.17: Pretvornik navzdol.

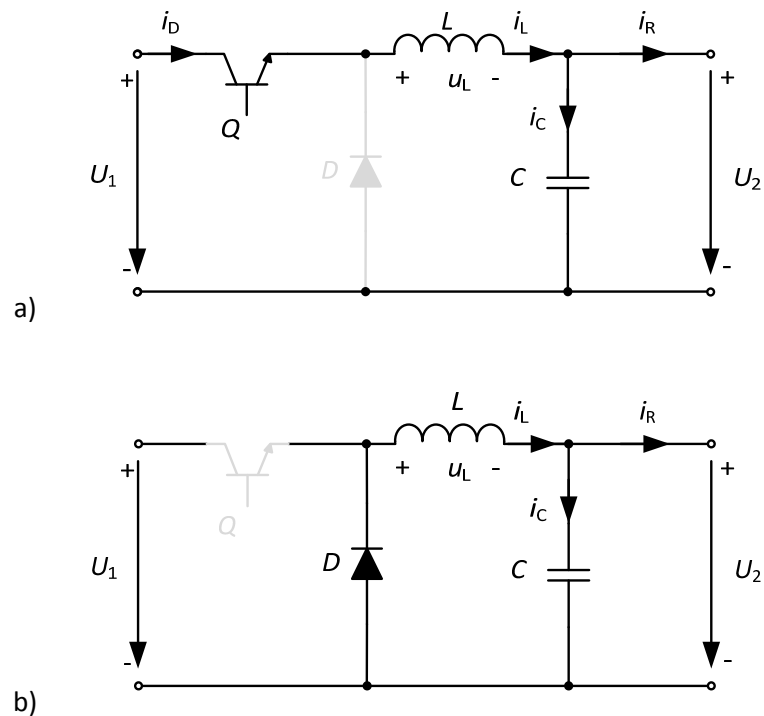
Pri tem sta z i_L in i_D označena toka skozi dušilko z induktivnostjo L in diodo D . i_C označuje tok skozi kondenzator C , i_R pa tok na izhodu pretvornika. Z u_{oi} je označena napetost na vohu nizkopasovnega sira oziroma tranzistorja Q . Slika 2.18 kaže pripadajoča časovna poteka napetosti na vohu U_1 in izhodu U_2 nizko pasovnega sira, kjer srednjo vrednost izhodne napetosti izračunamo z (2.14):



Slika 2.18: Časovna poteka napetosti na vohu nizko pasovnega sira (u_{oi}) in na njegovem izhodu (U_2).

$$U_2 = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} u_{oi}(t) dt = \frac{1}{T_s} \left(\int_0^{t_{on}} U_1 dt + \int_{t_{on}}^{T_s} 0 dt \right) = \frac{t_{on}}{T_s} U_1 = D U_1 \quad (2.14)$$

pri čemer je D prevajalno razmerje, t_{on} in t_{off} časa prevajanja in neprevajanja, u_{oi} napetost na vohu nizkopasovnega sira. S spreminjanjem prevajalnega razmerja vplivamo na izhodno napetost. Ko tranzistor Q na sliki 2.17 prevaja, se energija pretaka od izvora proti bremenu. Vezje na sliki 2.17 lahko v tem primeru predstavimo z nadomestnim vezjem na sliki 2.19 a. Ko tranzistor Q ne prevaja, se breme napaja z energijo, ki je shranjena v dušilki L in kondenzatorju C . Pri tem je vezje na sliki 2.17 mogoče predstaviti z nadomestnim vezjem na sliki 2.19 b. Na opisani način je mogoče tvoriti izhodno napetost U_2 z manjšo srednjo vrednostjo od vhodne napetosti U_1 ob bistveno manjših izgubah, kot bi jih imeli, če bi uporabili napetostni delilnik.

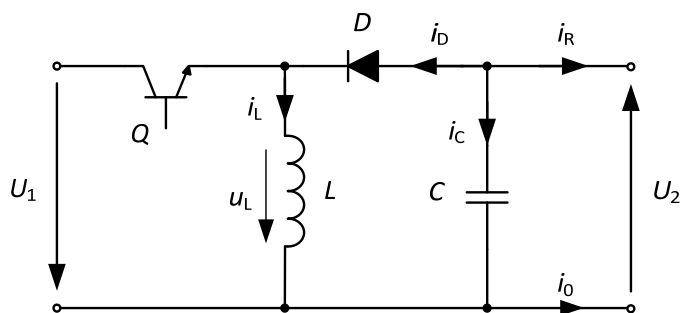


Slika 2.19: Nadomestno vezje pretvornika navzdol; a) ko tranzistor prevaja in b) ko tranzistor ne prevaja.

Na sliki 2.19 je z u_L označena napetost na dušilki z induktivnostjo L . Prav tako kot pri pretvorniku navzgor tudi v tem primeru zaradi lastnosti stikalnih elementov v pretvorniku ločimo dva načina delovanja, in sicer zvezno področje delovanja, kjer trenutna vrednost toka skozi dušilko v periodi delovanja nikoli ne doseže vrednosti nič in nezvezno področje delovanja, kjer trenutna vrednost toka skozi dušilko v periodi delovanja doseže tudi vrednost nič.

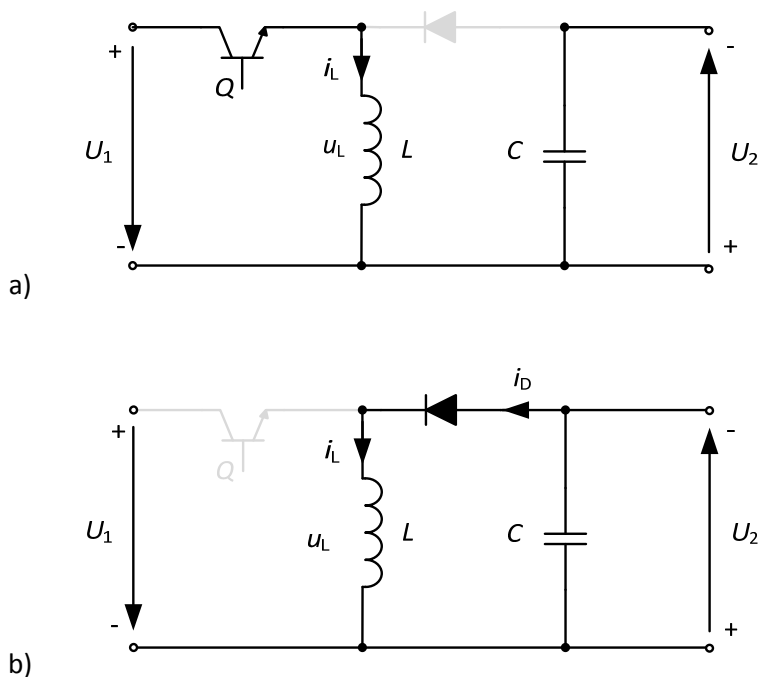
2.2.3 Kombinacija pretvornika navzgor in navzdol

Kombinacijo pretvornika navzgor in navzdol je mogoče zgraditi tako, da zaporedno vežemo pretvornik navzdol in pretvornik navzgor. Če je sprejemljiva zamenjava polaritete izhodne napetosti glede na vhodno, lahko uporabimo pretvornik navzgor in navzdol, ki je prikazan na sliki 2.20. Izhodna napetost U_2 pretvornika pri tem lahko zavzema srednje vrednosti od nič do mnogo večje vrednosti, kot je srednja vrednost vhodne napetosti U_1 .



Slika 2.20: Pretvornik navzdol-navzgor.

Pri tem sta z i_L in i_D označena toka skozi dušilko z induktivnostjo L in diodo D . i_C označuje tok skozi kondenzator C , i_R pa tok na izhodu pretvornika. Ko tranzistor prevaja, se energija iz izvora prenaša v dušilko L , dioda D pa je negativno polarizirana in zato zaprta. Vezje na sliki 2.20 je v tem primeru mogoče predstaviti z nadomestnim vezjem, ki je prikazano na sliki 2.21 a. V tem primeru je mogoče tvoriti izhodno napetost U_2 z večjo srednjo vrednostjo od vhodne napetosti U_1 . Ko tranzistor ne prevaja, teče zaradi vztrajnosti tok še naprej skozi dušilko L , če dioda v vezju prevaja. V tem režimu obratovanja se kondenzator C polni na napetost s polariteto, ki je označena na nadomestnem vezju na sliki 2.21 b. V tem primeru je mogoče tvoriti izhodno napetost U_2 z manjšo srednjo vrednostjo od vhodne napetosti U_1 .



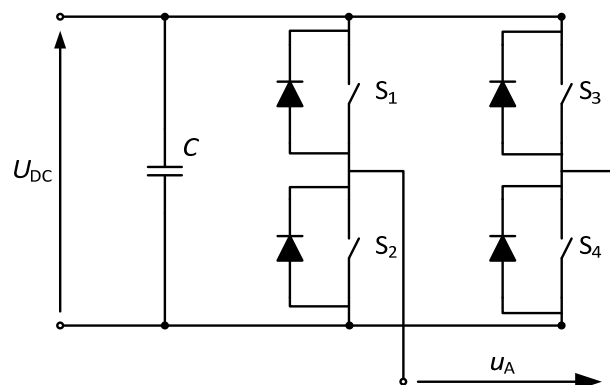
Slika 2.21: Nadomestno vezje pretvornika navzdol/navzgor za primer a) ko tranzistor prevaja in b) ko tranzistor ne prevaja.

2.3 DC/AC razsmernik

V elektrotehniko se velikokrat srečamo s potrebo po pretvornikih, ki enosmerno napetost pretvorijo v izmenično napetost in obratno. Te naprave imenujemo razsmerniki. V glavnem so razsmerniška vezja, razdeljena v dve veliki skupini, in sicer v enofazna in trifazna razsmerniška vezja, katera bomo na kratko opisali v naslednjih podpoglavjih. Z nadgradnjo enofaznega ali trifaznega razsmerniškega vezja dobimo omrežno voden enofazni ali trifazni razsmernik, ki se med drugim uporablja tudi v sončnih elektrarnah.

2.3.1 Enofazni razsmernik

V tem razdelku je na kratko opisan princip delovanja enofaznega razsmernika, ki je v obliki vezja predstavljen na sliki 2.22.

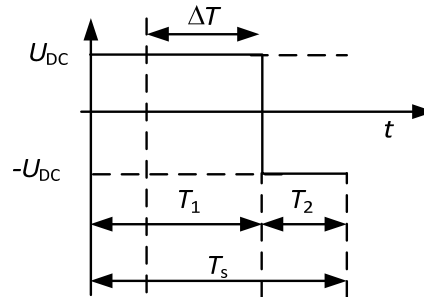


Slika 2.22: Enofazni razsmernik.

Enofazni razsmernik na sliki 2.22 ima štiri stikala (tranzistorje), od S_1 do S_4 , ki jih je mogoče prožiti na različne načine in kondenzator C za glajenje vhodne napetosti U_{DC} . Če prevaja par tranzistorjev S_1 in S_4 , pripeljemo s tem na izhodne sponke napetost enosmernega vodila $u_A = U_{DC}$. Če prevaja par tranzistorjev S_2 in S_3 , pa dobimo na izhodnih sponkah napetost $u_A = -U_{DC}$.

Glede na to, da je enosmerna napetost U_{DC} na vhodu v razsmernik konstantna, s preklapljanjem parov tranzistorjev S_1, S_4 in S_2, S_3 lahko na izhodne sponke pripeljemo le napetosti U_{DC} in $-U_{DC}$, čas njunega trajanja pa lahko spreminjamo. To pomeni, da so na izhodnih sponkah trenutne vrednosti napetosti še vedno le U_{DC} in $-U_{DC}$, povprečna vrednost napetosti je odvisna od časa prevajanja parov tranzistorjev S_1, S_4 in S_2, S_3 . Interval T_s , na katerem opazujemo povprečno vrednost napetosti, izberemo tako, da je prilagojen periodi opazovanja. Znotraj intervala T_s sta tranzistorja

S_1, S_4 v prevodnem stanju v trajanju T_1 , tranzistorja S_2, S_3 pa v trajanju T_2 , pri čemer velja $T_s = T_1 + T_2$. Slednje pomeni, da je v intervalu T_s ves čas v prevodnem stanju natanko en par tranzistorjev. Časovni potek napetosti v intervalu T_s je prikazan na sliki 2.23.



Slika 2.23: Časovni potek napetosti znotraj intervala T_s .

Povprečna vrednost napetosti u_A , ki jo dobimo na izhodnih sponkah pretvornika v intervalu T_s , je tako določena z (2.15).

$$u_A = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} u(t) dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_1} U_{DC} dt + \frac{1}{T_s} \int_{T_1}^{T_s} -U_{DC} dt = \frac{T_1 - T_2}{T_s} U_{DC} = \frac{\Delta T}{T_s} U_{DC} \quad (2.15)$$

Pri tem je $\Delta T = T_1 - T_2$. Če poznamo povprečno vrednost napetosti u_A , ki jo želimo imeti na izhodnih sponkah razsmernika v intervalu T_s , lahko čas T_1 in T_2 določimo iz razmerja (2.16) in z uporabo enačb $\Delta T = T_1 - T_2$ in $T_s = T_1 + T_2$ na naslednji način (2.17).

$$\frac{\Delta T}{T_s} = \frac{u_A}{U_{DC}} \quad (2.16)$$

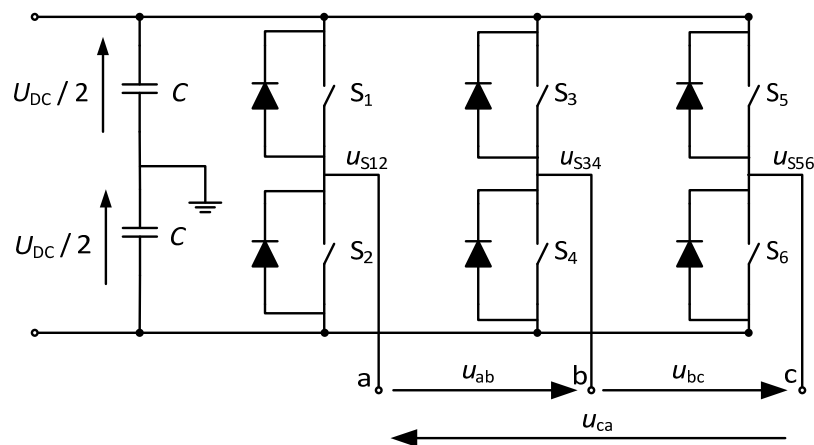
$$\Delta T = \frac{u_A}{U_{DC}} T_s \quad T_1 = \frac{T_s + \Delta T}{2} \quad T_2 = \frac{T_s - \Delta T}{2} \quad (2.17)$$

Aproximacijo sinusne izhodne napetosti dobimo tako, da ob dani konstantni napetosti enosmernega vodila U_{DC} in ob znani periodi modulacije T_s v (2.17) vstavljamo trenutne želene vrednosti sinusne napetosti u_A , z izračunanimi vrednostmi časov T_1 in T_2 preko števecv v skladu s sliko 2.23 prožimo para tranzistorjev S_1, S_4 in S_2, S_3 . Tako dobimo pulzno širinsko modulirano izhodno napetost razsmernika, ki jo zgladimo z izhodnim filtrom.

2.3.2 Trifazni razsmernik

Enofazno razsmerniško vezje na sliki 2.22 ima dve veji s po dvema tranzistorjema, medtem ko ima trifazno razsmerniško vezje, na sliki 2.24, eno vejo več. Tako ima trifazno razsmerniško vezje tri

veje s po dvema tranzistorjema, označenimi s S_1 do S_6 in dva kondenzatorja C za glajenje vhodne napetosti U_{DC} .



Slika 2.24: Trifazni razsmernik.

Tako kot v primeru enofaznega razsmerniškega vezja, bomo tudi v tem primeru predpostavili, da je napetost na enosmernem vodilu pretvornika U_{DC} konstantna. Prav tako velja, da oba tranzistorja v isti veji (S_1 in S_2 ali S_3 in S_4 ali S_5 in S_6) ne smeta biti nikoli istočasno v prevodnem stanju. Slednje bi pomenilo kratak stik na enosmernem vodilu in uničenje razsmerniškega vezja. Predpostavili bomo tudi, da je v vsaki veji v vsakem trenutku v prevodnem stanju natanko en tranzistor. Glede na omenjeno, da je napetost enosmernega vodila U_{DC} konstantna in da je v vsaki veji vedno en tranzistor v prevodnem stanju, lahko s razsmerniškim vezjem na sliki 2.24 tvorimo osem različnih stikalnih stanj, ki so podana v tabeli 2.3.

Na izhodu razsmerniškega vezja imamo samo medfazne napetosti. Pri tem sta dve medfazni napetosti neodvisni, tretja pa je zaradi Kirchofovega zakona zanke že določena s prvima dvema. Medfazne napetosti so določene z razlikami napetosti na priključnih sponkah, kar je enako razliki izhodnih napetosti posameznih vej pretvorniškega vezja. Medfazne napetosti na izhodnih sponkah razsmernika so u_{ab} , u_{bc} in u_{ca} . Vsaka od njih lahko v danem trenutku zavzame le vrednost U_{DC} ali $-U_{DC}$. Približek trifaznih sinusnih napetosti dobimo tako, da znotraj izbranega časovnega intervala opazovanja tvorimo različne kombinacije možnih stikalnih stanj, ki nam v povprečju znotraj intervala opazovanja dajo željeno izhodno napetost. Tudi v tem primeru si pri tvorjenju izmeničnih izhodnih napetosti pretvornika lahko pomagamo s principom trikrat uporabljene enofazne pulzno širinske modulacije, ki je opisana v prejšnjem razdelku. Prav tako lahko uporabimo tudi tako imenovano vektorsko modulacijo, s katero hkrati določimo trajanja posameznih stikalnih stanj s tabele 2.3, s čimer določimo tudi izhodne napetosti pretvornika. Podrobnejši opis vektorske modulacije je podan v [114]. Bistvena prednost trifaznih razsmernikov je ta, da je vsota tokov v vsakem trenutku enak nič. Z uporabo vektorske modulacije pa dobimo tudi simetrične trifazne napetosti in toke. Tok nevtralnega vodnika je enak nič.

Tabela 2.3: Prikaz prevajanja tranzistorjev: shematska predstavitev, logični izrazi ter izhodne napetosti v posameznih vejah pretvornika.

shematsko	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	u_{S12}	u_{S34}	u_{S56}
	0	1	0	1	0	1	$-1/2 U_{DC}$	$-1/2 U_{DC}$	$-1/2 U_{DC}$
	1	0	0	1	0	1	$-1/2 U_{DC}$	$-1/2 U_{DC}$	$-1/2 U_{DC}$
	1	0	1	0	0	1	$1/2 U_{DC}$	$1/2 U_{DC}$	$-1/2 U_{DC}$
	0	1	1	0	0	1	$-1/2 U_{DC}$	$1/2 U_{DC}$	$-1/2 U_{DC}$
	0	1	1	0	1	0	$-1/2 U_{DC}$	$1/2 U_{DC}$	$1/2 U_{DC}$
	0	1	0	1	1	0	$-1/2 U_{DC}$	$-1/2 U_{DC}$	$1/2 U_{DC}$
	1	0	0	1	1	0	$1/2 U_{DC}$	$-1/2 U_{DC}$	$1/2 U_{DC}$
	1	0	1	0	1	0	$1/2 U_{DC}$	$1/2 U_{DC}$	$1/2 U_{DC}$

V tabeli 2.3 so v prvem stolpcu shematsko prikazani tranzistorji v vsaki od treh vej, ki so v prevodnem stanju. V stolpcih 2 do 7 so podana stanja posameznih tranzistorjev, pri čemer 1 pomeni, da je tranzistor v prevodnem stanju, 0 pa pomeni, da ne prevaja. V stolpcih od 8 do 10 so podane napetosti na izhodu vsake veje. Če so v prevodnem stanju tranzistorji S_1 , S_3 in S_5 , je izhod veje povezan na pozitivno zbiralko enosmernega vodila in izhodna napetost veje znaša $1/2 U_{DC}$. Če so v prevodnem stanju tranzistorji S_2 , S_4 in S_6 , je izhod veje povezan na negativno zbiralko enosmernega vodila, zaradi česar je izhodna napetost veje $-1/2 U_{DC}$ [114].

2.3.3 Omrežno voden razsmernik

Do sedaj smo na kratko predstavili glavne elemente pretvorniškega in razsmerniškega vezja. V nadaljevanju si pogledimo, kako je z uporabo le-teh v razsmerniških sistemih za sončne elektrarne.

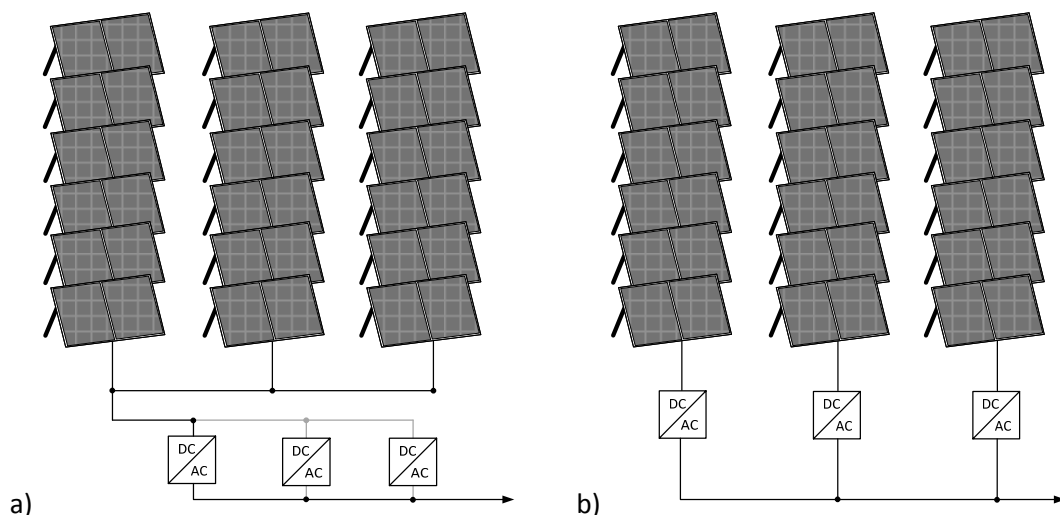
Za priklop sončnih elektrarn na javno električno omrežje moramo uporabiti enega ali več omrežno vodenih razsmernikov. Omrežno vodeni razsmerniki pretvarjajo enosmerno napetost, ki jo generirajo polja modulov v izmenično napetost sinusne oblike in frekvence, ki je enaka omrežni frekvenci. Napetost omrežno vodenega razsmernika je v fazi z napetostjo električnega omrežja, kar je pogoj za sinhronizacijo z napetostjo javnega električnega omrežja. Da je vpliv sončnih elektrarn na omrežje čim manjši, mora razsmernik izpolnjevati zahteve, predpisane s standardom SIST EN 61727 oziroma s standardom SIST EN 50438.

Omrežno vodeni razsmerniki, ki se uporabljajo v sončnih elektrarnah, delujejo popolnoma avtomatsko. Ob zadostni gostoti moči sončnega sevanja na polje modulov se razsmerniki za paralelno obratovanje avtomatsko sinhronizirajo z omrežjem in oddajajo energijo v omrežje. Razsmernikom za delovanje zadostuje že nekaj 10 W moči polja modulov. Takoj, ko ob mraku ni

več zadostne moči iz polja modulov, se razsmerniki avtomatsko odklopijo od omrežja. Ker se krmilna enota napaja direktno iz polja modulov, se razsmerniki ponoči avtomatsko ugasnejo in niso porabnik električne energije. Glede na njihovo delovanje razsmernike delimo v:

- omrežno vodene razsmernike (z naravno komutacijo), ki dobivajo taktno frekvenco in potrebno jalovo moč za komutacijo iz napajalnega omrežja in
- lastno vodene razsmernike (s prisilno komutacijo), ki imajo na izmenični strani priključeno pasivno breme ali omrežje, ki je brez napetosti, kadar ga ne napajamo z energijo iz razsmernika. Za takt in komutacijo mora poskrbeti razsmernik sam.

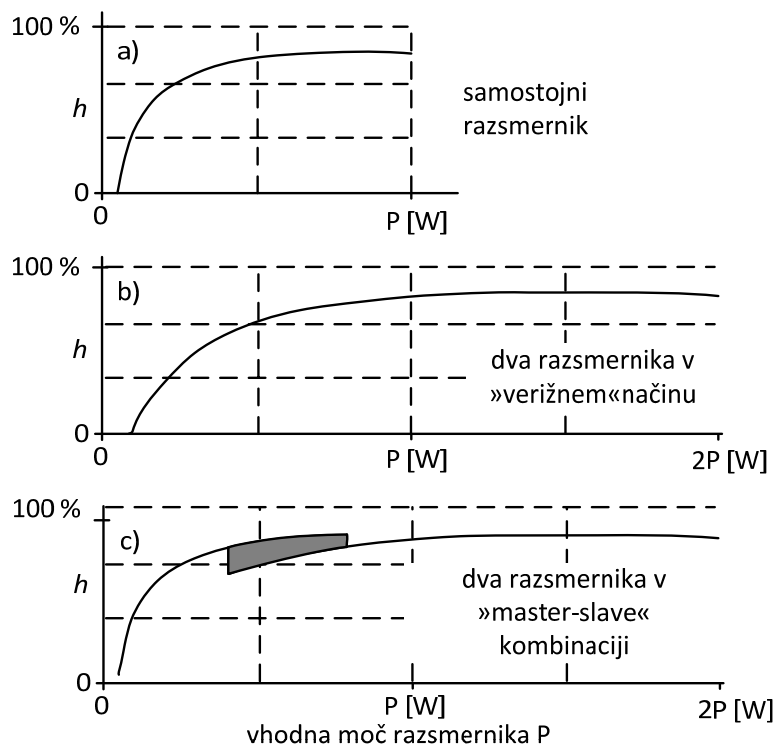
Izhodna napetost razsmerniškega vezja je lahko sinusne, pravokotne ali trapezne oblike. Najdražji in najbolj kvalitetni so razsmerniki s sinusno obliko izhodne napetosti. Uporabljajo se enofazni razsmerniki kot tudi trifazni razsmerniki. Poznamo več načinov priključevanja in delovanja omrežno vodenih razsmernikov v sistemih sončnih elektrarnah. Tako ločimo izvedbe z osrednjim razsmernikom (z enim centralno vodenim razsmernikom), izvedbo "master-slave", verižno izvedbo in zelo redko izvedbo razsmernik-modul [115]. Verižna izvedba in izvedba razsmernik-modul se uporabljata pri manjših sistemih, medtem ko izvedbo z osrednjim razsmernikom uporabljamo pri večjih sistemih. Pri slednji lahko uporabimo en večji razsmernik ali več manjših razsmernikov, ki so povezani s posameznim poljem modulov. Izvedba "master-slave" [117] in verižna izvedba sta si dokaj podobni. V "master-slave" izvedbi se dodatni razsmerniki vklapljujejo po potrebi, bodisi v primeru okvare glavnega ali pa v primeru povečanega sončnega sevanja. Tovrstni način se uporablja redkeje. Verižna izvedba je zanesljivejša in v praksi večkrat uporabljena v primerjavi z "master-slave" izvedbo, vendar je v tem primeru izkoristek razsmernikov nekoliko manjši. Povezave razsmernikov v "master-slave" in verižni izvedbi so shematsko prikazane na sliki 2.25.



Slika 2.25: Povezave razsmernikov v "master-slave" in "verižni" izvedbi.

Iz vidika povečanja izkoristka razsmernikov bi se praviloma naj uporabljala "master-slave" izvedba, vendar tovrstni način zahteva dodatno krmiljenje, zato se v praksi pogosteje uporablja verižna izvedba.

Na sliki 2.26 je prikazan izkoristek enega razsmernika ter dveh razsmernikov v verižni izvedbi in "master-slave" izvedbi glede na vhodno moč. Pri verižni izvedbi vsak razsmernik deluje neodvisno od drugega čez celotno področje moči. Posledično je pri majhnih močeh izkoristek celotnega sistema razsmernikov manjši, večje pa je tudi harmonsko popačenje izhodnega toka. Te slabosti je mogoče vsaj delno odpraviti z uporabo "master-slave" izvedbo. Pri tem se naslednji razsmernik vključi šele, ko prejšnji razsmernik ali skupina razsmernikov obratuje malo pod nazivno vrednostjo, običajno okoli 80 % nazivne moči. Če se oddana delovna moč sončne elektrarne zmanjšuje, se posamezni razsmerniki začnejo izklapljati, in sicer na tak način, da preostali delajo v področju s čim večjim izkoristkom.



Slika 2.26: Izkoristek a) samostojnega razsmernika, b) dveh razsmernikov v "verižni" kombinaciji

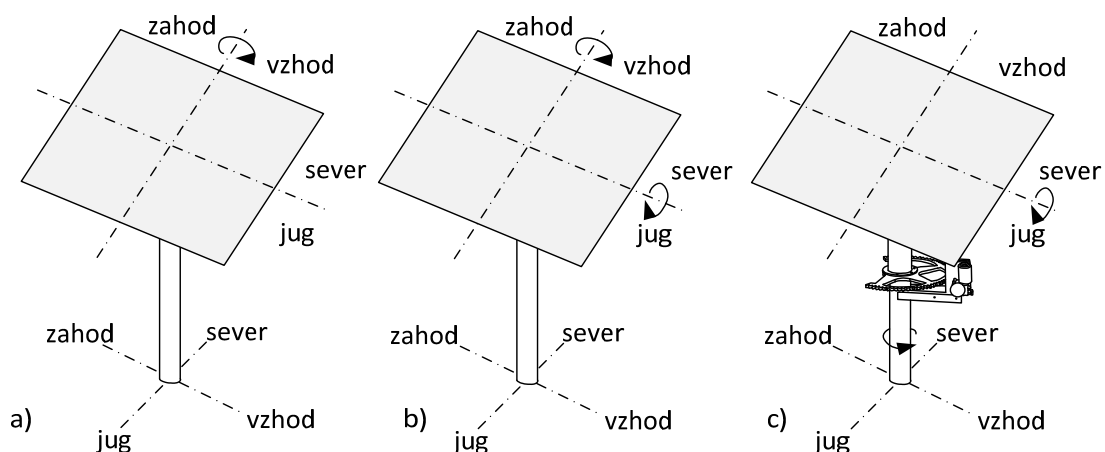
2.4 Zaključek poglavja

V poglavju dva smo celovito, vendar ne poglobljeno, opisali vse elemente sončne elektrarne, ki sicer niso predmet doktorske disertacije. Vse, kar je povedano v tem poglavju, lahko ovrednotimo kot splošen uvod, ki ni nujen, vendar lepo zaključi celoto dela. Opisani so vsi elementi, ki so potrebni za priključitev sončne elektrarne na javno električno omrežje. S pomočjo matematičnega modela sončne celice, ki je opisan v tem poglavju, so prikazani tudi različni parametri, ki vplivajo na samo delovanje.

3 Sistemi za sledenje

Če se omejimo na povečanje razpoložljive gostote moči sončnega sevanja, ki doseže površino modulov, lahko le-tega povečamo na dva načina. Prvi način je pravilna izbira absorpcijskih materialov, ki s tem absorbirajo čim več moči sončnega sevanja [118]. Drugi način, ki je predmet naloge, je povečanje gostote moči sončnega sevanja, ki pade na modul s pomočjo premikanja sledilnega sistema. Sledilni sistem omogoča, da sončni moduli sledijo trajektoriji sonca in s tem »ujamejo« večji delež sončnega sevanja v primerjavi s fiksnim sistemom. Izplen je največji takrat, ko žarki padejo pravokotno na površino sončnih modulov.

Sistem za sledenje oziroma sledilni sistem je mehatronski sistem, ki sestoji iz mehanike, elektronike in informacijske tehnologije [91]. Pri tem poznamo eno in dvoosne sledilne sisteme, ki so prikazani na sliki 3.1. Enoosni sledilni sistem sledi trajektoriji sonca v eni osi, najpogosteje v smeri vzhod – zahod, druga os pa je fiksno nastavljena, slika 3.1a. Dvoosni sledilni sistem sledi trajektoriji sonca v dveh oseh, vzhod – zahod in sever – jug. Pri tem poznamo polarni (slika 3.1b) in azimutni (slika 3.1c) dvo-osni sledilni sistem.



Slika 3.1: Sledilni sistemi: a) enoosni, b) dvoosni polarni in c) dvoosni azimutni.

Za vodenje tovrstnih pogonskih sklopov sledilnih sistemov se uporablja zaprto-zančni in odprto-zančni sistemi vodenja. Zaprtozančni sistemi [84] uporabljajo fotosenzor, ki določa položaj modulov. Fotosenzor pošilja signal električnemu pogonu o spremembi pozicije. V primeru spreminjajočega se vremena lahko tovrstni sistemi porabijo več energije, kot jo proizvede sama sončna elektrarna. Druga možnost je odprtozančni sistem [85] vodenja, ki temelji na

matematičnem algoritmu za določanje položaja sledilnega sistema. Položaj modulov je mogoče natančno določiti, saj se relativni položaj Sonca natančno določi za katerokoli lokacijo na Zemlji [120]. Hibridni sistemi [86], ki so kombinacija obeh, tako združujejo odprtozančni sistem in zaprtozančni sistem vodenja.

Proizvedena električna energija sončne elektrarne je odvisna predvsem od razpoložljivega sončnega sevanja, ki doseže sončne module, kakovosti in vrste uporabljenih sončnih modulov, njihove temperature, DC/DC pretvornika in DC/AC razsmernika. Na gostoto moči sončnega sevanja, ki doseže zemeljsko površino ne moremo neposredno vplivati, saj je odvisna predvsem od razmer v atmosferi in geografske lege. Gostota moči sončnega sevanja, ki doseže površino sončnih modulov, je največja, če žarki padejo pravokotno na normalo površine modula. Slednje dosežemo s pravilno uporabo in vodenjem pogonskega sklopa sledilnega sistema.

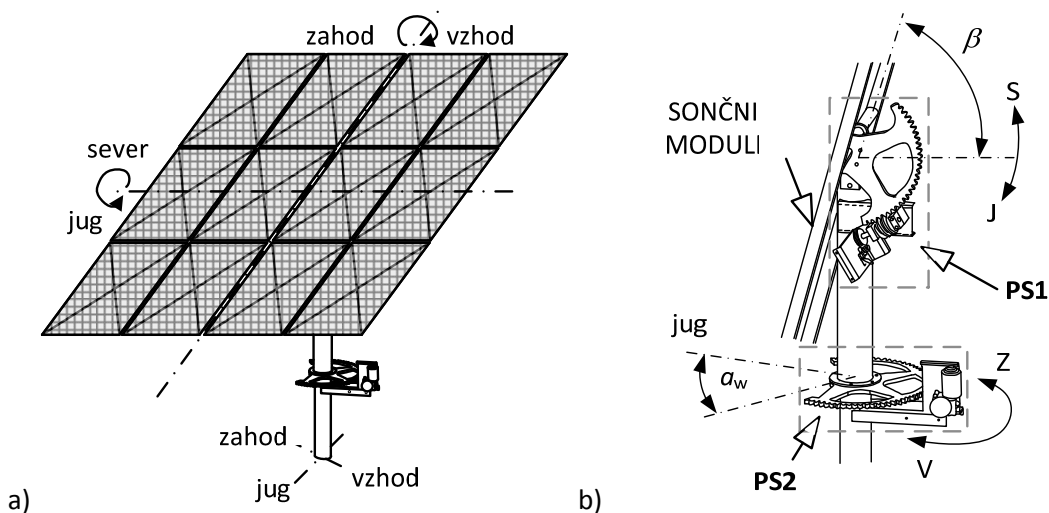
Za vključitev porabe električne energije sledilnega sistema v optimizacijski postopek je potrebno pravilno zapisati sam model sledilnega sistema. V doktorski disertaciji predlagan optimizacijski postopek, opisan v poglavju pet, za določanje trajektorij sledilnega sistema je splošen in se lahko uporablja z različnimi modeli sledilnega sistema. Pri tem je potrebno opozoriti, da lahko kompleksnost uporabljenega modela bistveno poveča zahtevnost računskih operacij in čas izračuna v optimizaciji. Po drugi strani zahtevnost uporabljenega modela sledilnega sistema ne vpliva na določitev trajektorij sledilnega sistema. Ena izmed možnosti je izgradnja dinamičnega (multi-body) modela sledilnega sistema skupaj z dinamičnimi modeli pogonskih sklopov in vodenja [91] - [101], ki jih imenujejo tudi virtualni modeli. Omenjen pristop omogoča tudi integracijo modela končnih elementov pri analizi dinamičnega (multi-body) modela. Vse to v okolju virtualnega modela [92]. V doktorski disertaciji je model sledilnega sistema zapisan v obliki karakteristike zaradi zmanjšanja zahtevnosti optimizacijskega postopka. Karakteristike, ki ustrezno predstavljajo dinamične in statične lastnosti sledilnega sistema, temeljijo na obsežnih meritvah in testiranjih, izvedenih na dejanskem dvoosnem sledilnem sistemu.

V nadaljevanju je podrobneje opisan in v doktorski disertaciji obravnavan dvoosni sledilni sistem. Spremembe naklonskega kota in azimuta dosežemo z vklapljanjem in izklapljanjem pogonskih sklopov. Na osnovi meritev so določene časovno odvisne karakteristike sprememb naklonskega kota in azimuta sledilnega sistema, ki jih v nadaljevanju uporabimo za predstavitev dinamičnega in statičnega obnašanja sledilnega sistema. Na osnovi meritev so določene tudi karakteristike porabe električne energije, ki so odvisne od posameznih sprememb naklonskega kota in azimuta. Vse omenjene karakteristike uporabimo kot model sledilnega sistema pri določitvi optimalnih trajektorij naklonskega kota in azimuta.

3.1 Dvoosni sledilni sistemi

Obravnavan azimutni dvoosni sledilni sistem je predstavljen na sliki 3.2. Dvoosni sledilni sistem sledi soncu s spreminjanjem naklonskih kotov v dveh oseh, vzhod – zahod in sever – jug. S

spreminjanjem kota v eni osi sledimo soncu od vzhoda proti zahodu, kar je na sliki 3.2 b nakazano z azimutom α_w , s spreminjanjem kota v drugi osi pa sledimo soncu od severa proti jugu, s čimer spreminjamo naklon β . Obravnavan dvoosni sledilni sistem ima ločena pogonska sklopa za spreminjanje naklonskega kota β in azimuta α_w , ki sta neodvisna. Pogonski sklop za spremembo naklona β je označen s PS1, medtem ko je pogonski sklop za spremembo azimuta α_w , označen s PS2. Navor potreben za spremembo obeh kotov je dobljen iz dveh enosmernih motorjev s trajnimi magneti, ki sta napajana s 24 V napetostjo iz baterije. Prestavno razmerje zgornjega pogonskega sklopa PS1 za spremembo naklona β je 12:40:15, medtem ko je prestavno razmerje spodnjega pogonskega sklopa PS2 za spremembo azimuta α_w , 12:40:20. Obravnavan dvoosni sistem je industrijski proizvod, kupljen na trgu. Postavitev sončnih modulov na dvoosnem sledilnem sistemu je shematsko prikazana na sliki 3.2 a, kjer je skupna masa sistema 262 kg (masa sledilnega sistema je $m = 97$ kg brez modulov, masa posameznega modula pa je $m = 13,8$ kg) in s težiščem v sredini površine. Površino panela sončne elektrarne na sliki 3.2 a, sestavlja dvanajst modulov moči 205 W. Celotna površina panela je tako $15,32$ m², kjer je površina posameznega modula $1,28$ m² (dimenzije modula so: 1580x808x50 mm, DxVxŠ v milimetrih). Moduli so povezani v serijo, tako da je skupna inštalirana moč sledilne sončne elektrarne 2,5 kWp.



Slika 3.2: Dvoosni sledilni sistem.

Simulacijske izračune za omenjeno konfiguracijo bomo ovrednotili s primerjavo med izmerjenimi vrednostmi na eksperimentalni sončni elektrarni, postavljeni na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko (FERI). Eksperimentalno sončno elektrarno sestavljajo 3 polja skupne aktivne površine približno 75 m² in inštalirane moči $7,5$ kWp. Ker je vsako polje posebej priključeno na omrežje preko enofaznega razsmernika, lahko za ovrednotenje naših rezultatov uporabimo eno polje, ki ima inštalirano moč $2,5$ kWp.

Sledilni sistem za sledenje trajektoriji sonca uporablja pogonska sklopa, ki sta porabnika električne energije. Pri tem poraba električne energije pogonskih sklopov predstavlja za sončno elektrarno električne izgube. Za samo načrtovanje sledenja sledilnega sistema je potrebno upoštevati tudi omenjene izgube. Da bi izgube čim bolj pravilno zajeli v samem optimizacijskem postopku, bomo

izgube podali v odvisnosti od spremembe naklona in azimuta. Načeloma lahko sledilni sistem opišemo na več različnih načinov. V našem primeru je izbrani način primeren za vključitev v optimizacijski postopek. Predlagan optimizacijski postopek za določanje trajektorije sledilnega sistema je splošen in je primeren tudi za druge načine opisa sledilnega sistema. Vendar se moramo zavedati, da lahko kompleksnost opisa modela sledilnega sistema bistveno poveča računsko zahtevnost in s tem čas, potreben za izvedbo optimizacije. Ena izmed možnosti je tudi izdelava dinamičnega (multi-body) modela sledilnega sistema skupaj z dinamičnimi modeli pogonskih sklopov in nadzorom [94] in [98], ki v našem primeru ne pride v poštev.

V poglavju 3.2 bomo pokazali postopek, s pomočjo katerega smo opisali električne izgube dvoosnega sledilnega sistema v odvisnosti od spremembe naklona in azimuta.

3.2 Električne izgube dvoosnega sledilnega sistema

V doktorski disertaciji je obnašanje sledilnega sistema opisano v obliki karakteristik, kar zmanjša računsko zahtevnost pri izvedbi optimizacije. Karakteristike, ki ustrezno predstavljajo dinamične in statične lastnosti sledilnega sistema, so določene na podlagi obsežnih meritev in testiranja obravnavanega sistema. Med različnimi preizkusi smo vrednost naklona $\beta(t)$ in azimuta $a_w(t)$ merili skupaj z napetostjo $u(t)$ in tokom $i(t)$ obeh enosmernih motorjev s trajnimi magneti, ki sta del pogonskih sklopov PS1 in PS2. Za merjenje spremembe naklona in azimuta smo uporabili inkrementalni dajalnik s 5000 impulzi na obrat, medtem ko smo napetost in tok motorjev merili z diferenčnimi sondami in senzorji toka LEM. Za zajemanje podatkov smo uporabili nadzorni sistem dSpace 1103 PPC s časom vzorčenja 1 ms. Preizkuse smo izvedli sistematično pri različnih začetnih in končnih vrednostih naklona in azimuta, tako da vsak preizkus vsebuje zagon motorja in delovanje pri konstantni hitrosti. Za vsak preizkus se poraba električne energije, z drugimi besedami električne izgube, sledilnega sistema $E_c(t)$ izračuna s (3.1), s pomočjo izmerjenih trenutnih vrednosti napetosti $u(t)$ in tokov $i(t)$, prikazanih na slikah 3.3 in 3.6.

$$E_c(t) = \int_0^t u(\tau)i(\tau)d\tau \quad (3.1)$$

V nadaljevanju bomo najprej pokazali postopek, kako električne izgube oziroma porabo sledilnega sistema zapišemo v odvisnosti od spremembe naklona in azimuta. Najprej si pogledajmo primer za pogonski sklop 1 (PS1), ki omogoča spremembo naklona β . Pri določanju izgub PS1 smo opravili več različnih preizkusov, pri čemer smo ugotovili, da začetni položaj naklona β bistveno ne vpliva na določitev električnih izgub. Pri tem smo spreminjali začetni položaj naklona β od 0° vse do 80° , kjer začetni položaj $\beta = 0^\circ$ pomeni vodoravni položaj modulov. Na sliki 3.3 so prikazane izmerjene vrednosti napetosti $u(t)$ in tokov $i(t)$ za štiri primere. Pri tem smo v primeru I spreminjali naklon β od 0° do skoraj 90° . Navpične lege naklona $\beta = 90^\circ$ ne moremo doseči zaradi mehanskih omejitev

samega sledilnega sistema. V drugem primeru (primer II) je postopek enak kot v primeru I le, da smo sedaj naklon β spreminjali od skoraj 90° do 0° . V primeru III smo naklon β spreminjali med 0° in 40° , medtem ko smo v primeru IV naklon β spreminjali med 40° in 0° .

Z integriranjem trenutnih vrednosti napetosti $u(t)$ in tokov $i(t)$ s (3.1) določimo električne izgube pogoškega sklopa PS1 sledilnega sistema, kot je to prikazano na sliki 3.4 skupaj s spremembo naklona $\Delta\beta$ v odvisnosti od časa.

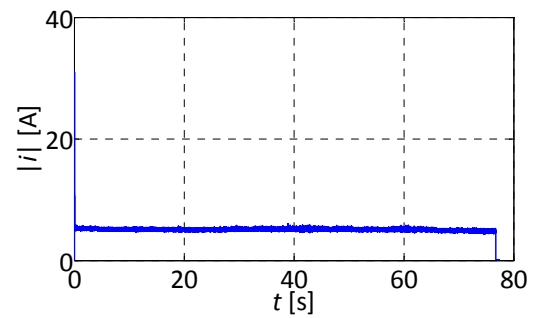
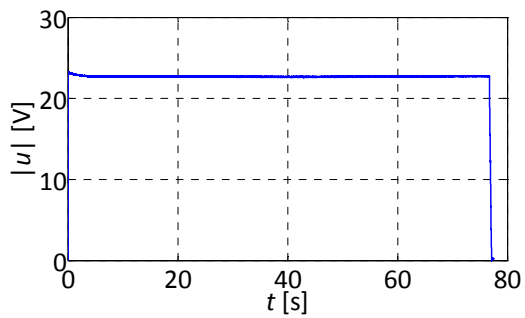
S povprečenjem primerov od I do IV smo električne izgube oziroma porabo E_c sledilnega sistema za PS1 zapisali v odvisnosti od spremembe naklona $\Delta\beta$, kot kaže slika 3.5. Električne izgube E_c v odvisnosti od spremembe naklona $\Delta\beta$ smo zapisali tako za pozitivne kot tudi negativne spremembe naklona.

Kot smo to pokazali za PS1, pokažimo še za PS2, kjer spreminjamo azimuta a_w . Pri tem smo spreminjali začetni položaj azimuta a_w od 0° do 180° , kjer začetni položaj $a_w = 0^\circ$ pomeni usmerjenost modulov skrajno vzhodno, $a_w = 180^\circ$ pa usmerjenost modulov skrajno zahodno. Na sliki 3.6 so prikazane izmerjene vrednosti napetosti $u(t)$ in tokov $i(t)$ za dva primera. Pri tem smo v primeru I spreminjali azimut a_w od 0° do 180° .

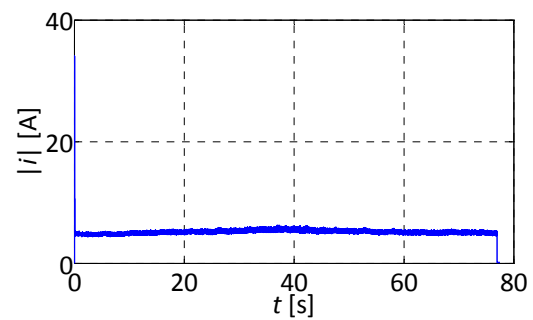
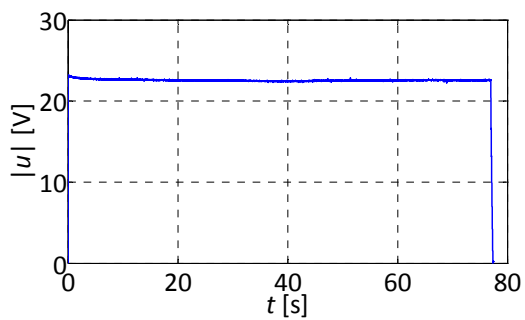
Z integriranjem trenutnih vrednosti napetosti $u(t)$ in tokov $i(t)$ s (3.1) določimo električne izgube pogoškega sklopa PS2 sledilnega sistema, kot je to prikazano na sliki 3.7 skupaj s spremembo azimuta Δa_w v odvisnosti od časa.

S povprečenjem primerov I in II smo električne izgube oziroma porabo E_c sledilnega sistema za PS2 zapisali v odvisnosti od spremembe azimuta Δa_w , kot kaže slika 3.8. Električne izgube E_c v odvisnosti od spremembe azimuta Δa_w smo zapisali za pozitivne in za negativne spremembe azimuta.

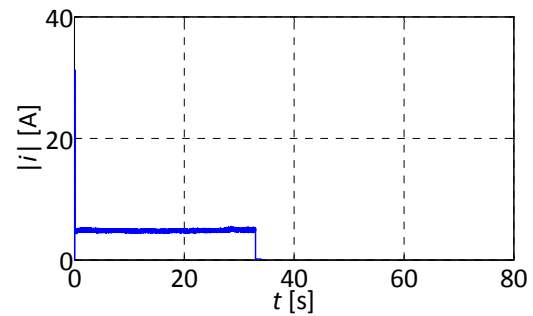
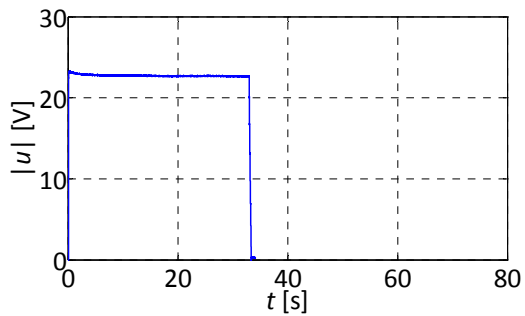
Primer I



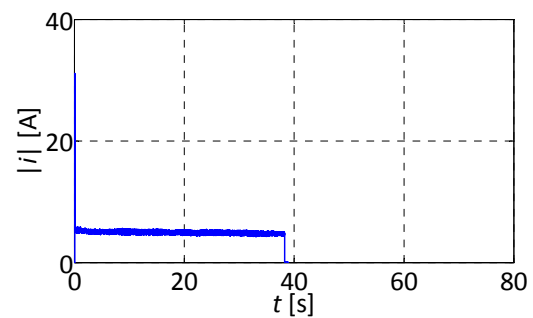
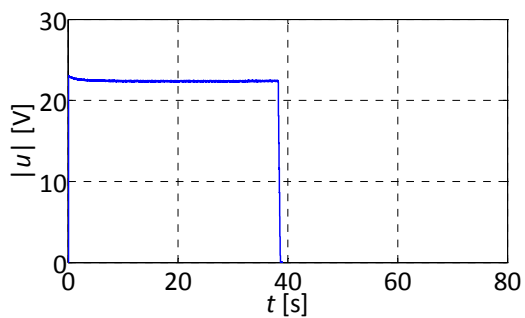
Primer II



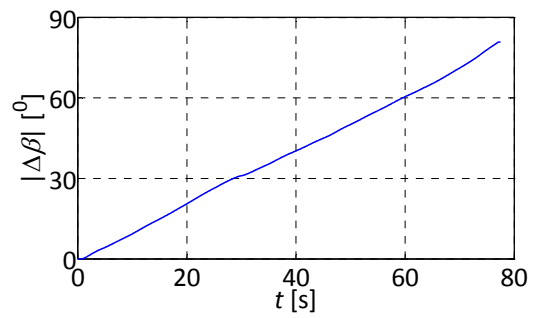
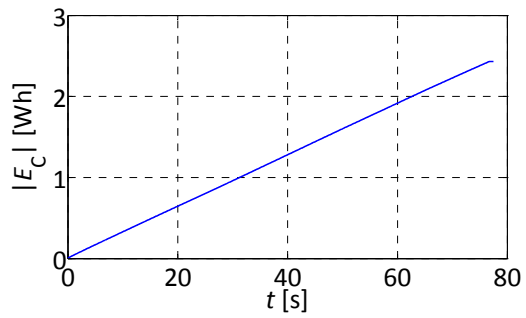
Primer III



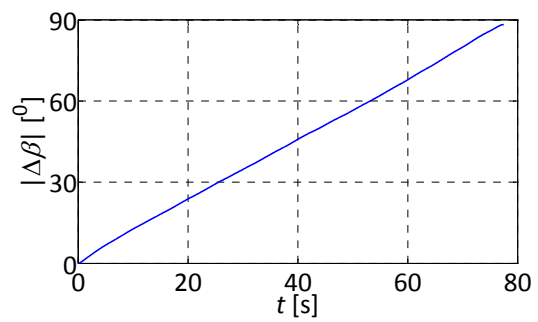
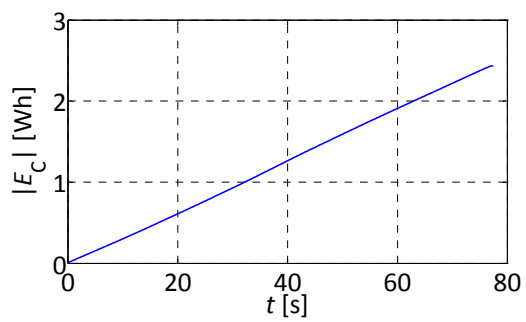
Primer IV

Slika 3.3: Trenutni vrednosti napetosti $u(t)$ in tokov $i(t)$ za PS1.

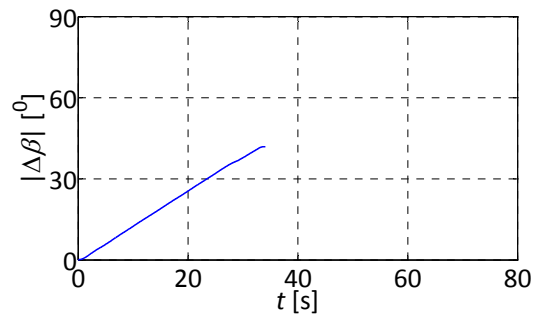
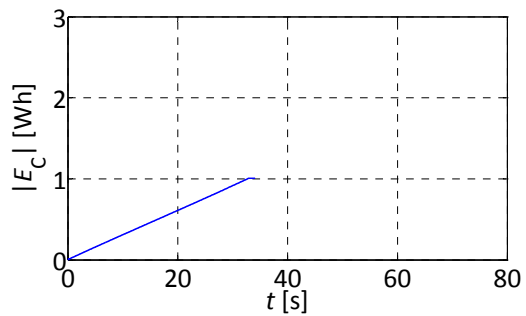
Primer I



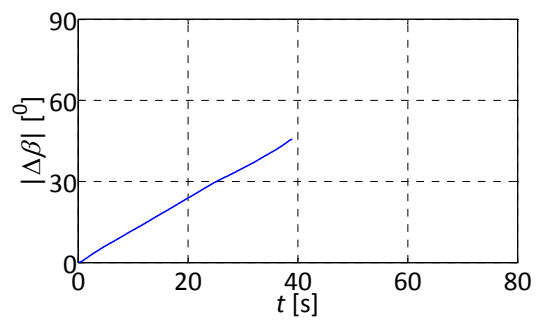
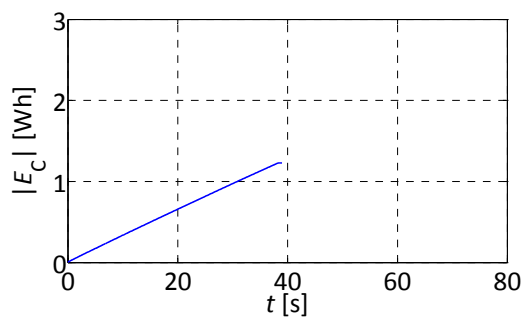
Primer II

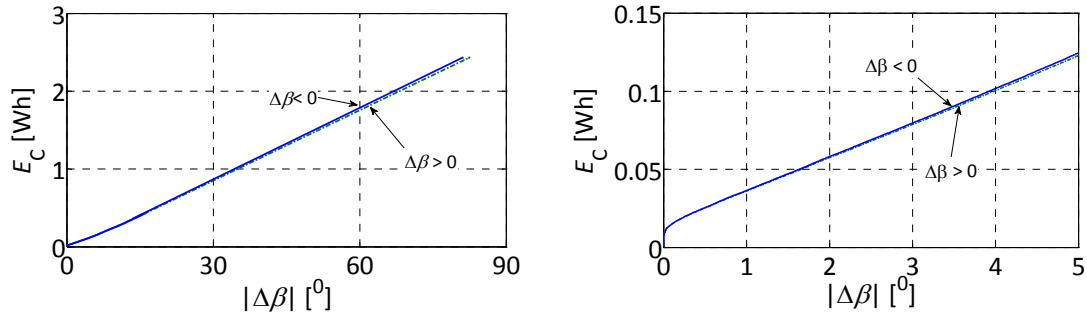


Primer III



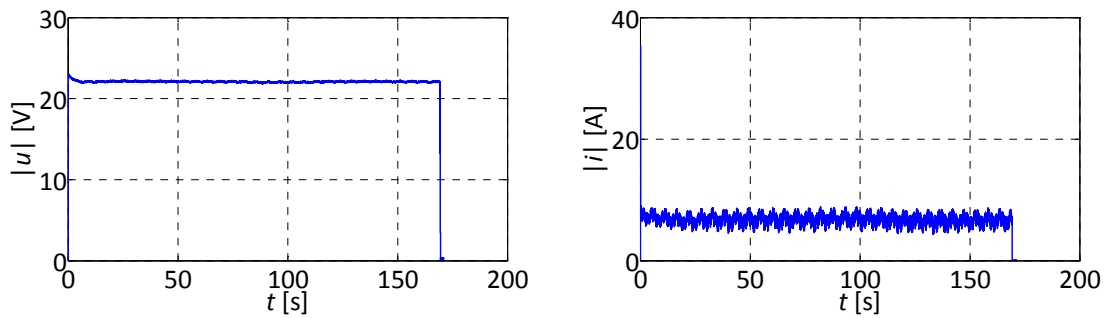
Primer IV

Slika 3.4: Trenutni vrednosti električnih izgub $E_C(t)$ in spremembe kota $\Delta\beta(t)$ za PS1.

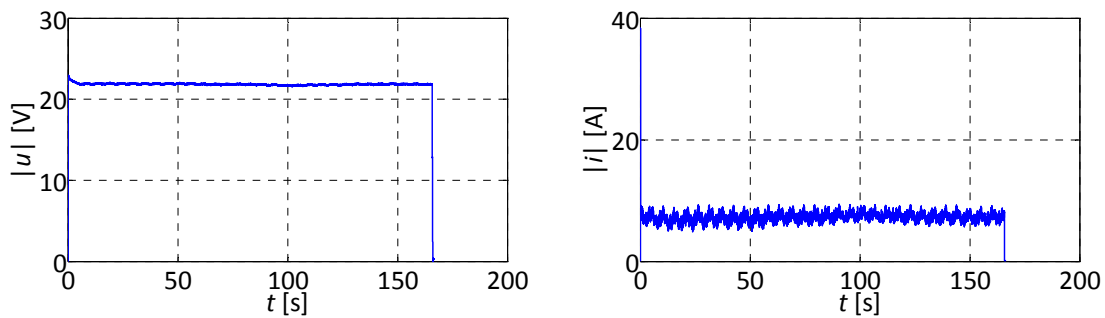


Slika 3.5: Električne izgube E_C v odvisnosti od spremembe kota $\Delta\beta(t)$ za PS1.

Primer I

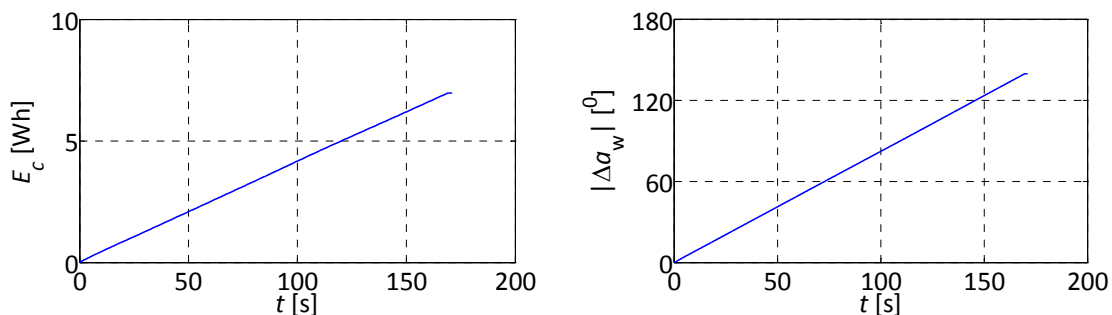


Primer II

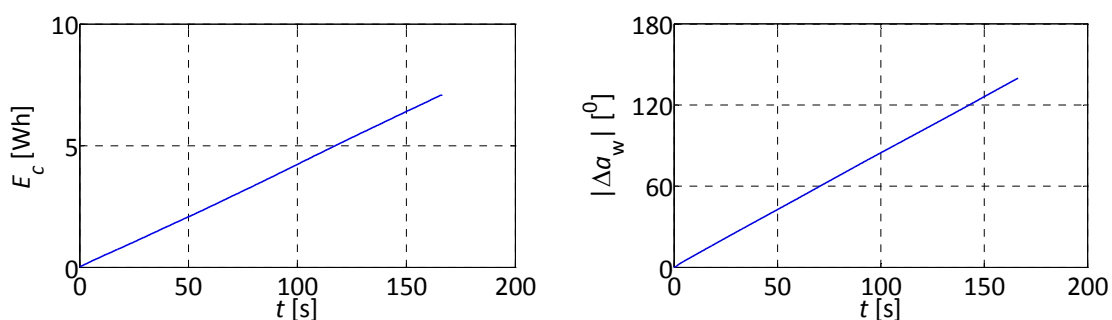
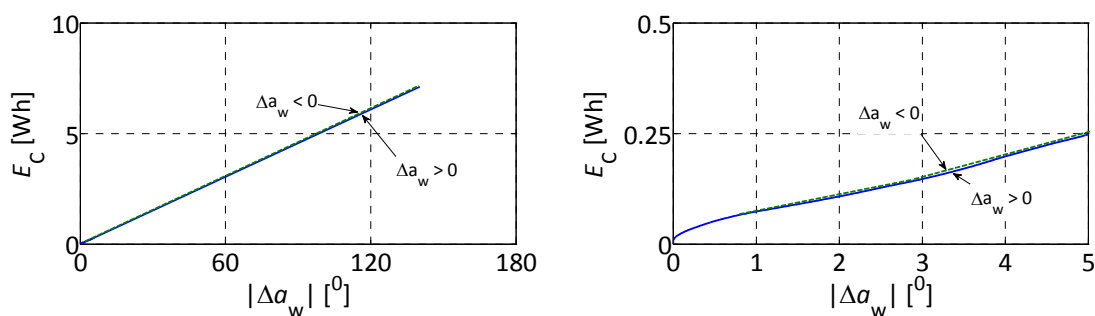


Slika 3.6: Trenutni vrednosti napetosti $u(t)$ in tokov $i(t)$ za PS2.

Primer I



Primer II

Slika 3.7: Trenutni vrednosti električnih izgub $E_c(t)$ in spremembe kota $\Delta a_w(t)$ za PS2.Slika 3.8: Električne izgube E_c v odvisnosti od spremembe kota $\Delta a_w(t)$ za PS2.

Pri tem iz slik 3.5 in 3.8 vidimo, da imata merjen naklon β in azimut a_w ob vklopu malenkost višjo hitrost kot v stacionarnem stanju. Analiza izmerjenih rezultatov, upoštevajoč napako meritve in povprečenja, pokaže, da začetno stanje naklona β ali azimuta a_w bistveno ne vpliva na časovno odvisno karakteristiko $\beta(t)$ in $a_w(t)$ sledilnega sistema. Tako lahko za optimizacijski postopek sledilni sistem opišemo kot karakteristike $\Delta\beta(t)$, $\Delta a_w(t)$ in $E_c(|\Delta\beta|)$, $E_c(|\Delta a_w|)$, prikazane na slikah 3.5 in 3.8. Kot je razvidno iz slik 3.5 in 3.8, se karakteristike nekoliko razlikujejo za pozitivne

in negativne kote. Kjer pozitivni koti predstavljajo premik od severa proti jugu in premik od vzhoda proti zahodu, medtem ko negativni koti predstavljajo premik od juga proti severu in premik od zahoda proti vzhodu. Vpliv zagona motorja, tako za spremembo naklona kot tudi za spremembo azimuta, je prikazan v nelinearni spremembi kota manjši od 5 stopinj.

Naj pojasnimo, kako so karakteristike na slikah 3.5 in 3.8 vključene v optimizacijski postopek. Če predpostavimo, da je t_0 čas vklopa enosmerne motorja za spremembo naklona od $\beta(t_0)$ za $\Delta\beta$, potem se naklon $\beta(t)$ spreminja kot $\beta(t) = \beta(t_0) + \Delta\beta(t-t_0)$, dokler ne doseže vrednosti $\beta(t_0) + \Delta\beta$, kjer se motor izklopi. $\Delta\beta(t-t_0)$ je podana na sliki 3.5. Poraba električne energije oziroma izgube sledilnega sistema za dano spremembo naklona so podane s karakteristiko $E_c(|\Delta\beta|)$ na sliki 3.5. Enak postopek, kot je opisan za spremembo naklona β , se uporablja tudi za spremembo azimuta α_w .

3.3 Zaključek poglavja

V poglavju tri je predstavljen dvoosni sledilni sistem, ki omogoča sledenje modulov poti sonca. Pogonska sklopa, ki sta del sledilnega sistema in omogočata premikanje modulov, sta porabnika električne energije. Če želimo v optimizaciji, ki je opisana v petem poglavju, upoštevati izgube pogonskega sklopa, smo v ta namen v tem poglavju sledilni sistem zapisali kot karakteristiki $E_c(|\Delta\beta|)$ in $E_c(|\Delta\alpha_w|)$.

4 Napoved sončnega sevanja

4.1 Sončno sevanje in osnovne geometrijske relacije med Soncem in Zemljo

Izvor sončne energije je Sonce, ki je centralno telo našega osončja in nam najbližja zvezda. Sonce je sestavljeno predvsem iz vodika (73,46 %), helija (24,58 %), kisika (0,77 %), ogljika (0,29 %) in neona (0,12 %). Majhni delež ga sestavljajo v plinastem stanju kovine, kot so železo (0,16 %), magnezij (0,05 %), silicij (0,07 %) in podobni. Pri tem so znanstveniki z meritvami dokazali, da se na Soncu nahaja okrog 100 različnih elementov, kar je skoraj ves periodni sistem. Sonce ima tri notranje plasti, med katerimi ni ostre meje. Osrednji del je jedro, v katerem sta temperatura in tlak zelo visoka. Tam poteka jedrska fuzija, pri kateri se vodikova jedra pretvorijo v helijeva. Stranski produkt te reakcije so fotoni (elektromagnetno sevanje) in nevtrini (delci z zelo majhno maso in brez električnega naboja). Fotoni, ki predstavljajo večino sproščene energije, potujejo navzven skozi sevalno območje. Nato fotoni pridejo na konvekcijsko območje, kjer se energija prenaša proti najnižji plasti sončeve atmosfere, fotosferi (vidna površina Sonca), od tam pa fotoni kot vidna svetloba pobegnejo v okolico [123]. Sonce v okoliški prostor neprestano pošilja svojo energijo, pri čemer je izsevana moč Sonca ocenjena na $3,845 \cdot 10^{26}$ W [108]. Če obravnavamo Sonce kot črno telo s (4.1), definiramo gostoto moči sevanja Sonca na enoto površine M :

$$M = \frac{\Phi}{A_s} = \frac{3,845 \cdot 10^{26}}{6,0874 \cdot 10^{18}} = 63,167 \text{ MW} / \text{m}^2 \quad (4.1)$$

pri tem je Φ izsevana moč Sonca, A_s pa površina Sonca. S pomočjo Stefanovega zakona, ki pravi, da gostota moči sevanja črnega telesa narašča s četrto potenco temperature, lahko izračunamo temperaturo Sonca T_s na površju s (4.2). Pri tem omenimo, da temperatura Sonca proti notranjosti raste vse do $40 \cdot 10^6$ K.

$$M = \sigma T_s^4 \quad T_s = \sqrt[4]{\frac{M}{\sigma}} = \sqrt[4]{\frac{63,167 \cdot 10^6}{5,670 \cdot 10^{-8}}} = 5777K \quad (4.2)$$

Pri tem je $\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ Stefan-Boltzmannova konstanta.

Energija, ki jo Sonce neprestano pošilja v okoliški prostor, se sprošča v obliki elektromagnetnega valovanja. Elektromagnetno valovanje nastaja kot posledica jedrskih reakcij in drugih fizikalnih pojavov na Soncu. Sevanje tako zajema radijske valove, mikrovalove, infrardeče sevanje, vidno svetlobo, ultravijolično sevanje, rentgenske žarke in gama žarke. Gostota moči sončnega sevanja I_0 na zunanjem robu zemljine atmosfere, na razdalji ene astronomske enote ($1 \text{ AU} = 1,496 \cdot 10^{11} \text{ m}$) med Soncem in zemljino atmosfero, znaša 1367 W/m^2 in je definirana s (4.3). Gostoto moči sončnega sevanja I_0 na zunanjem robu zemljine atmosfere z drugimi besedami imenujemo tudi solarna konstanta.

$$I_0 = M \left(\frac{r_s}{r_0} \right)^2 = 63,167 \cdot 10^6 \left(\frac{6,959 \cdot 10^8}{1,496 \cdot 10^{11}} \right)^2 = 1367 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (4.3)$$

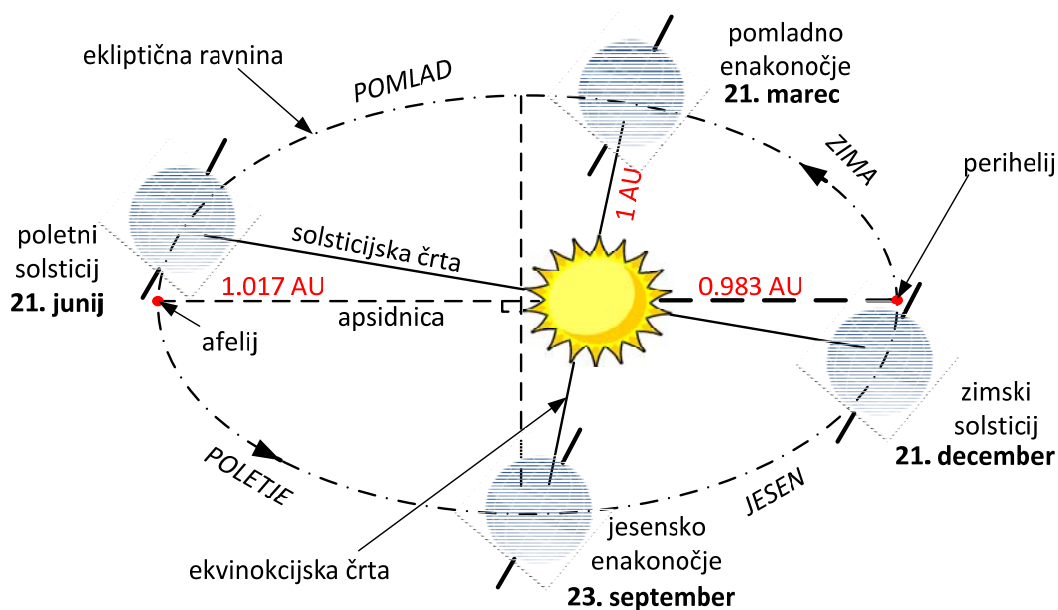
Pri tem je M moč sončnega sevanja, definirana s (4.1), $r_s = 6,959 \cdot 10^8 \text{ m}$ polmer Sonca, $r_0 = 1,496 \cdot 10^{11} \text{ m}$ pa povprečna razdalja med Zemljo in Soncem (1 AU).

Osnovne geometrijske relacije med Soncem in Zemljo

Osnovni geometrijski pojmi, ki opisujejo položaj točke na Zemlji glede na položaj Sonca, so deklinacija δ , urni kot h_s , zemljepisna širina L in zemljepisna dolžina l . Omenjeni koti so podani v nadaljevanju tega poglavja. Iz njih izpeljani so: zenitni kot z , kotna višina sonca α in azimut sonca α_s . Vpadno sončno sevanje na poljubno usmerjeno ploskev natančno opišemo še s tremi dodatnimi spremenljivkami, to so: naklon ploskve β , azimut ploskve α_w in vpadni kot i . Izpeljani koti, ki zahtevajo večjo pozornost, so zbrani v naslednjem poglavju 4.2.

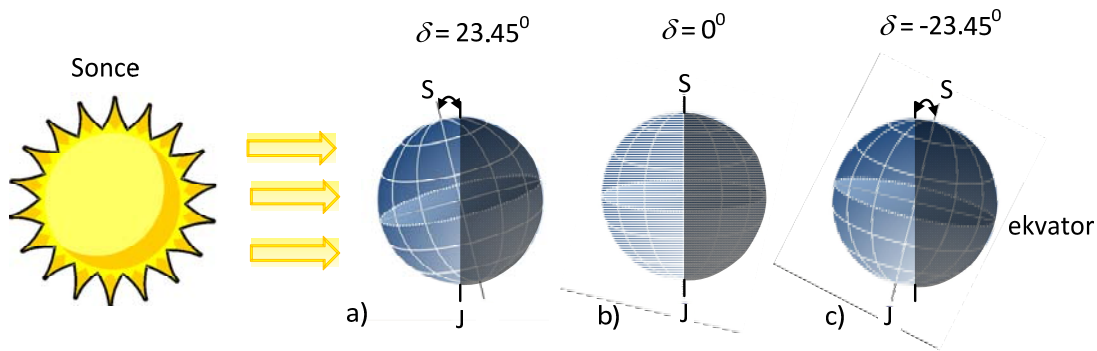
V nadaljevanju podajamo opis omenjenih geometrijskih pojmov, ki opisujejo položaj točke na Zemlji. Fizikalno poznamo več vrst gibanja Zemlje. Medtem ko astronomi poznajo 14 različnih gibanj Zemlje, sta za našo obravnavo pomembni predvsem dve: vrtenje Zemlje okrog lastne osi in vrtenje Zemlje okrog Sonca.

Vrtenje Zemlje okrog Sonca poteka po tirnici, ki ima obliko elipse in je nameščena na ravnini ekliptike, kot je to prikazano na sliki 4.1. Obseg elipse znaša $939,2 \cdot 10^6 \text{ km}$, dolžina velike osi elipse, ki se imenuje apsidnica, je $1,017 \text{ AU}$, medtem ko krajša os meri $0,983 \text{ AU}$. Apsidnica je povezovalna črta med perihelijem, ki je Soncu najbližja točka na zemljini poti ter med afelijem, točki, ki leži najdlje od Sonca glede na zemljino pot. Sonce se namreč nahaja na apsidnici, vendar ne v njeni sredini. Na zemljinem tiru se pojavlja več značilnih točk. Dve že omenjeni točki sta perihelij in afelij, preostaneta še dve pomembni točki, katerih oddaljenosti od Sonca sta enaki, to je natanko 1 AU .



Slika 4.1: Vrtenje Zemlje okrog Sonca.

Zaradi dejstva, da se zemeljska os vrti okrog svoje osi, pri opazovanju Sonca z določene točke na Zemlji opazimo, da Sonce vsak dan v letu vzhaja, doseže vrh in zahaja na različnih mestih. Ob že omenjenem se pojavijo štiri značilni dnevi v letu, ki so za lažje razumevanje nadaljnega opisa predstavljeni tudi na sliki 4.1. Prvi izmed teh je spomladansko enakonočje (21. marec), kjer velja, da Sonce vzhaja na 0° , natanko nad vzhodom, kot kaže slika 4.2 b. Premika se preko točke svoje kulminacije do točke zahoda, ki se tega dne ravno tako pokriva s točko zahoda po azimutu. Zemlja se na ta dan pojavi natančno na presečišču ekliptike in nebesnega ekvatorja, kar pomeni, da bo dan enako dolg kot noč. Po tem datumu se Sonce začne premikati proti severu tako, da je točka njegovega vzhoda vedno večja od točke azimutnega vzhoda, dokler ne doseže maksimuma $23^\circ 26' 42''$ na dan 21. junij. Sonce je takrat v zenitu nad severnim pravokotnikom (slika 4.2 a). Nato se njegov vzhod in zahod vsak dan spuščata bolj proti 270° azimuta in ga prekoračita 22. septembra. To je dan, ko je Sonce zopet v zenitu in je dan enako dolg kot noč (slika 4.2 b). Zatem točka vzhoda ponovno raste, ko sončev zenit potuje proti njegovi najjužnejši točki v celotnem letu, ki ga doseže 21. decembra (slika 4.2 c).



Slika 4.2: Naklon osi Zemlje za: a) poletni solsticij, b) pomladno in jesensko enakonočje in c) zimski solsticij.

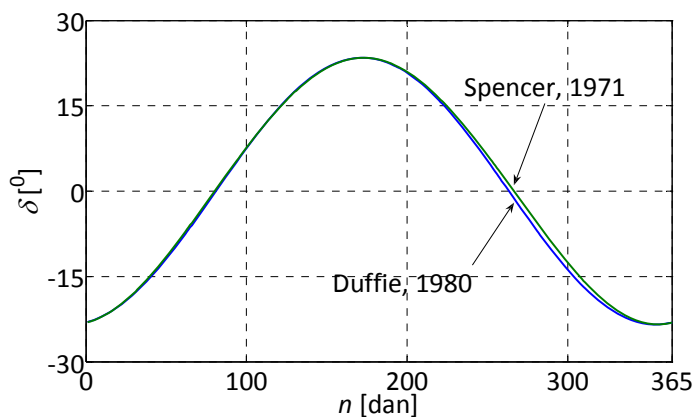
Tako zgoraj opisan kot, ki je kot med zveznico središč Zemlje in Sonca in ekvatorialno ravnino Zemlje [107], imenujemo deklinacija δ . Deklinacijo za določen dan v letu izrazimo s preprostim aproksimacijskim izrazom (4.4), ki sta ga vpeljala Duffie in Beckmann, leta 1980, ali natančneje s Fourierjevo vrsto, ki jo je leta 1971 vpeljal Spencer (4.5).

$$\delta = 23,45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + n) \right] \quad (4.4)$$

$$\delta = \left(\begin{array}{l} 0,006918 - 0,399912 \cos B + 0,070257 \sin B \\ -0,006758 \cos 2B + 0,000907 \sin 2B \\ -0,002697 \cos 3B + 0,00148 \sin 3B \end{array} \right) \frac{180^\circ}{\pi} \quad (4.5)$$

$$B = 360^\circ \frac{n-1}{365} \quad (4.6)$$

kjer je n dan v letu z začetkom štetja od 1. januarja. Slika 4.3 kaže deklinacijo δ v odvisnosti od dneva v letu n , določeno s (4.4) in (4.5). Iz slike 4.3 je razvidna majhna razlika med rezultati, določenimi s preprostim aproksimacijskim izrazom (4.4) in s Fourierjevo vrsto (4.5), zato v nadaljevanju uporabljamo enostavnejši zapis (4.4).

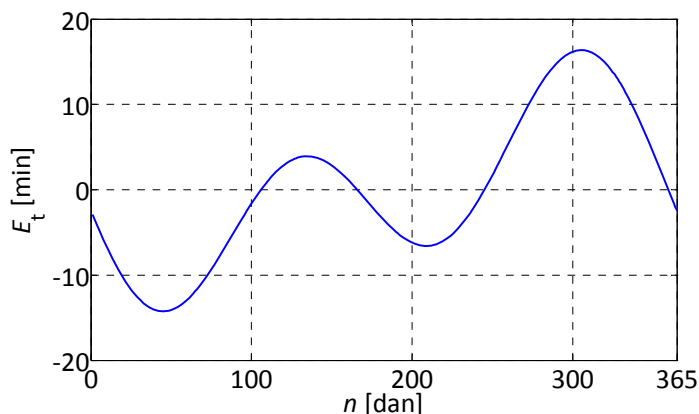


Slika 4.3: Deklinacija δ , podana kot funkcija dneva v letu n .

Ker se Zemlja vrti okoli svoje osi tako, da se zavrti za 360° v enem dnevu (v 24-ih urah), natančneje v 23 h 56 min 4 s, in ob tem potuje po tirnici okoli Sonca, pri čemer za en cikel potrebuje eno leto, oziroma 365,24 zemeljskih dni, je za natančno analizo potrebno upoštevati popravek časa. Ker za dan uporabljamo 24 h in za leto 365 dni oziroma 366 dni za vsako četrto prestopno leto, s (4.7) popravljamo odstopanja E_t od pravičnega sončnega časa (*true solar time* or *true local time TLT*) in lokalnega dnevnega časa, kjer je dan dolg 24 h.

$$E_t = 229,2 \begin{pmatrix} 0,000075 + 0,001868 \cos B - 0,032077 \sin B \\ -0,014615 \cos 2B - 0,040849 \sin 2B \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

Pri tem je B podan s (4.6). Slika 4.4 kaže popravek časa E_t v minutah za posamezni dan v letu, ki ga uporabimo v nadaljevanju za izračun pravičnega urnega kota sonca h_s .



Slika 4.4: Popravek časa E_t kot funkcija dneva v letu n .

Zemlja je razdeljena na 24 časovnih con, v katerih imajo prebivalci enako nastavljene ure. Zato obstajajo razlike med lokalnim urnim časom in sončnim časom. Če želimo izračunati pravični

lokalni čas TLT , najprej definiramo popravek časa zaradi zemljepisne širine (longitude correction) L_c , s (4.8).

$$L_c = 4(L_{zone} - L_{local}) \text{ [min]} \quad (4.8)$$

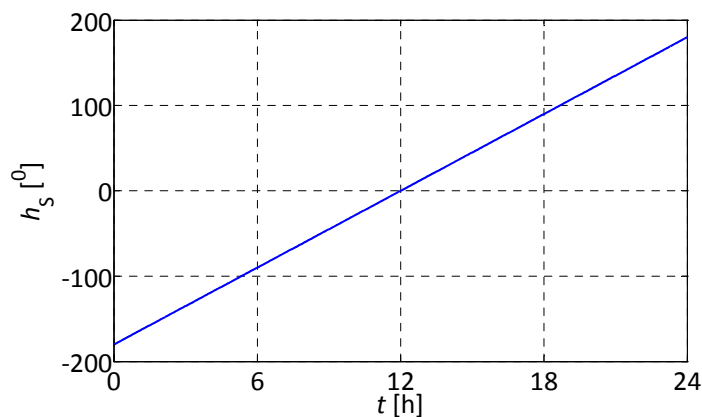
Pri tem je L_{zone} standardna zemljepisna širina (Standard Time Meridian), ki je 15^0 , L_{local} opazovana zemljepisna širina (Local Time Meridian), ki je za mesto Maribor $15^0 38'$. Sedaj s (4.7), (4.8) in centralnim evropskim poletnim časom (Central European Summer Time - CET) definiramo pravilni lokalni čas TLT (4.9).

$$TLT = CET - L_c + E_t \quad (4.9)$$

Urni kot sonca h_s (4.10) je tako določen s pomočjo pravilnega lokalnega časa TLT . Urni kot, izražen v stopinjah, ima ob sončnem poldnevu za določeno lokacijo vrednost nič, vsako uro pa se spremeni za 15^0 . Slika 4.5 kaže urni kot Sonca, kjer je po dogovoru kot pozitiven za popoldanski čas in negativen za dopoldanski čas [116].

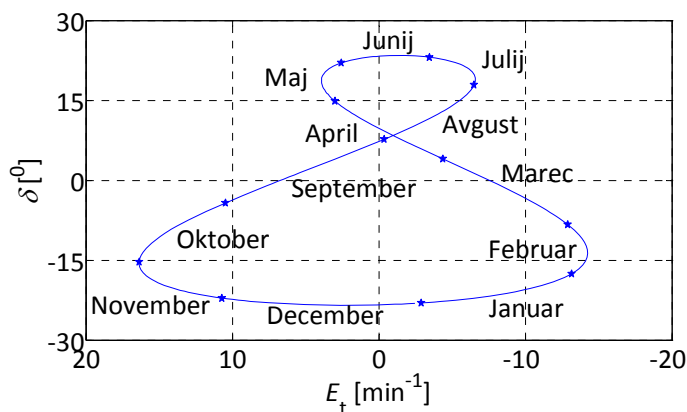
$$h_s(t) = (TLT - 12:00h) \frac{15^0}{t} \quad (4.10)$$

$$h_s(t) = \pm 15^0 (\text{število ur od/do sončnega poldneva}) \quad (4.11)$$



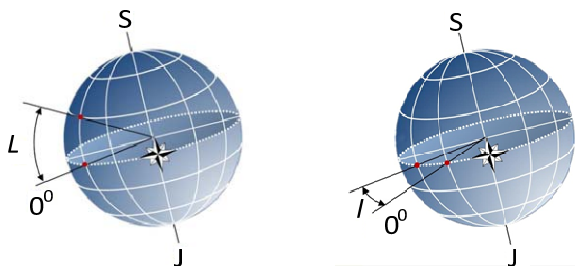
Slika 4.5: Urni kot sonca h_s kot funkcija časa t .

Če združeno prikažemo sliki 4.3 in 4.4, dobimo sliko 4.6, ki kaže odvisnost kota deklinacije (4.4) od popravka časa (4.7), angleško imenovana tudi analemma [120]. Tako iz slike 4.6 vidimo odstopanje časa po posameznih mesecih kot tudi deklinacijo.



Slika 4.6: Analemma.

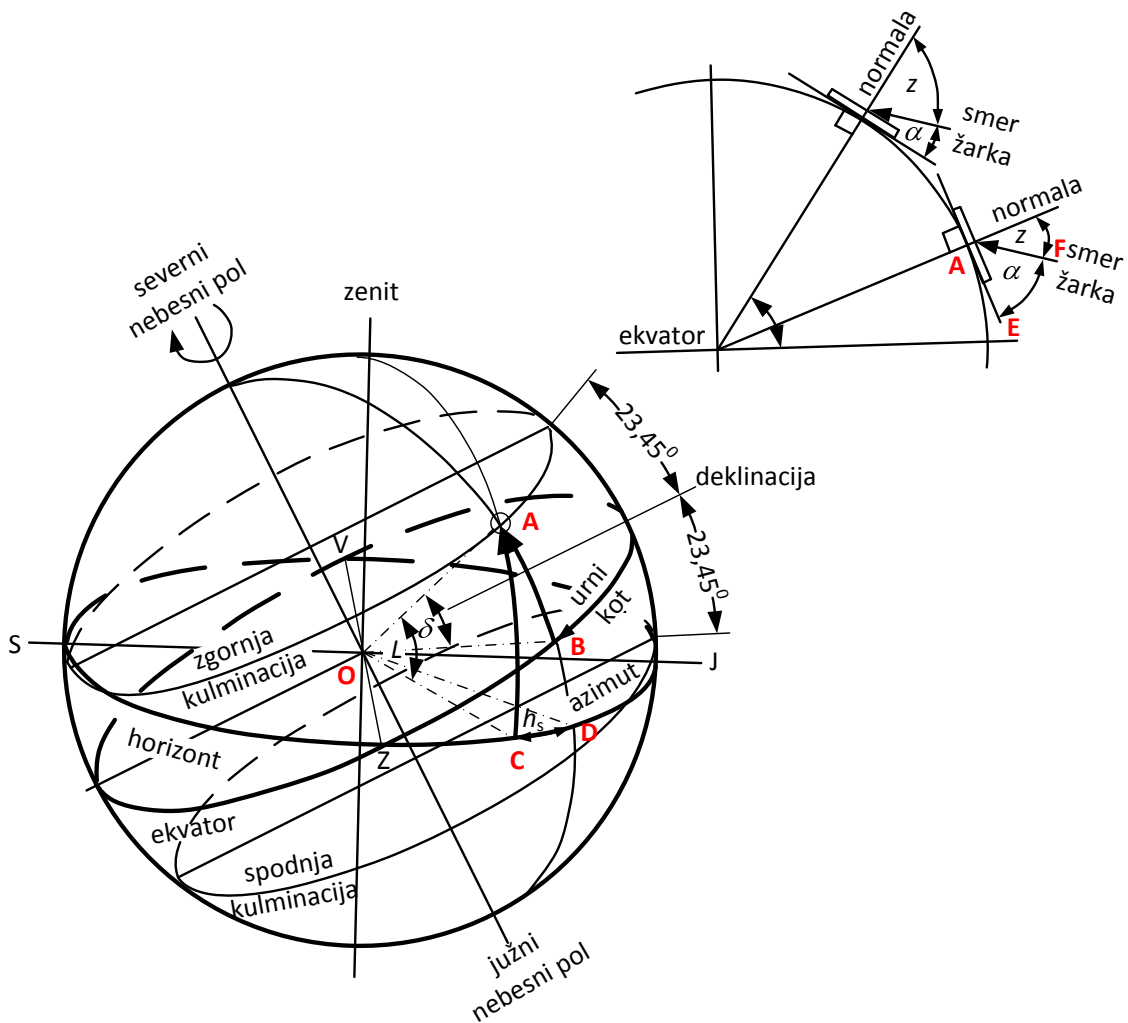
Geografski koordinatni sistem je sferni koordinatni sistem, ki je poravnana z vrtilno osjo Zemlje. Geografski koordinatni sistem določa dva kota, merjena od središča Zemlje in njegovega koordinatnega izhodišča. Prvi kot, imenovan zemljepisna širina L (ali geografska širina), slika 4.7, levo, podaja kot med poljubno točko in ekvatorjem (ravnikom). Drugi kot, imenovan zemljepisna dolžina l (ali geografska dolžina), slika 4.7, desno, podaja kot vzdolž ekvatorja od poljubne točke na Zemlji. V večjem delu sveta so za ničto zemljepisno dolžino sprejeli Greenwich v Angliji. Črte s konstantno zemljepisno širino se imenujejo vzporedniki (paralele). Vzporedniki predstavljajo krožnice na zemeljski površini. Edini vzporednik, ki je veliki krog (glavni krog), je ekvator ($L = 0^\circ$). Črte s konstantno zemljepisno dolžino se imenujejo poldnevnik (meridijani). Poldnevnik, ki poteka skozi Greenwich, je greenwiški poldnevnik (ali glavni, ničelni poldnevnik $l = 0^\circ$). Za razliko od vzporednikov so vsi poldnevnik veliki krogi in niso vzporedni med seboj. Sekajo se v severnem in južnem tečaju.



Slika 4.7: Geografski koordinatni sistem: zemljepisna širina L in zemljepisna dolžina l .

4.2 Sončno sevanje pri tleh na vodoravno površino

S pomočjo zgoraj opisanih osnovnih geometrijskih pojmov, kot so zemljepisna širina L , zemljepisna dolžina l , deklinacija δ in urni kot sonca h_s , ki opisujejo položaj točke na Zemlji glede na položaj Sonca, lahko sedaj definiramo kotno višino sonca α in azimut sonca a_s . Za lažje razumevanje omenjenih kotov so na sliki 4.8 prikazani že prej opisani koti, kot so: deklinacija δ (točki AB), urni kot h_s (točki CD) in zemljepisna širina L (točki AC), povzeti po [119] in [121].



Slika 4.8: Definicije kotov: zemljepisna širina L (AC), deklinacije δ (AB), urni kot sonca h_s (CD) in kotna višina sonca α (EF).

Trenutni položaj Sonca na nebu opišemo z dvema značilnima kotoma: kotno višino sonca α in azimutom sonca a_s . S pomočjo prej omenjenih kotov in osnovnim izrekom iz sferne trigonometrije za kosinusni izrek, [124] (4.12),

$$\cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos A \quad (4.12)$$

zapišemo kotno višino sonca α s (4.14) in je določena s točkami EF na sliki 4.8. Če v (4.12) upoštevamo ustrezne relacije med koti na sliki 4.8, dobimo (4.13).

$$\cos(90 - EF) = \cos(90 - AC) \cos(90 - AB) + \sin(90 - AC) \sin(90 - AB) \cos CD \quad (4.13)$$

Pri tem točki EF označujeta kotno višino sonca α , točki AC zemljepisno širino L , točki AB deklinacijo δ , in točki CD urni kot sonca h_s . Ob preoblikovanju (4.13) dobimo kotno višino sonca α (4.14), ki z drugimi besedami pomeni kot med žarkom direktnega sončnega sevanja in vodoravnico opazovane točke.

$$\cos(90 - \alpha) = \cos(90 - L) \cos(90 - \delta) + \sin(90 - L) \sin(90 - \delta) \cos h_s \quad (4.14)$$

Ob upoštevanju obrazcev za prevedbo trigonometričnih funkcij (4.15) [124] v (4.14) dobimo (4.16):

$$\begin{aligned} \cos(90 \pm A) &= \mp \sin A \\ \sin(90 \pm A) &= \pm \cos A \end{aligned} \quad (4.15)$$

$$\sin \alpha(t) = \sin L \sin \delta + \cos L \cos \delta \cos h_s(t) \quad (4.16)$$

Na enak način pristopimo pri izračunu azimuta sonca a_s , ki je prikazan na sliki 4.9, le da v tem primeru zraven kotov omenjenih na sliki 4.8, uporabimo še osnovni izrek iz sferne trigonometrije za sinusni izrek, (4.17).

$$\frac{\sin a}{\sin A} = \frac{\sin b}{\sin B} \quad (4.17)$$

Če v (4.17) upoštevamo ustrezne relacije med koti na sliki 4.8, dobimo (4.18).

$$\frac{\sin a_s}{\sin(90 - AB)} = \frac{\sin CD}{\sin(90 - EF)} \quad (4.18)$$

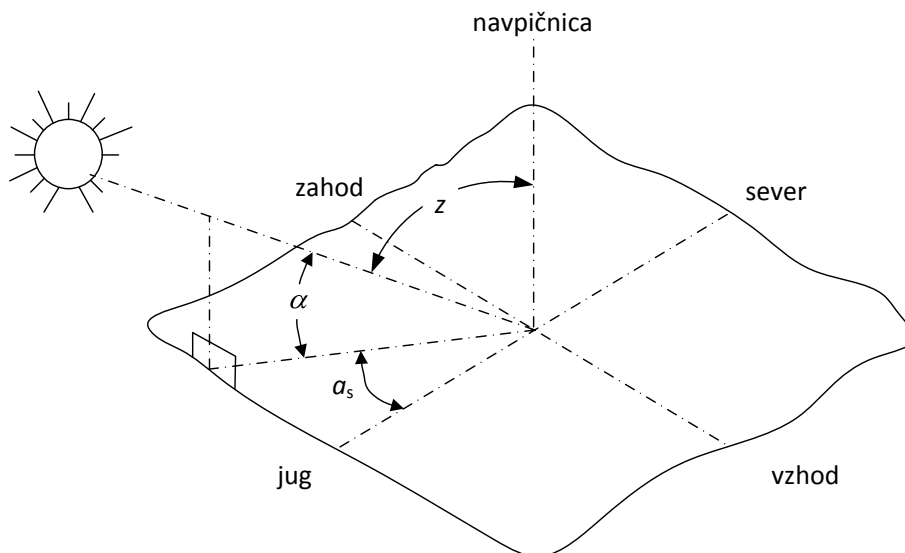
Pri tem točke AB, CD in EF označujejo deklinacijo δ , urni kot sonca h_s in kotno višino sonca α . Z ustreznim preoblikovanjem (4.18) in upoštevanjem (4.15) dobimo azimut sonca a_s , ki predstavlja kot med projekcijo sončnega žarka direktnega sevanja na vodoravno ravnino in navpično ravnino v smeri juga, izražen s (4.19).

$$\sin a_s(t) = \frac{\sin h_s(t) \cos \delta}{\cos \alpha(t)} \quad (4.19)$$

S kotno višino sonca α je povezan tudi zenitni kot z (4.20), ki je kot med sončnim žarkom in normalo na vodoravno ploskev, in je prikazan na slikah 4.8 in 4.9.

$$\cos z(t) = \sin \delta \sin L + \cos \delta \cos L \cos h_s(t) = \sin \alpha(t) \quad (4.20)$$

Kotna višina sonca α , azimut sonca a_s in zenitni kot z so za lažjo predstavo še enkrat prikazani na sliki 4.9.



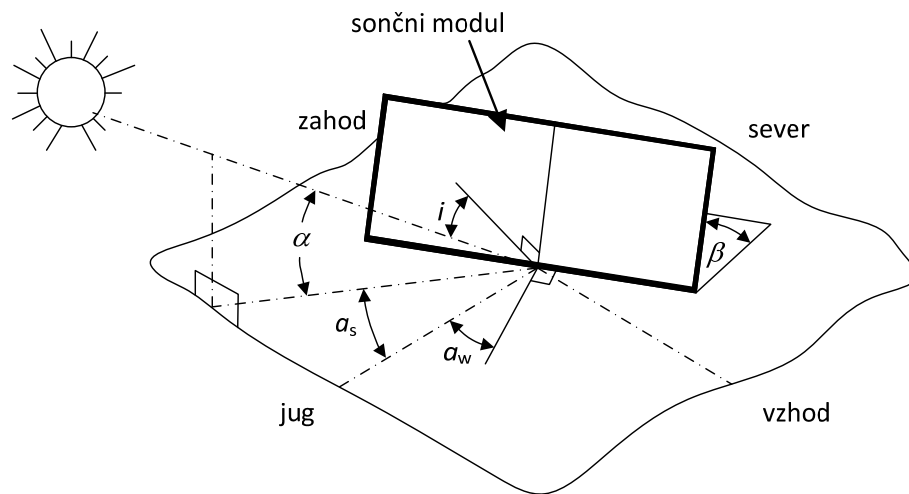
Slika 4.9: Kotna višina sonca α , azimut sonca a_s in zenitni kot z .

4.3 Sončno sevanje pri tleh na poljubno usmerjeno ploskev

Za dejansko izkoriščanje energije sončnega sevanja pa ni dovolj poznati le energijo sončnega sevanja na vodoravno površino, ampak je dobro vedeti, kakšen prirastek lahko pričakujemo, če sončne celice v tem obdobju poljubno usmerimo. Tako si v nadaljevanju pogledimo, kako je s sončnim sevanjem pri tleh na poljubno usmerjeno ploskev.

Solarna konstanta I_0 predstavlja sončno sevanje pravokotno na smer sončnih žarkov – normala ploskve sovpada s smerjo sončnih žarkov. V primeru, da opazovana ploskev ni pravokotna na smer sončnih žarkov, moramo upoštevati še dva kota. Tako je sončno sevanje na poljubno usmerjeno ploskev definirano z naklonskim kotom β in azimutnim kotom a_w ploskve, kot je prikazano na sliki 4.10. Naklonski kot β opazovane ploskve, v našem primeru sončnega modula, je kot med ravnino opazovane ploskve in horizontalno ravnino. Ploskev, postavljena vodoravno, ima naklonski kot β enak 0° , ploskev, postavljena navpično, ima naklonski kot β enak 90° . Azimut opazovane ploskve a_w predstavlja kot med normalo opazovane ploskve, projekcijo na horizontalno ploskev in smerjo proti jugu. Po dogovoru so koti za ploskve, ki so usmerjene proti

vzhodu, negativni in koti za ploskve, ki so obrnjene proti zahodu, pozitivni. Južno usmerjene ploskve imajo azimut a_w enak nič.



Slika 4.10: Ponazoritev naklonskega kota površine β , njenega azimuta a_w in vpadnega kota sončnih žarkov i na poljubno usmerjeno površino.

Tako je vpadni kot sončnih žarkov i kot med sončnimi žarki in normalo opazovane ploskve. Za vodoravno ploskev je vpadni kot i enak zenitnemu kotu z (4.20). Določimo ga s (4.21), ki že upošteva predhodno navedene relacije [120].

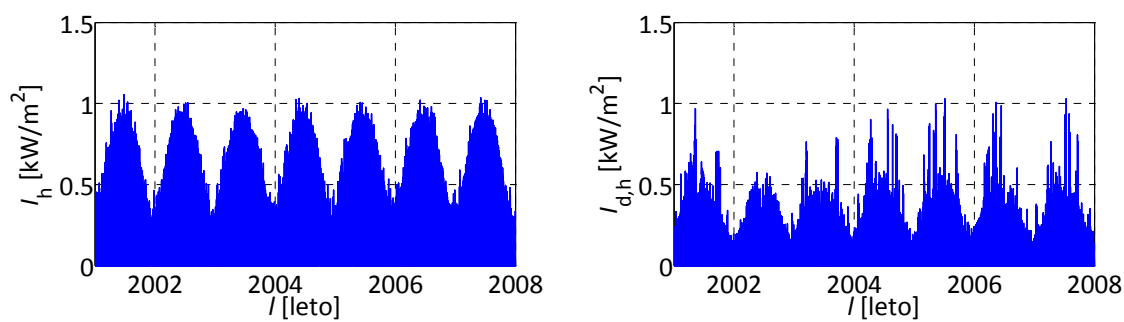
$$\begin{aligned} \cos i(t) = & \sin \delta \sin L \cos \beta - \sin \delta \cos L \sin \beta \cos a_w \\ & + \cos \delta \cos L \cos \beta \cosh_s(t) \\ & + \cos \delta \sin L \sin \beta \cosh_s(t) \cos a_w \\ & + \cos \delta \sin \beta \sinh_s(t) \sin a_w \end{aligned} \quad (4.21)$$

V primeru, ko je azimut ploskve enak nič $a_w = 0$, to je v primeru, ko je ploskev usmerjena proti jugu, se izraz (4.21) poenostavi v (4.22).

$$\cos i(t) = \sin(L - \beta) \sin \delta + \cos(L - \beta) \cos \delta \cosh_s(t) \quad (4.22)$$

4.4 Modeli sončnega sevanja, temelječi na dolgoročnem merjenju sončnega sevanja na vodoravno površino

V razdelkih (4.2 in 4.3) smo pokazali, kako je s sončnim sevanjem pri tleh na vodoravno površino in s sončnim sevanjem pri tleh na poljubno usmerjeno površino, kjer ne upoštevamo vplivov atmosfere. V nadaljevanju pa podajamo opis modelov sončnega sevanja, temelječih na dolgoročnem merjenju sončnega sevanja. Dolgoročni podatki sončnega sevanja so zelo težko dostopni. Za Slovenijo, natančneje za mesto Maribor, smo pridobili od Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO) polurne podatke sončnega sevanja od leta 2001 do konca leta 2007. Podatki sončnega sevanja za obdobje sedmih let so prikazani na sliki 4.11.



Slika 4.11: Polurne vrednosti gostote moči sončnega sevanja za celotno I_h in difuzno $I_{d,h}$ komponento na vodoravno površino v kW/m^2 za obdobje sedmih let.

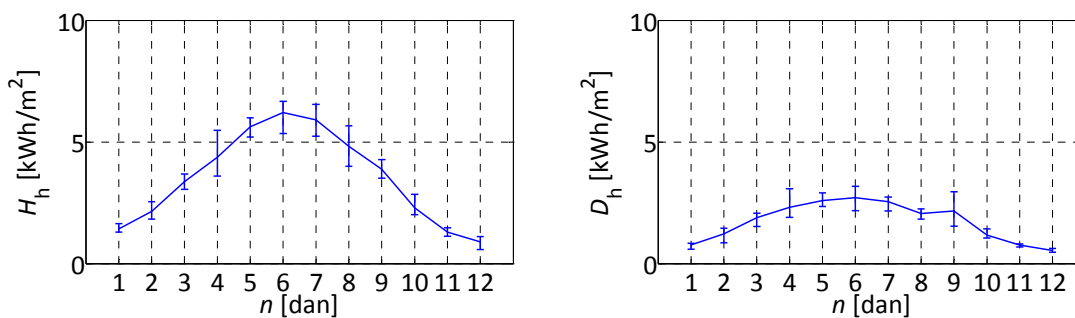
Pri tem sta na sliki 4.11 z I_h in $I_{d,h}$ označeni komponenti celotnega in difuznega sončnega sevanja v polurnih vrednostih v kW/m^2 . Za izračun napovedi sončnega sevanja na poljubno usmerjeno površino potrebujemo ustrezne matematične modele. V splošnem obstajata dve vrsti matematičnih modelov, in sicer statistični in deterministični. Enostavni statistični modeli [3] - [8] temeljijo na dejstvu, več kot je sončnih ur, več sončnega sevanja bo doseglo zemeljsko površino. Tako je trajanje sončnega sevanja statistično povezano s sončnim sevanjem pri tleh. Deterministični modeli [44] in [45] upoštevajo različne vplive, ki nastanejo pri sipanju in absorpciji sončnega sevanja skozi ozračje. Omenjeni vplivi so zapleteni in njihovi podatki žal niso vedno na voljo. Tako je eden izmed ciljev doktorske disertacije zapisati preprost in zanesljiv statistični matematični model za napoved sončnega sevanja na poljubno usmerjeno površino [125], ki je primeren za uporabo pri izračunih optimalnih trajektorij sledilnega sistema.

Različni avtorji podajajo različne statistične matematične modele za izračun napovedi sončnega sevanja, med njimi izpostavimo Liuja in Jordana [4], Collares-Pereira in Rabla [40] ter Erbsa [53]. Glavne in bistvene razlike med posameznimi modeli se kažejo predvsem v intervalu napovedovanja. Veliko je dobrih statističnih modelov [29], [127] - [130], ki natančno opisujejo napoved mesečnega povprečja sončnega sevanja, sledijo jim modeli [48], [130] in [132], ki opisujejo napoved dnevnega povprečja sončnega sevanja. Le nekaj je takih [4], [8], [11], [19], [24]

in [40], ki omogočajo napoved urnega ali minutnega sončnega sevanja. Tako bomo za napoved mesečnega in dnevnega povprečja sončnega sevanja na poljubno usmerjeno površino uporabili že dobro znan in uveljavljen model Liuja in Jordana [4], medtem ko bomo za napoved sončnega sevanja za poljubni interval opazovanja, ki je krajši od ene minute, uporabili nov pristop.

4.4.1 Mesečno povprečje sončnega sevanja na poljubno usmerjeno površino

Liu in Jordan v [4] predstavljata metodo za izračun mesečnega povprečnega sončnega sevanja na poljubno nagnjeno β in orientirano površino a_w . Pri tem seveda potrebujemo dolgoročno bazo podatkov sončnega sevanja na vodoravno površino. Zadeva se nekoliko poenostavi, če imamo na voljo bazo podatkov o mesečnih povprečjih za celotno sončno sevanje na vodoravno površino H_h in bazo podatkov o mesečnih povprečjih za difuzno sončno sevanje na vodoravno površino D_h . Mesečno povprečje direktnega sončnega sevanja na vodoravno B_h površino je razlika celotnega H_h in difuznega D_h sončnega sevanja na vodoravno površino ($B_h = H_h - D_h$). Iz baze podatkov o pol urnih vrednostih celotnega in difuznega sončnega sevanja, pridobljenega od ARSO, glej sliko 4.11, smo za obdobje sedmih let izračunali mesečna povprečja energije sončnega sevanja za celotno H_h in difuzno D_h komponento, kot je to prikazano na sliki 4.12. Pri tem smo uporabili povprečne vrednosti energije sončnega sevanja, medtem ko so na sliki 4.12 prikazana še maksimalna in minimalna odstopanja od povprečja.



Slika 4.12: Mesečna povprečja celotne H_h in difuzne D_h komponente energije sončnega sevanja na vodoravno površino.

Mesečno povprečje sončnega sevanja na poljubno nagnjeno β in orientirano a_w površino H_c je definirano s (4.23),

$$H_c = R_b B_h + R_d D_h + R_r (D_h + B_h) \quad (4.23)$$

kjer so z R_b , R_d in R_r označeni faktorji nagnjenosti površine za komponento direktnega, difuznega in odbitega sončnega sevanja. Omenjeni faktorji so podani s (4.24), (4.25) in (4.26).

$$R_b = \frac{\cos i}{\cos \alpha} \quad (4.24)$$

$$R_d = \cos^2 \frac{\beta}{2} = (1 + \cos \beta) / 2 \quad (4.25)$$

$$R_r = \rho \sin^2 \frac{\beta}{2} = \rho(1 - \cos \beta) / 2 \quad (4.26)$$

Pri tem je i vpadni kot sončnih žarkov na poljubno nagnjeno in orientirano površino (4.21), α vpadni kot sončnih žarkov (4.16) in β naklon površine. ρ predstavlja refleksijski faktor površine, katerega vrednosti so za nekatere površine podane v tabeli 4.1.

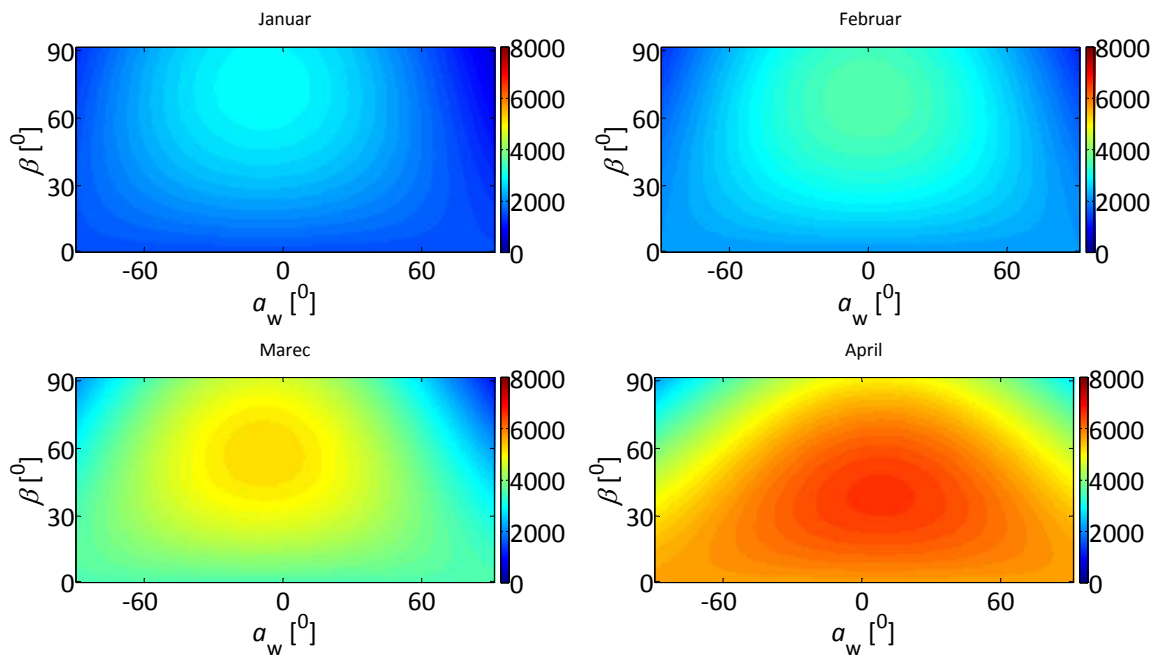
Tabela 4.1: Refleksijski faktor.

Površina	ρ
Sneg	0.75
Stene stavb (svetle)	0.60
Stene stavb (temne)	0.27
Zelena trava	0.26
Izsušena trava	0.20
Skale (kamenje)	0.20
Obdelovalna površina (njiv,...)	0.14
Vodna površina (morje, jezero,...)	0.07

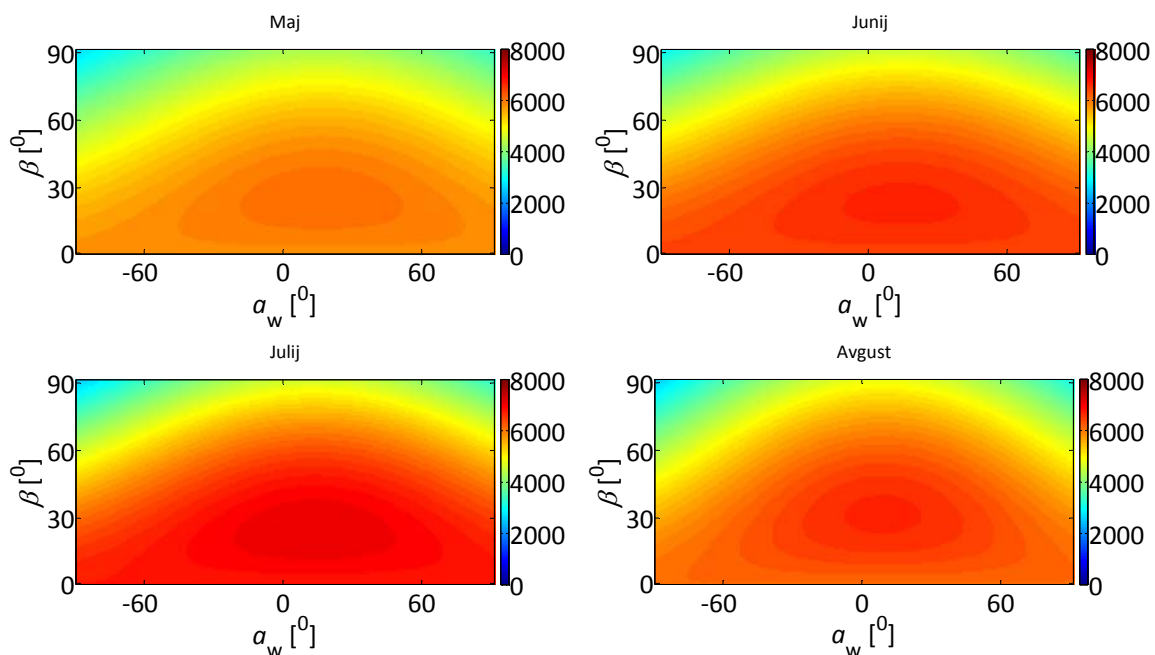
Ob upoštevanju (4.24) do (4.26) v (4.23) dobimo (4.27).

$$H_c = B_h \frac{\cos i}{\sin \alpha} + D_h \cos^2 \frac{\beta}{2} + (D_h + B_h) \rho \sin^2 \frac{\beta}{2} \quad (4.27)$$

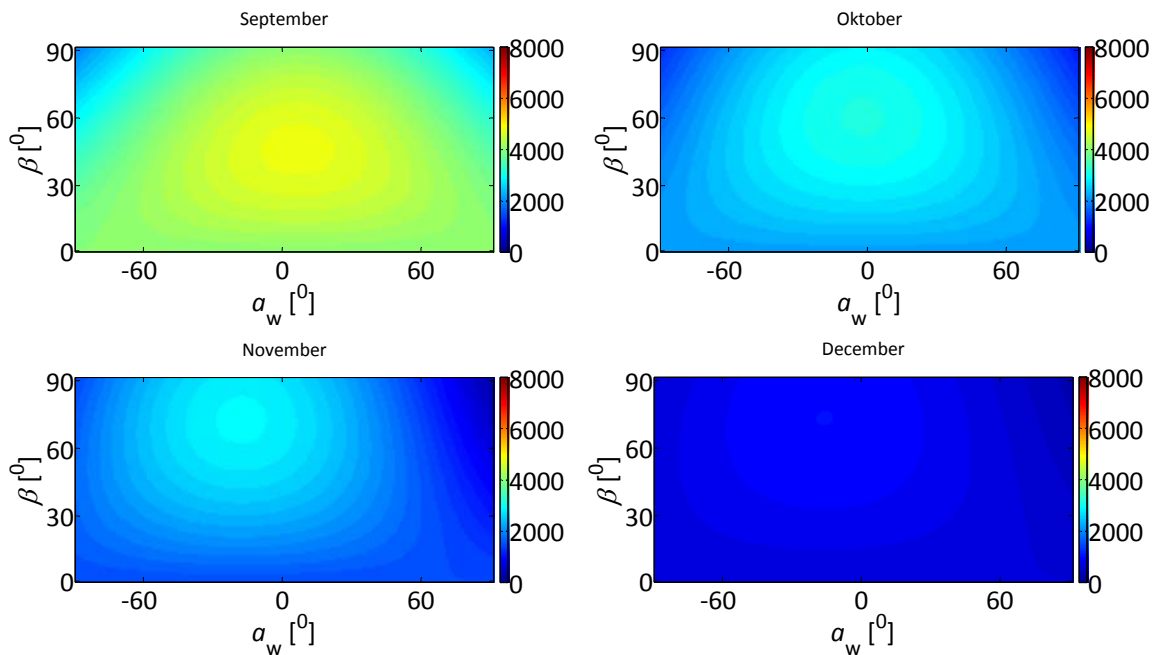
Če sedaj v (4.27) upoštevamo mesečna povprečja energije sončnega sevanja (B_h , D_h) za obdobje sedmih let in pri tem spreminjamo naklon β površine, med 0° in 90° , in orientacijo površine α_w , med -90° in 90° , lahko izračunamo mesečno povprečje sončnega sevanja na poljubno usmerjeno površino H_c . Tako so na slikah 4.13 do 4.15 prikazana mesečna povprečja sončnega sevanja H_c v odvisnosti od naklonskega kota β in orientacije α_w . Rezultati so podani s pomočjo zgoraj opisanega postopka za mesto Maribor.



Slika 4.13: Mesečno povprečje dnevne energije sončnega sevanja H_c [Wh/m^2] za januar, februar, marec in april za mesto Maribor, podano v odvisnosti od naklonskega kota β in orientacije a_w .



Slika 4.14: Mesečno povprečje dnevne energije sončnega sevanja H_c [Wh/m^2] za maj, junij, julij in avgust za mesto Maribor, podano v odvisnosti od naklonskega kota β in orientacije a_w .

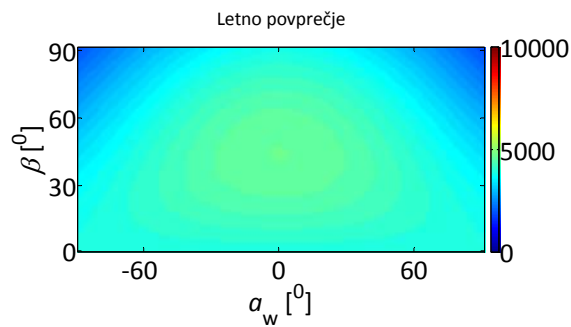


Slika 4.15: Mesečno povprečje dnevne energije sončnega sevanja H_c [Wh/m²] za september, oktober, november in december za mesto Maribor, podano v odvisnosti od naklonskega kota β in orientacije a_w .

Na slikah od 4.13 do 4.15 so na abscisi naneseni azimuti a_w in na ordinati nakloni β . Barva predstavlja mesečno povprečje sončnega sevanja H_c v Wh/m² pri izbrani usmerjenosti površine. Vsi grafi na slikah od 4.13 do 4.15 so prikazani za posamezni mesec v letu. Iz posameznih grafov je razvidno, da usmerjenost proti jugu pomeni tudi večjo vrednost mesečnega povprečja energije sončnega sevanja H_c . Velik razpon najugodnejših azimutov a_w je v poletnih mesecih, saj se takrat sonce dolgo nahaja na severni strani neba. Kljub spremembam azimuta za $\pm 15^\circ$ ali naklona za $\pm 2^\circ$ se največji možni izplen mesečnega povprečja sončnega sevanja bistveno ne spremeni. V zimskih mesecih so najugodnejši azimuti precej blizu skupaj, saj se takrat Sonce nahaja ves čas na južni strani neba. Takrat imajo spremembe naklona večji vpliv, vendar so še vedno pri napaki postavitve 1° izgube manjše od 1 %.

Če posamezna mesečna povprečja dnevnega sončnega sevanja združimo, dobimo letno povprečje dnevnega sončnega sevanja, ki je prikazano na sliki 4.16. Letno povprečje dnevnega sončnega sevanja nam tudi daje povprečni letni naklon za Maribor, ki je enak 32° in azimut, ki je 2° zahodno. Povprečni naklon za Slovenijo se bistveno ne razlikuje od povprečnega naklona za Maribor [3]. Tako kot velja za slike od 4.13 do 4.15, so tudi na sliki 4.16 na abscisi naneseni azimuti a_w in na ordinati nakloni β . Barva predstavlja letno povprečje dnevnega sončnega sevanja H_c v Wh/m² pri izbrani usmerjenosti površine.

Pri tem je potrebno poudariti, da so pri vseh izračunih uporabljene povprečne vrednosti sončnega sevanja za obdobje sedmih let, kar pomeni, da so pri tem zajeti tako sončni kot tudi oblačni dnevi.



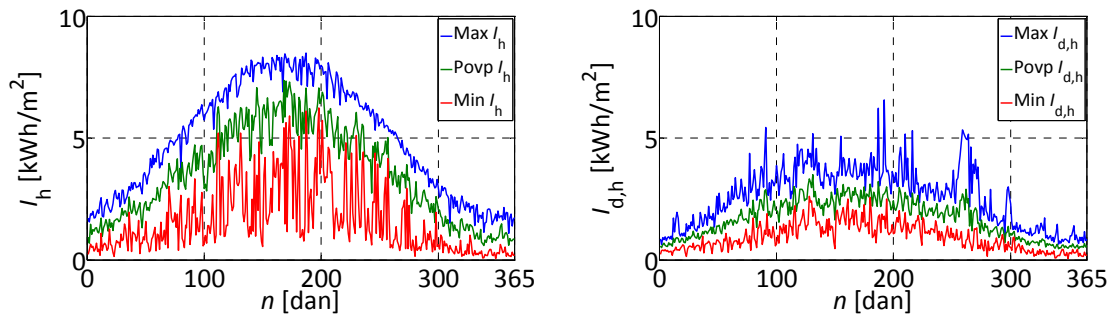
Slika 4.16: Letno povprečje dnevne energije sončnega sevanja H_c [Wh/m²] za mesto Maribor, podano v odvisnosti od naklonskega kota β in orientacije a_w .

4.4.2 Dnevno povprečje sončnega sevanja na poljubno usmerjeno površino

Uporabniki podatkov o energiji sončnega sevanja imajo lahko različne zahteve. Nekatere zanima, kako naj bodo usmerjeni sončni moduli, da bo izplen največji, v zimskih časih, zato jim je poletni izkoristek drugotnega pomena. Uporabnike lahko zanima tudi največji izkoristek za določen dan. Ker so si te zahteve lahko tako različne, v nadaljevanju podajamo še izračun dnevnega povprečja sončnega sevanja na poljubno usmerjeno površino. Na podoben način, kot je to izvedeno za določanje mesečnega povprečja dnevnega sončnega sevanja H_c na poljubno nagnjeno β in orientirano a_w površino, določimo tudi dnevna povprečja sončnega sevanja I_c s (4.28).

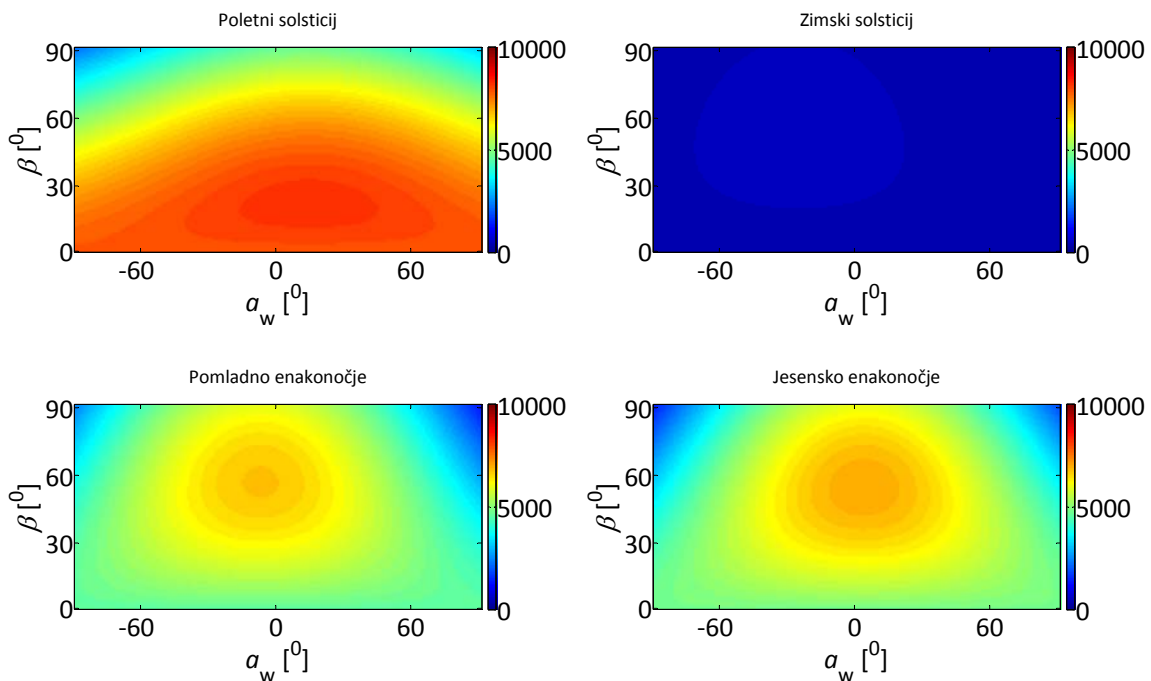
$$I_c = R_b I_{b,h} + R_d I_{d,h} + R_r (I_{b,h} + I_{d,h}) \quad (4.28)$$

Kjer sta $I_{b,h}$ in $I_{d,h}$ dnevno povprečno direktno in difuzno sončno sevanje na vodoravno površino za obdobje sedmih let, določeni iz polurnih vrednosti pridobljenih od ARSO, glej sliko 4.11. Dnevno povprečje celotnega sončnega sevanja na vodoravno površino I_h je vsota direktnega $I_{b,h}$ in difuznega $I_{d,h}$ sončnega sevanja na vodoravno površino ($I_h = I_{b,h} + I_{d,h}$). Pri tem so R_b , R_d in R_r faktorji direktnega, difuznega in odbitega sončnega sevanja, podani s (4.24), (4.25) in (4.26). Tako so na sliki 4.17 prikazana maksimalna (Max), povprečna (Povp) in minimalna (Min) dnevna povprečja celotnega I_h in difuznega $I_{d,h}$ sončnega sevanja za obdobje sedmih let. Za izračun dnevnega povprečja sončnega sevanja na poljubno usmerjeno površino smo uporabili povprečne vrednosti dnevnega sončnega sevanja (Povp I_h in Povp $I_{d,h}$).

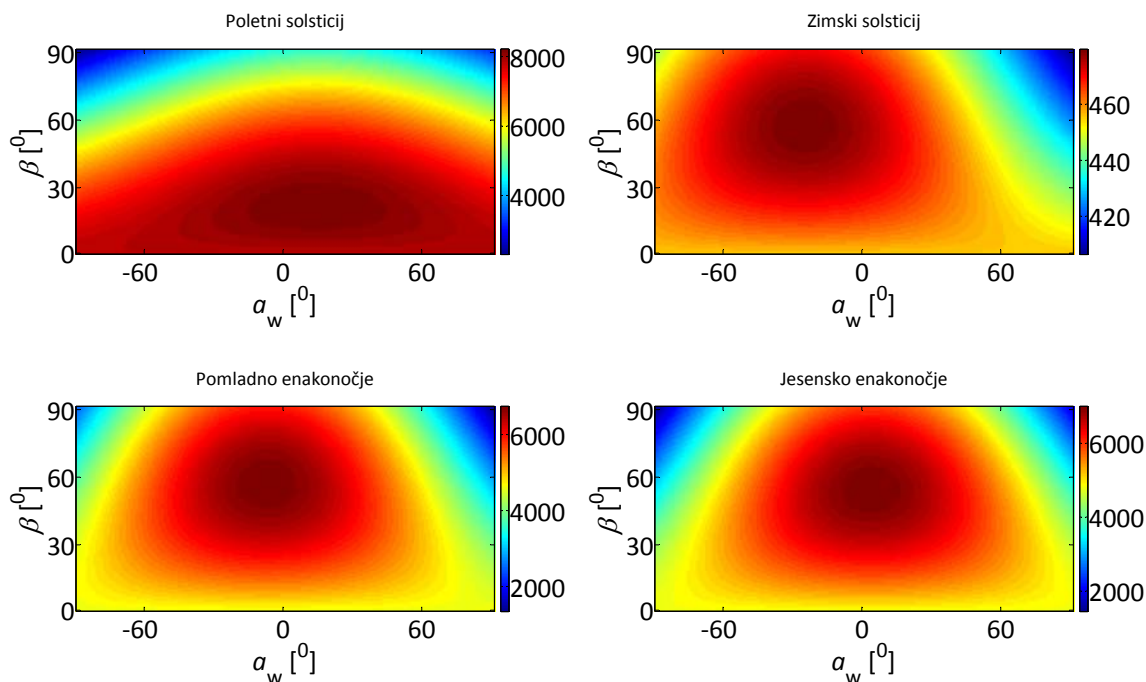


Slika 4.17: Dnevna povprečja celotne I_h in difuzne $I_{d,h}$ komponente energije sončnega sevanja na vodoravno površino.

Če sedaj v (4.28) upoštevamo dnevna povprečja energije sončnega sevanja ($I_{b,h}$, $I_{d,h}$) za obdobje sedmih let in pri tem spreminjamo naklon površine β med 0° in 90° in orientacijo površine a_w med -90° in 90° , lahko izračunamo dnevno povprečje sončnega sevanja na poljubno usmerjeno površino I_c . Tako je na sliki 4.18 prikazano dnevno povprečje sončnega sevanja I_c v odvisnosti od naklonskega kota β in orientacije a_w za štiri tipične dni v letu. To so poletni in zimski solsticij ter pomladno in jesensko enakonočje. Pri tem so rezultati podani s pomočjo zgoraj opisanega postopka za mesto Maribor. Sliki 4.18 in 4.19 sta enaki, le da je na sliki 4.18 merilo o energiji sončnega sevanja skupno vsem štirim primerom, medtem ko je na sliki 4.19 merilo prilagojeno posameznemu primeru.



Slika 4.18: Dnevna povprečja energije sončnega sevanja I_c [Wh/m^2] za poletni in zimski solsticij ter za pomladno in jesensko enakonočje za mesto Maribor podana, v odvisnosti od naklonskega kota β in orientacije a_w .



Slika 4.19: Dnevna povprečja energije sončnega sevanja I_c [Wh/m^2] za poletni in zimski solsticij ter za pomladno in jesensko enakonočje za mesto Maribor, podana v odvisnosti od naklonskega kota β in orientacije a_w .

Na sliki 4.18 so na abscisi naneseeni azimuti a_w in na ordinati nakloni β . Barva predstavlja dnevno povprečje sončnega sevanja I_c v Wh/m^2 pri izbrani usmerjenosti površine. Grafi na sliki 4.18 so prikazani za poletni in zimski solsticij ter pomladno in jesensko enakonočje. Tako kot velja za mesečna povprečja dnevnega sončnega sevanja, velja tudi za posamezna dnevna povprečja sončnega sevanja, da usmerjenost proti jugu pomeni tudi večjo vrednost energije sončnega sevanja I_c . Iz grafov vidimo, da sta najugodnejši naklon β in azimut a_w za pomladno in jesensko enakonočje precej blizu skupaj. Največji razpon najugodnejših azimutov a_w je v poletnem solsticiju, medtem ko so v zimskem solsticiju najugodnejši azimuti a_w precej blizu skupaj.

Zgornji opis za sliko 4.18 velja tudi za sliko 4.19.

4.4.3 Sončno sevanje v obliki časovno odvisne funkcije na poljubno usmerjeno površino

Podatki na letni oziroma mesečni ravni so zanimivi, vendar večinoma ne zagotavljajo informacije, ki jo pričakuje končni uporabnik, katerega mnogokrat zanima najugodnejša usmeritev za krajše časovno obdobje. Zato v nadaljevanju podajamo model za napoved sončnega sevanja v obliki časovno odvisne funkcije na poljubno usmerjeno ploskev. Na podoben način, kot smo to naredili pri izračunu mesečnega in dnevnega povprečja sončnega sevanja na poljubno usmerjeno površino, lahko sončno sevanje opišemo v obliki časovno odvisne funkcije znotraj dneva. Metoda

za izračun sončnega sevanja v obliki časovno odvisne funkcije je novi pristop, predlagan v doktorski disertaciji. Metoda nam omogoča, da čas diskretizacije znotraj dneva poljubno spreminjamo med sekundami in urami. Pri tem poudarimo, da metoda upošteva vplive ozračja preko dolžine sončnih žarkov v atmosferi do opazovane površine. Tako bomo v nadaljevanju pokazali, kako lahko faktor prepustnosti ozračja zapišemo kot funkcijo dolžine poti sončnih žarkov. Celotno trenutno sončno sevanje na vodoravno površino $I_h(t)$ (4.29) lahko izrazimo kot vsoto direktnega sončnega sevanja na vodoravno površino $I_{b,h}(t)$ in difuznega sončnega sevanja na vodoravno površino $I_{d,h}(t)$ [120]:

$$I_h(t) = I_{b,h}(t) + I_{d,h}(t) \quad (4.29)$$

Sončno sevanje je odvisno od dneva in ure v letu, zemljepisne širine in dolžine ter vremenskih razmer. Skozi ozračje moč sončnega sevanja slabi zaradi razpršitve in absorpcije. Slabljenje sončnega sevanja se razlikuje glede na različne valovne dolžine. Na poti do zemeljske površine se tako v povprečju izgubi do 50 % energije sončnega sevanja, kar z drugimi besedami imenujemo tudi faktor prepustnosti ozračja K . Faktor prepustnosti ozračja definiramo tako za celotno komponento energije sončnega sevanja K_t (4.30) kot tudi za difuzno komponento energije sončnega sevanja K_d (4.31).

$$K_t = \frac{I_h}{I} \quad (4.30)$$

$$K_d = \frac{I_{d,h}}{I} \quad (4.31)$$

Pri tem sta z I_h in $I_{d,h}$ označeni celotna in difuzna komponenta energije sončnega sevanja, z I pa energija sončnega sevanja na zunanjem robu zemljane atmosfere. Moč sončnega sevanja skozi ozračje je posredno odvisna od dneva v letu, zemljepisne širine in dolžine, vremenskih razmer kot tudi neposredno od dolžine sončnih žarkov skozi atmosfero. Daljša, kot je pot sončnih žarkov skozi atmosfero, večje so absorpcijske izgube in obratno. Za jasne dni, brez oblakov, lahko zapišemo, da je sončno sevanje odvisno od dolžine poti sončnih žarkov skozi atmosfero. Z drugimi besedami lahko rečemo, da sta direktno in difuzno sončno sevanje funkciji dolžine poti sončnih žarkov l . Tako lahko celotni faktor prepustnosti ozračja $K_t(l)$ (4.32) in difuzni faktor prepustnosti ozračja $K_d(l)$ (4.33) zapišemo kot funkciji dolžine poti sončnih žarkov skozi atmosferi l .

$$K_t(l) = \frac{I_h(l)}{I(l)} \quad (4.32)$$

$$K_d(l) = \frac{I_{d,h}(l)}{I(l)} \quad (4.33)$$

Če pri tem upoštevamo izmerjene vrednosti celotnega $I_{h\text{-mer}}$ in difuznega $I_{d,h\text{-mer}}$ sončnega sevanja za jasne dni, za obdobje med leti 2001 in 2006, lahko zapišemo faktorja prepustnosti ozračja $K_{t\text{-mer}}(l)$ (4.34) in $K_{d\text{-mer}}(l)$ (4.35) kot dolžino sončnih žarkov, pri čemer upoštevamo vpliv atmosfere.

$$K_{t\text{-mer}}(I) = \frac{I_{h\text{-mer}}(I)}{I(I)} \quad (4.34)$$

$$K_{d\text{-mer}}(I) = \frac{I_{d\text{-mer}}(I)}{I(I)} \quad (4.35)$$

Pri tem sta $I_{h\text{-mer}}$ in $I_{d\text{-mer}}$ celotno in difuzno sončno sevanje za jasne dni, podani s polurnim časom diskretizacije Δt . Kjer je I gostota moči sončnega sevanja na zunanjem robu zemljine atmosfere s polurnim časom diskretizacije Δt in začetnim časom t_0 podana s (4.36). I je definiran s solarno konstanto $I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$, vpadnim kotom α (4.16) in orbitalnim faktorjem ekscentričnosti $e(t)$ (4.37).

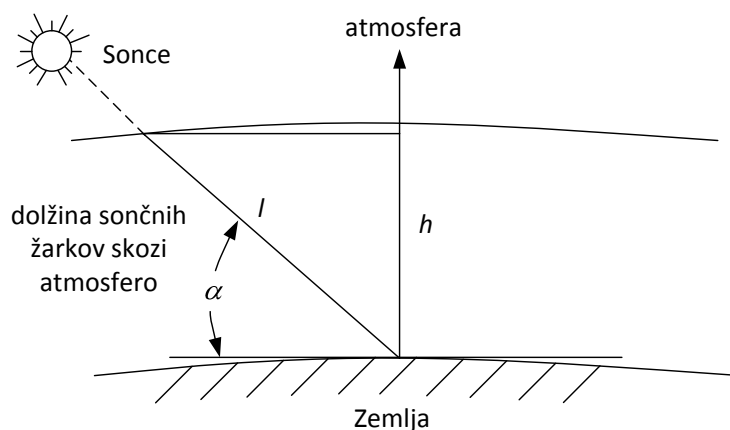
$$I = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} I_0 e(t) \sin \alpha(t) dt \quad (4.36)$$

$$e(t) = 1 + 0,034 \cos\left(\frac{2\pi n(t)}{365}\right) \quad (4.37)$$

n označuje dan v letu, z začetkom štetja od 1. januarja, l je dolžina poti sončnih žarkov skozi atmosfero (4.38), definirana s pomočjo trigonometričnih funkcij ob predpostavki, da obravnavamo zemeljsko površino in atmosfero kot ravni ploskvi.

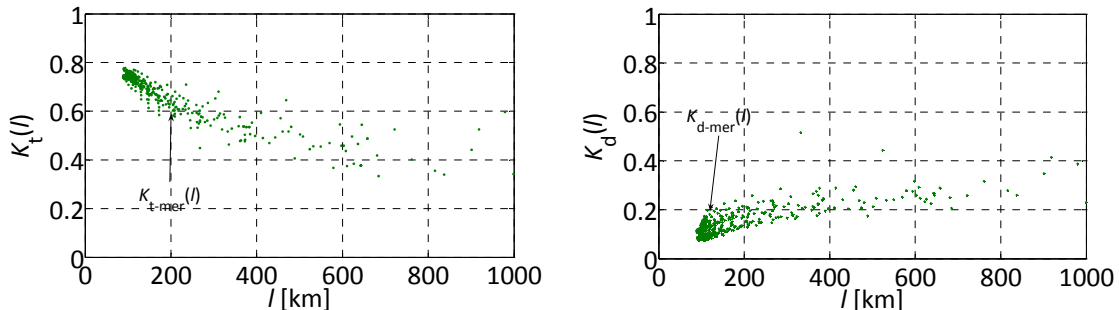
$$l = \frac{h}{\sin \alpha(t)} \quad (4.38)$$

Pri omenjeni predpostavki ne naredimo velike napake, saj je $h \ll r_z$. Kjer je s h , ki meri okvirno od 50 km do 80 km, označena razdalja med površjem Zemlje in zgornjo mejo ozračja (stratosfere), z r_z pa Zemljin polmer $r_z = 6371 \text{ km}$, kot je to prikazano na sliki 4.20.



Slika 4.20: Dolžina poti sončnih žarkov skozi atmosfero.

Pri tem je na sliki 4.21 prikazan izmerjen celotni $K_{t\text{-mer}}(l)$ in difuzni $K_{d\text{-mer}}(l)$ faktor prepustnosti ozračja za jasne dni. Celotni $K_{t\text{-mer}}(l)$ in difuzni $K_{d\text{-mer}}(l)$ faktor prepustnosti ozračja sta prikazana v odvisnosti od dolžine poti sončnih žarkov skozi atmosfero l za obdobje šestih let.



Slika 4.21: Izmerjen celotni $K_{t\text{-mer}}$ in difuzni $K_{d\text{-mer}}$ faktor prepustnosti ozračja za jasne dni v odvisnosti od dolžine poti sončnih žarkov skozi atmosfero za obdobje šestih let.

Kot vidimo iz slike 4.21 je odvisnost celotnega $K_{t\text{-mer}}(l)$ in difuznega $K_{d\text{-mer}}(l)$ faktorja prepustnosti ozračja za jasne dni eksponencialna, zato lahko faktorja $K_{t\text{-mer}}(l)$ in $K_{d\text{-mer}}(l)$ aproksimiramo z eksponencialnima funkcijama. S pomočjo aproksimacije določimo eksponencialni funkciji za celotni $K_{t\text{-izr}}(l)$ in difuzni $K_{d\text{-izr}}(l)$ faktor prepustnosti ozračja kot funkcijo dolžine poti sončnih žarkov skozi atmosfero l s (4.39) in (4.40).

$$K_{t\text{-izr}}(l) = (A_1 e^{(B_1 l)} + A_2 e^{(B_2 l)} + A_0) \quad (4.39)$$

$$K_{d\text{-izr}}(l) = (C_1 e^{(D_1 l)} + C_2 e^{(D_2 l)} + C_0) \quad (4.40)$$

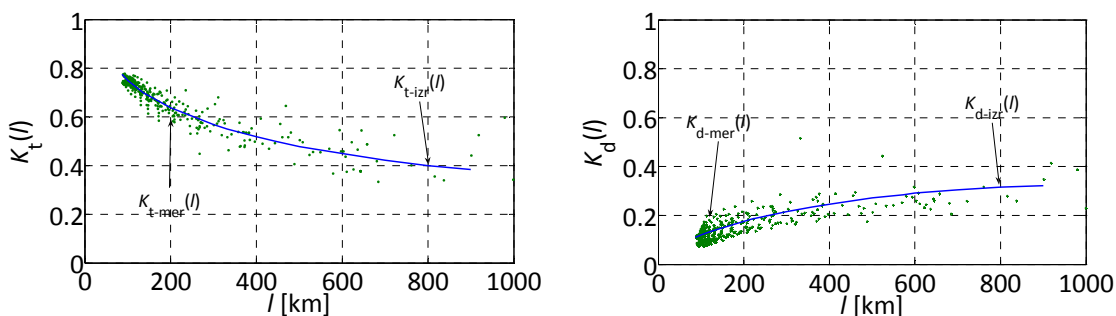
Parametri aproksimacijskih funkcij A_1 , A_2 , B_1 , B_2 , C_1 , C_2 , in D_1 , D_2 so določeni tako, da je srednji kvadratični pogrešek med $K_{t\text{-mer}}(l) - K_{t\text{-izr}}(l)$ in $K_{d\text{-mer}}(l) - K_{d\text{-izr}}(l)$ minimalen za obdobje šestih let, za jasne dni. Vrednosti parametrov aproksimacijskih funkcij so podane v tabeli 4.2.

Tabela 4.2: Parametri aproksimacijskih funkcij $K_{t\text{-izr}}(l)$ in $K_{d\text{-izr}}(l)$.

	A_0	A_1	A_2	B_1	B_2
Enačba (4.39)	0,3152	0,4826	0,2467	$-2,2 \cdot 10^{-3}$	$-16,6 \cdot 10^{-3}$

	C_0	C_1	C_2	D_1	D_2
Enačba (4.40)	0,3168	-0,2959	-0,0479	$-2,6 \cdot 10^{-3}$	$-26,8 \cdot 10^{-3}$

Na sliki 4.22 je prikazana primerjava med izmerjenimi ($K_{t\text{-mer}}(l)$ in $K_{d\text{-mer}}(l)$) in izračunanimi ($K_{t\text{-izr}}(l)$ in $K_{d\text{-izr}}(l)$) faktorji prepustnosti ozračja v odvisnosti od dolžine poti sončnih žarkov skozi atmosfero za jasne dni.



Slika 4.22: Primerjava med izmerjenim (mer) in izračunanim (izr) celotnim K_t in difuznim K_d faktorjem prepustnosti ozračja za jasne dni v odvisnosti od dolžine poti sončnih žarkov skozi atmosfero za obdobje šestih let.

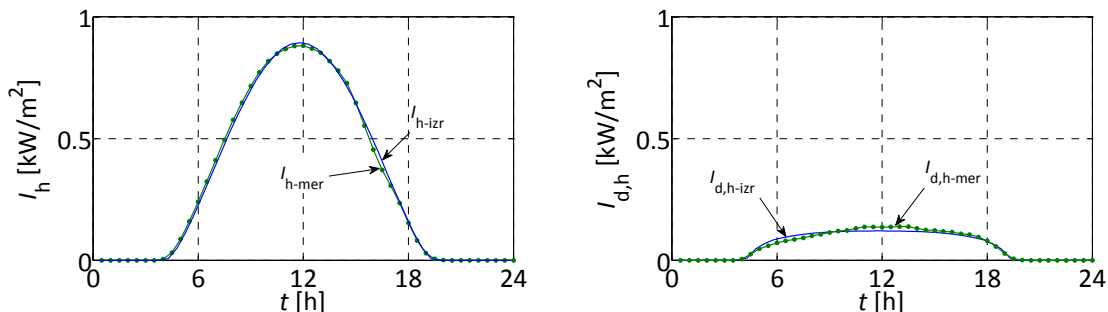
Kot vidimo iz slike 4.22, celotni faktor prepustnosti ozračja $K_t(I)$ za jasne dni z dolžino sončnih žarkov skozi atmosfero pada, medtem ko za difuzni faktor $K_d(I)$ velja ravno nasprotno. To pomeni, da daljša, kot je pot sončnih žarkov skozi atmosfero, več je difuzne svetlobe in obratno. Pot sončnih žarkov pa je daljša v jutranjih in večernih urah, medtem ko je najkrajša ob poldnevu.

Ob znanih funkcijah za celotni $K_{t-izr}(I)$ in difuzni $K_{d-izr}(I)$ faktor prepustnosti ozračja in I (4.36) za katerikoli časovni interval, definiran s t_0 in Δt , lahko sedaj izračunamo celotno I_h in difuzno $I_{d,h}$ komponento sončnega sevanja na vodoravno površino s (4.41) in (4.42).

$$I_h(I) = K_{t-izr}(I)I(I) \tag{4.41}$$

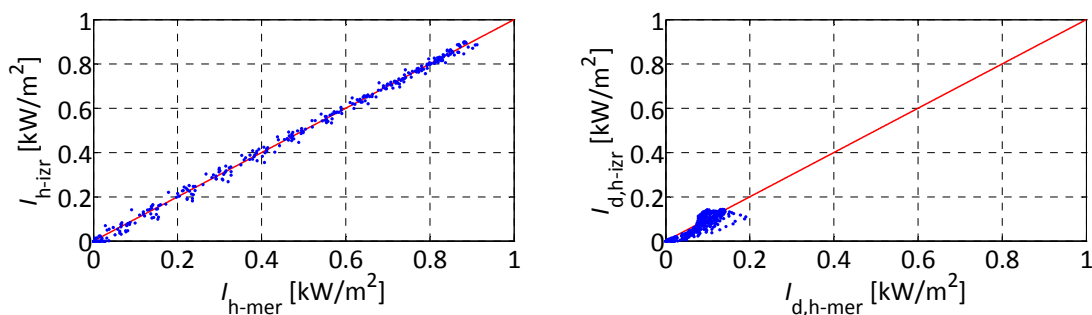
$$I_{d,h}(I) = K_{d-izr}(I)I(I) \tag{4.42}$$

Direktno sončno sevanje je razlika celotnega in difuznega sončnega sevanja $I_{b,h} = I_h - I_{d,h}$. Za ovrednotenje predlagane metode kaže slika 4.23 primerjavo med izmerjenim in z modelom napovedanim sončnim sevanjem na vodoravno površino za naključno izbran jasen dan. Omenjeni dan ni bil del izračuna celotnega in difuznega faktorja prepustnosti ozračja $K_{t-izr}(I)$ in $K_{d-izr}(I)$. Primerjava je narejena za celotno $I_h(t)$ in difuzno $I_{d,h}(t)$ komponento sončnega sevanja.



Slika 4.23: Primerjava med izmerjenim (mer) in z modelom napovedanim (izr) celotnim I_h in difuznim $I_{d,h}$ sončnim sevanjem na vodoravno površino za naključno izbran jasen dan.

Iz slike 4.23 vidimo dobro ujemanje med izmerjenim in izračunanim sončnim sevanjem, tako za celotno I_h kot tudi za difuzno $I_{d,h}$ komponento. Za lažje ovrednotenje med izmerjenim in izračunanim sončnim sevanjem še za preostale jasne dni na sliki 4.24 kažemo odstopanja po točkah. Tako so na sliki 4.24 predstavljeni rezultati za jasne dni v letu 2007, in sicer za 103., 105., 107., 111., 118., 198., 199., 202., 207., 227., 228. in 257. dan. Tako kot v prejšnjem primeru, na sliki 4.20, tudi v tem primeru omenjeni dnevi niso bili del izračuna celotnega in difuznega faktorja prepustnosti ozračja $K_{t-izr}(I)$ (4.39) in $K_{d-izr}(I)$ (4.40). Boljše ujemanje točk na sliki 4.24 z ravno črto pomeni tudi boljše ujemanje med izmerjenimi in izračunanimi vrednostmi sončnega sevanja. Rezultati na sliki 4.24 predstavljajo ovrednotenje predlagane metode za napoved celotnega I_h in difuznega $I_{d,h}$ sončnega sevanja na vodoravno površino za jasne dni. Napoved celotnega in difuznega sončnega sevanja na vodoravno površino predstavlja začetni podatek za vse druge izračune, povezanih z optimalnim sledenjem fotonapetostnega sistema soncu. Njihova točnost neposredno vpliva na točnost vseh ostalih izračunov.



Slika 4.24: Primerjava med izmerjenim (mer) in z modelom napovedanim (izr) celotnim I_h in difuznim $I_{d,h}$ sončnim sevanjem na vodoravno površino za 12 jasnih dni.

Kot vidimo iz slik 4.23 in 4.24, je ujemanje med izmerjenim in z modelom napovedanim sončnim sevanjem dobro. Glede na dobro ujemanje lahko sedaj omenjeni model uporabimo za izračun sončnega sevanja I_c na poljubno nagnjeno β in orientirano α_w površino kot časovno odvisno funkcijo s (4.43).

$$I_c = R_b I_{b,h} + R_d I_{d,h} + R_r (I_{b,h} + I_{d,h}) \quad (4.43)$$

Kjer sta $I_{b,h}$ in $I_{d,h}$ direktno in difuzno sončno sevanje na vodoravno površino, ocenjena z opisanimi modeloma (4.41) in (4.42), ki upoštevata dolžino poti sončnih žarkov skozi atmosfero. R_b , R_d in R_r so faktorji direktnega, difuznega in odbitega sevanja, podani s (4.24), (4.25) in (4.26).

Na osnovi analize rezultatov večletnih meritev smo predstavili faktorja prepustnosti ozračja kot funkciji dolžine poti sončnih žarkov skozi atmosfero in ju aproksimirali z eksponentnimi funkcijami. Koeficiente aproksimacijskih funkcij smo določili na tak način, da je srednje kvadratično odstopanje med izmerjenima in izračunanima gostotama moči direktnega in difuznega sevanja, minimalno. Pri tem smo upoštevali izključno vrednosti meritve za jasne dni brez oblakov. Na zgoraj opisani način vpeljana faktorja propustnosti ozračja ob znanem časovnem poteku gostote sončnega sevanja izven atmosfere omogočata določitev časovno odvisne gostote sončnega

sevanja na poljubno usmerjeno površino v poljubni točki na površini Zemlje. Tako se predlagana metoda za napoved sončnega sevanja v obliki časovno odvisne funkcije razlikuje od že znanih metod v tem, da upošteva vpliv ozračja preko dolžine sončnih žarkov v atmosferi. S tem pa lahko zelo dobro opišemo razmere v ozračju za jasne dni brez oblakov v poljubnem času diskretizacije.

4.5 Meritve sončnega sevanja

V poglavju 4.4 smo opisali modele za napoved sončnega sevanja, temelječega na dolgoročnem merjenju sončnega sevanja na vodoravno površino. Kot smo omenili, smo podatke o sončnem sevanju dobili od ARSO, ki meritve sončnega sevanja izvajajo z inštrumenti, opisanimi v nadaljevanju. V širšem smislu poznamo merilnike sončnega sevanja že vrsto stoletij. Stoletja nazaj so merilnike uporabljali za merjenje časa in določanje položaja ladij na oceanih. V današnjem času govorimo o merilnikih sončnega sevanja, s pomočjo katerih merimo gostoto moči sončnega sevanja, tako celotnega kot difuznega sončnega sevanja [122].

4.5.1 Inštrument za merjenje sončnega sevanja

Celotno sončno sevanje pri tleh na vodoravno površino merimo s piranometrom, ki je prikazan na sliki 4.25 a. Piranometer je najbolj razširjen inštrument za merjenje sončnega sevanja, s pomočjo katerega zajamemo tako energijo direktnega kot energijo difuznega sončnega sevanja. Glavni element vsakega piranometra je absorpcijska ploščica, ki je obdana s stekleno polkroglo. Slednja ščiti senzorsko ploščico pred vplivi vetra in padavin. Jakost sončnega sevanja se meri posredno, s pomočjo izmerjene temperature senzorske ploščice. S piranometrom lahko zajemamo sončno sevanje z valovno dolžino od 0,3 do 3 μm . S preprostim preoblikovanjem s prekritjem direktnega sončnega sevanja lahko s piranometrom merimo le difuzno sončno sevanje, kot je prikazano na sliki 4.25 b.

V skupino inštrumentov za merjenje sončnega sevanja spada tudi pirheliometer, prikazan na sliki 4.25 c, ki meri samo direktno sončno sevanje. Z njim merimo sončno sevanje, ki prihaja iz površine Sonca v ozkem pasu obsončne cone, s prostorskim kotom 5° . Osnova pirheliometra je dolgo valjasto ohišje in absorpcijska ploščica, ki je nameščena na dnu valja. Postopek merjenja sončnega sevanja je enak kot pri piranometru.



Slika 4.25: Inštrumenti za merjenje sončnega sevanja; a) piranometer, b) piranometer s senčilnim obročem, c) pirheliometer in d) Campbell-Stokecov heliograf.

4.5.2 Inštrument za merjenje števila ur sončnega sevanja

Najenostavnejši posredni merilnik sončnega sevanja je Campbell-Stokesova krogla, prikazan na sliki 4.25 d. To je inštrument, ki s stekleno kroglo zgosti direktno sončno sevanje na merilni listič, in ga sončno sevanje izžge. Zato ga imenujemo tudi heliograf. Dolžina izžgane linije na vsak dan zamenjanem lističu ponazarja vsakodnevno trajanje sončnega sevanja. S pomočjo Campbell-Stokesovim heliografom tako merimo trajanje sončnega sevanja, z drugimi besedami, število ur v dnevu, ko je prisotno direktno sončno sevanje. Število ur sončnega sevanja ni neposredno odvisno od energije sončnega sevanja. S Campbell-Stokesovim heliografom merimo število ur (minut), če neposredno sevanje preseže 120 W/m^2 .

4.6 Zaključek poglavja

V poglavju štiri smo najprej podali osnovne geometrijske relacije med Soncem in Zemljo. Opisali smo sončno sevanje pri tleh na vodoravno in poljubno usmerjeno površino, kjer vpliva atmosfere ne upoštevamo. Sledili so modeli sončnega sevanja na poljubno usmerjeno površino, kjer s

pomočjo dolgoročnih meritev sončnega sevanja še upoštevamo vpliv atmosfere. Sprva so bili podani že znani modeli za napoved mesečnega in dnevnega povprečja sončnega sevanja, sledil je nov model za napoved sončnega sevanja v obliki časovno odvisne funkcije.

Električne izgube sledilnega sistema (poglavje 3) in napoved sončnega sevanja v obliki časovno odvisne funkcije (poglavje 4) sta vhodna podatka za določitev trajektorij sledilnega sistema. Trajektorije sledilnega sistema so določene z optimizacijo in podrobneje opisane v naslednjem poglavju.

5 Določitev trajektorij sledilnega sistema

Metode za določitev trajektorije sledilnega sistema, ki se že uporabljajo in so dela drugih avtorjev, so zanimive in uporabne, vendar nobeno izmed del ne vključuje sistematičnega pristopa z uporabo optimizacije in kriterijske funkcije, ki bi temeljila na maksimalnem izplenu sončne elektrarne pri pretvorbi sončne energije v električno in bi pri tem upoštevala še električne izgube pogonskega sklopa. Tako v nalogi predlagamo nov pristop, kako s pomočjo optimizacijskega postopka določiti trajektorijo sledilnega sistema, da bo izplen proizvedene električne energije sončne elektrarne maksimalen, upoštevajoč še električne izgube, ki nastanejo zaradi premikanja sledilnega sistema.

V nadaljevanju podajamo kratek pregled že znanih metod drugih avtorjev. Avtorji v [67] predstavljajo svojo rešitev za sledilni sistem, pri čemer rezultati meritev kažejo od 22 % do 29 % povečanje dnevne proizvodnje električne energije ob nadgradnji fiksnega sistema s sistemom za sledenje. Podobne rezultate meritev kažejo tudi avtorji v [75], ki se ukvarjajo z optimalnim naklonom in azimutom za fiksne sisteme. Vendar v omenjenih primerih avtorji ne podajajo opisov sistema vodenja sledilnega sistema.

Nov hibridni sistem vodenja za dvoosni sledilni sistem je predstavljen v [86]. Hibridni sistem vodenja sestoji iz odprtozančnega sistema vodenja, ki temelji na napovedi sončnega sevanja in zaprtozančnega sistema vodenja, ki primerja izračunano in napovedano energijo sončnega sevanja. S tem zagotavljamo potrebno točnost sledilnega sistema, hkrati pa pri tem ostanejo električne izgube pogonskega sklopa na sprejemljivi ravni.

Nizkoporačunski enoosni tripozicijski sledilni sistem s koncentradorji je obravnavan v [69]. Sistem je narejen za samo en modul in spreminja položaj le trikrat dnevno.

Optimalno sledenje azimutnega sledilnega sistema trajektoriji sonca predstavljajo avtorji v [87] - [90]. Cilj avtorjev je maksimalno povečanje proizvodnje električne energije sončne elektrarne z azimutnim sledilnim sistemom ob minimalnem številu korakov. Izračuni so narejeni za določen dan s primerjavo karakteristik, dobljenih pri različnem številu premikov. Rezultati bi naj dali odgovor, kdaj in za koliko stopinj bi bilo potrebno spremeniti azimut, da bi bila proizvodnja električne energije maksimalna.

V [91] - [101] se avtorji ukvarjajo z načrtovanjem in optimizacijo sistemov za sledenje. Pri tem uporabljajo dinamične (multi-body) modele sledilnih sistemov skupaj z dinamičnimi modeli pogonskih sklopov in vodenja, ki jih drugače imenujejo virtualni modeli oziroma virtualni prototipi. Pri tem uporabljajo že znane modele za izračun sončnega sevanja. Omenjena orodja se uporabljajo za načrtovanje in zvezno vodenje enoosnih sledilnih sistemov. Optimizacija se izvaja, da bi dosegli največjo proizvedeno električno energijo v časovnem intervalu nekaj dni glede na začetni in končni položaj sledilnega sistema kot tudi vrnitev v prvotno lego.

Metode za določanje optimalne trajektorije sledilnega sistema za sledenje modulov, predstavljene v [71] [72], [75], [86], [87], [91] in [98], se bistveno razlikujejo od metode, predlagane v nalogi. Metoda, predlagana v nalogi, je predstavljena za dvoosni sledilni sistem, ki se premika diskretno. Pri predlagani metodi se optimizacija izvaja za vsak dan posebej. Model dvoosnega sledilnega sistema je predstavljen v obliki karakteristik, ki so bile izmerjene na dejanskem sledilniku. Pri tem je naloga s pomočjo Diferenčne evolucije minimizirati ciljno funkcijo, upoštevajoč vse omejitve sledilnega sistema.

Pomembna prednost predlagane metode v nalogi je uporaba postopka, znanega iz teorije stohastičnih optimizacijskih teorij. Trajektorija sledilnega sistema za sledenje sončnih modulov soncu je določena z optimizacijo, upoštevajoč kriterijsko funkcijo in omejitve problema. Vrednost kriterijske funkcije je določena s pomočjo modela sledilnega sistema, opisanega v poglavju tri in napovedi sončnega sevanja, opisanega v poglavju štiri. Trajektorija sledilnega sistema je določena z optimizacijo in je optimalna oziroma najboljša možna glede na uporabljeno kriterijsko funkcijo in podane omejitve. Uporabnost predlagane metode se ne zmanjša niti v primeru uporabe drugačne kriterijske funkcije, drugačnih omejitev niti v primeru uporabe bolj popolnih modelov sledilnega sistema in metod za napoved sončnega sevanja.

V nadaljevanju bomo podrobno pokazali, kako s pomočjo optimizacije določiti trajektorijo sledilnega sistema, da bo proizvodnja električne energije sončne elektrarne največja možna glede na razpoložljivo sončno sevanje. Pri tem bomo upoštevali še električne izgube oziroma porabo pogonskega sklopa samega sledilnega sistema. Podali bomo tudi rezultate iskanja optimalnih trajektorij sledilnega sistema za štiri dni v letu. Predpostavili bomo, da so omenjeni dnevi jasni dnevi brez oblakov. Primerjali bomo tudi proizvedeno električno energijo različno vodenih sončnih elektrarn. Pri tem bomo primerjali sončne elektrarne, kjer zvezno sledimo poti sonca, kjer poti sonca sledimo po predlagani optimalni trajektoriji, kjer soncu sledimo po urah in kjer je sončna elektrarna postavljena fiksno pod določenim naklonom.

5.1 Izvedba optimizacije z uporabo diferenčne evolucije

Nelinearnost optimizacijskega problema nas vodi k reševanju problema s pomočjo stohastične iskalne metode, imenovane Diferenčna evolucija DE [102]. DE omogoča vključitev različnih

omejitev, globalno preiskavo problemskega prostora in pri tem poišče optimum. DE posnema princip naravne evolucije in ne potrebuje posebnega izhodišča. Na začetku optimizacije ustvari naključno populacijo NP potencialnih rešitev oziramo osebkov. Po naključno izbrani začetni populaciji se izvede selekcija izbranih staršev, kjer se na podlagi vrednosti kriterijskih funkcij posameznega starša izberejo tisti, ki se bodo v primeru, da izpolnjujejo pogoje, prenesli v naslednjo generacijo. Za doseg pestrejših nove populacije se izvede križanje. Proces mutacije, križanje in selekcije ponavljamo vse do zadovoljitve zaustavitvenega kriterija. Zaustavitveni kriterij je lahko definiran z vrednostjo kriterijske funkcije, ki jo je treba doseči, ali z največjim številom generacij G_{\max} .

Pri diferenčni evoluciji je potrebno najprej izbrati vhodne parametre optimizacije, in sicer zaustavitveno vrednost VTR , število iskanih parametrov D , velikost populacije NP , največje dovoljeno število generacij G_{\max} , faktor skaliranja F in krmilni parameter križanja CR . Pri tem običajno izberemo $NP \geq 10 D$. Diferenčna evolucija naključno izbere začetno populacijo $x_{j,0}^i$ dimenzij $NP \times D$ (5.1). Pri tem indeks j označuje j -tega od D parametrov elementa i -tega elementa začetne populacije $G = 0$. Vrednosti parametrov posameznih elementov so določene naključno s (5.1), kjer sta $x_j^{(L)}$ in $x_j^{(U)}$ spodnja (L) in zgornja (U) meja za j -ti parameter.

$$x_{j,0}^i = \text{rand}_j[0,1] \left(x_j^{(U)} - x_j^{(L)} \right) + x_j^{(L)}, \quad i = 1, \dots, NP, \quad j = 1, \dots, D \quad (5.1)$$

Če je najmanjša vrednost kriterijske funkcije, ki pripada poljubnemu članu populacije, manjša od zaustavitvene vrednosti VTR , lahko iterativni proces zaustavimo ter kot končni rezultat podamo vrednosti parametrov člana populacije, ki mu pripada omenjena vrednost kriterijske funkcije. V kolikor zaustavitveni pogoj ni izpolnjen, se izvedeta koraka mutacije (5.2) in križanja (5.3).

$$u_{j,G-1}^i = x_{j,G-1}^{r_3} + F \left(x_{j,G-1}^{r_1} - x_{j,G-1}^{r_2} \right), \quad i = 1, \dots, NP, \quad j = 1, \dots, D, \quad G = 0, \dots, G_{\max} \quad (5.2)$$

$$u_{j,G}^i = \begin{cases} u_{j,G-1}^i & \text{če } \text{rand}_j[0,1] \leq CR \text{ ali } j = k \\ x_{j,G-1}^i & \text{sicer} \end{cases} \quad (5.3)$$

Pri koraku mutacije algoritem diferenčne evolucije preko uteži F dodaja utežene razlike j -tega parametra dveh naključno izbranih članov populacije r_1 in r_2 k j -temu parametru tretjega, naključno izbranega člana populacije r_3 (5.2). Vrednost uteži F izberemo na intervalu $[0, 2]$. Osnovni princip je torej kombiniranje razlike j -tega parametra treh naključno izbranih članov populacije za tvorjenje razlike j -tega parametre mutiranega člana populacije $u_{j,G-1}^i$. Postopek se ponovi za vse D parametre. V (5.2) predstavlja G trenutno generacijo populacije, G_{\max} pa označuje število populacij. Nadalje se izvede še uniformno križanje (5.3), ki ustvari člana populacije $u_{j,G}^i$ iz vrednosti parametrov člana začetne in člana mutirane populacije. V (5.3) je k naključno izbrano število na intervalu $\{1, \dots, D\}$, ki zagotavlja, da je vsaj en parameter člana populacije $u_{j,G}^i$ različen od $x_{j,G-1}^i$. Diferenčna evolucija torej križa vsakega i -tega člana začetne populacije z i -tim članom mutirane populacije. Verjetnost križanja CR izberemo na intervalu $[0, 1]$. CR kontrolira število parametrov oziroma njihovih vrednosti, ki bodo vzeti iz mutiranega vektorja. Podobno, kot pri začetni populaciji, je potrebno tudi pri populaciji, dobljeni s križanjem, vse člane ustrezno

ovrednotiti s kriterijsko funkcijo. Pri tem hkrati primerjamo vrednosti kriterijskih funkcij vseh članov začetne in križane populacije ter tvorimo novo populacijo iz boljših članov. Hkrati najmanjšo vrednost kriterijske funkcije ponovno primerjamo z zaustavitveno vrednostjo VTR in v kolikor je zaustavitveni pogoj izpolnjen, celoten postopek končamo ter kot končni rezultat izberemo vrednosti parametrov člana populacije, ki mu pripada omenjena vrednost kriterijske funkcije. V kolikor zaustavitveni pogoj ni izpolnjen, ponovimo celoten postopek, pri tem pa mesto začetne populacije zasede nova populacija. Na takšen način opisani postopek iterativno ponavljamo tako dolgo, da vrednost kriterijske funkcije postane manjša od VTR ali da dosežemo na začetku predpisano število generacij G_{max} .

V poglavju 4.4 je predstavljena metoda za napoved celotnega I_{hr} , direktnega $I_{b,h}$ in difuznega $I_{d,h}$ sončnega sevanja na vodoravno površino. Vse komponente sončnega sevanja so zapisane v obliki časovno odvisne funkcije za določen dan v letu. Komponente sončnega sevanja se uporabljajo skupaj s časovno odvisnima kotoma β in a_w in izrazi (4.16) in (4.21) za določitev časovno odvisnega sončnega sevanja na poljubno usmerjeno površino $I_c(t)$ (4.43). Če upoštevamo še aktivno površino A_{pV} in skupni izkoristek sončne elektrarne η , lahko izrazimo proizvedeno električno energijo sončne elektrarne v intervalu $t \in [t_1, t_2]$ s (5.4).

$$E_{pT} = \eta A_{pV} \int_{t_1}^{t_2} I_c(\tau) d\tau \quad (5.4)$$

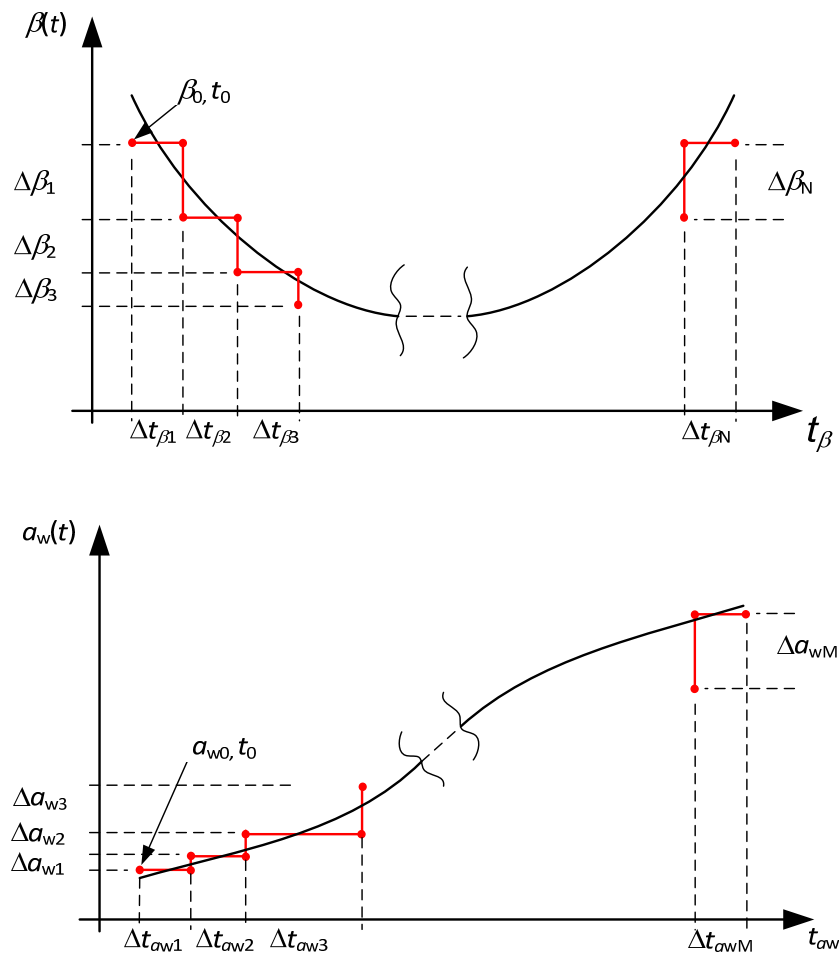
Pri tem skupni izkoristek sončne elektrarne η upošteva izkoristek sončnih modulov, DC/DC pretvornika z MPPT in izkoristek razsmernika.

Vprašanje, ki se pri tem zastavi, je, kako določiti trajektoriji sledilnega sistema, torej, kako določiti naklon $\beta(t)$ in azimut $a_w(t)$, da bo proizvodnja električne energije sončne elektrarne največja, hkrati pa bodo upoštevane še električne izgube oziroma poraba pogonskega sklopa sledilnega sistema.

Če sledilni sistem zvezno sledi trajektoriji sonca in če pri tem zanemarimo električne izgube oziroma porabo pogonskega sklopa sledilnega sistema, dobimo največjo možno proizvedeno električno energijo sončne elektrarne $E_{pT_{ideal}}$. To pomeni, da sončni žarki ves čas padajo pravokotno na sončne module. Takrat je izplen pri pretvorbi energije sončnega sevanja, ki pade na površino modulov v električno energijo, največji. To so idealni pogoji, katerim se v realnosti lahko le približamo. V nalogi obravnavan dvoosni sledilni sistem uporablja konstantno hitrost pogonskega sklopa, zato je zvezno sledenje neizvedljivo. Z vklopom in izklopom 24 V napajanja pogonskega sklopa je omogočeno gibanje sledilnega sistema. Vsaka sprememba naklona β in azimuta a_w ima za posledico električne izgube, opisane v poglavju tri. Električne izgube sledilnega sistema kot funkcija naklona $\beta(t)$ in azimut $a_w(t)$ so predstavljene na slikah 3.5 in 3.8. Število sprememb naklona in azimuta, kot tudi čas in višina posameznih sprememb, so določene s pomočjo optimizacije. Kako to izvedemo, je opisano v nadaljevanju.

Pri tem sta β_0 in a_{w0} začetni vrednosti kota naklona in kota azimuta, od $\Delta\beta_1$ do $\Delta\beta_N$ so posamezne spremembe naklona, od Δa_{w1} do Δa_{wM} so posamezne spremembe azimuta, od $\Delta t_{\beta1}$ do $\Delta t_{\beta N}$ so

časovni intervali med posameznimi sprememba naklona in od Δt_{aw1} do Δt_{awM} so časovni intervali med posameznimi spremembami azimuta. Na sliki 5.1 je prvi del zapisa (5.5), ki govori o določanju spremembe naklona β , predstavljen grafično. Podobno kot za spremembo naklona velja tudi za spremembo azimuta, ki predstavlja drugi del zapisa (5.5). Pri tem je potrebno poudariti, da so časi posameznih sprememb naklona $\Delta\beta_j$ in azimuta Δa_{wj} , zanemarljivi v primerjavi z intervalom, v katerem mirujejo. Zato lahko posamezne spremembe, naklona $\Delta\beta_j$ in azimuta Δa_{wj} , rešimo trenutno, kot je prikazano na sliki 5.1.



Slika 5.1: Shematska predstavitev trajektorij sledilnega sistema v obliki diskretnih vrednosti sprememb v naklonu β in azimutu a_w s časi med spremembami in začetnimi vrednostmi.

Števili sprememb naklona N in azimuta M sta odvisni od celotnega izkoristka sončne elektrarne, aktivne površine sončne elektrarne in električnih izgub pogonskega sklopa sledilnega sistema $E_c(|\Delta\beta|)$ in $E_c(|\Delta a_w|)$, ki je za naš primer določen v poglavju tri. Števili sprememb N in M morata biti dovolj veliki, da po optimizaciji ostane vsaj ena ali dve spremembi naklona β in azimuta a_w , enaki vrednosti nič. Če seveda ta pogoj ni izpolnjen, moramo povečati števili sprememb N in M . Za primere, obravnavane v nalogi, smo izbrali števili sprememb $N = M = 42$. Tako je, upoštevajoč (5.5), skupno število parametrov D , katerih vrednosti iščemo z DE enako $D = (2N + 2M + 2) = 170$.

Vektor parametrov \mathbf{x} , ki ga iščemo z DE v skladu s terminologijo DE, imenovan tudi član populacije, je definiran s (5.5).

$$\mathbf{x} = \left[\beta_0, \Delta\beta_1, \dots, \Delta\beta_N, \Delta t_{\beta_1}, \Delta t_{\beta_2}, \dots, \Delta t_{\beta_N}, \right. \\ \left. a_{w0}, \Delta a_{w1}, \dots, \Delta a_{wM}, \Delta t_{aw1}, \Delta t_{aw2}, \dots, \Delta t_{awM} \right] \quad (5.5)$$

Velikost populacije NP je v skladu s priporočili [102] nastavljena na $NP = 10D = 1700$. Če je časovni interval opazovanja $t \in [t_1, t_2]$ in sta spodnja in zgornja meja za naklon $[\beta_{min}, \beta_{max}]$ in azimut $[a_{w min}, a_{w max}]$, lahko začetno populacijo, ki jo naključno generira DE, omejimo s (5.6):

$$\begin{aligned} 2 \leq \Delta\beta_j \leq (\beta_{max} - \beta_{min}) \quad \text{ali} \quad \Delta\beta_j = 0 \\ 0 \leq \Delta t_{\beta_j} \leq (t_2 - t_1) \\ 2 \leq \Delta a_{wj} \leq (a_{w max} - a_{w min}) \quad \text{ali} \quad \Delta a_{wj} = 0 \\ 0 \leq \Delta t_{awj} \leq (t_2 - t_1) \end{aligned} \quad (5.6)$$

kjer $j = 1, 2, \dots, N$ predstavlja indeks, ki označuje j -to spremembo. Začetni vrednosti naklona β_0 in azimuta a_{w0} sta omejeni s (5.7).

$$\begin{aligned} \beta_{min} \leq \beta_0 \leq \beta_{max} \\ a_{w min} \leq a_{w0} \leq a_{w max} \end{aligned} \quad (5.7)$$

Kot omejitve za naklon $[\beta_{min}, \beta_{max}]$ in azimut $[a_{w min}, a_{w max}]$ lahko vzamemo najmanjše in največje vrednosti trajektorij $\beta(t)$ in $a_w(t)$, določenih za primer idealnega zveznega sledenja soncu. Algoritem DE po vsaki generaciji generira NP vektorjev \mathbf{x} (5.5). Vsaki vektor je ocenjen s kriterijsko funkcijo, ki vsebuje napoved sončnega sevanja in model sledilnega sistema, ki sta predstavljena v poglavjih tri in štiri. Ker je obravnavan dan, za katerega želimo izvesti optimizacijo, izbran vnaprej, prav tako vnaprej napovemo celotno I_h , direktno $I_{b,h}$ in razpršeno $I_{d,h}$ sončno sevanje na vodoravno površino. Za določitev celotnega sončnega sevanja na poljubno usmerjeno ploskev $I_c(t)$, ki pade na aktivno površino sončne elektrarne, moramo naklon in azimut podati kot časovno odvisni funkciji $\beta(t)$ in $a_w(t)$.

V nadaljevanju bomo pojasnili, kako iz vektorja \mathbf{x} (5.5), ki ga določimo z DE, dobimo časovno odvisni funkciji oziroma trajektoriji naklona $\beta(t)$ in azimuta $a_w(t)$. Oba kota, naklon $\beta(t)$ in azimut $a_w(t)$, začneta z začetno vrednostjo $\beta(t) = \beta_0$ in $a_w(t) = a_{w0}$ pri času t_0 , kot je prikazano na sliki 5.1. V času $t_1 = t_0 + \Delta t_{\beta_1}$ se začne naklon z začetno vrednostjo $\beta(t_0) = \beta_0$ spreminjati. Spreminja se s časom po funkciji $\beta(t) = \beta(t_0) + \Delta\beta(t-t_1)$, dokler ne doseže vrednosti $\beta(t_0) + \Delta\beta_1$. Pri tem je $\Delta\beta_1$ podana s karakteristiko, prikazano na sliki 3.4 kot funkcija lokalnega časa $t-t_0$. Podobno velja v času $t_j = t_0 + \Delta t_{\beta_1} + \Delta t_{\beta_2} + \Delta t_{\beta_3} + \dots + \Delta t_{\beta_j}$, kjer se začne naklon z začetno vrednostjo $\beta(t_j)$ spreminjati s časom po funkciji $\beta(t) = \beta(t_j) + \Delta\beta(t-t_j)$, dokler ne doseže vrednosti $\beta(t_0) + \Delta\beta_j$. Pri tem je tudi $\Delta\beta(t-t_j)$ podana s karakteristiko, prikazano na sliki 3.5. Časovno odvisni naklon $\beta(t)$ se spremeni po opisanem postopku za vsako od N sprememb $\Delta\beta_j$, ki se začne v času t_j . Enak postopek se uporabi za določitev časovno odvisnega azimuta $a_w(t)$. Trajektoriji oziroma časovno odvisna naklon $\beta(t)$ in

azimut $a_w(t)$ sta potrebna v (4.21) in (4.43) za določitev sončnega sevanja na poljubno usmerjeno površino $I_c(t)$, ki se nadalje uporablja za izračun celotne proizvedene energije iz sončne elektrarne $E_{PT\ opt}$ (5.4). Pri izračunu $E_{PT\ opt}$ sta trajektoriji naklona $\beta(t)$ in azimuta $a_w(t)$ določeni z optimizacijo.

Električne izgube oziroma poraba pogonskega sklopa sledilnega sistema se določijo za vsako spremembo posebej, tako za spremembo naklona $\Delta\beta_j$ kakor tudi za spremembo azimuta Δa_{wj} , z uporabo karakteristik $E_c(|\Delta\beta|)$, $E_c(|\Delta a_w|)$, ki sta podani na slikah 3.5 in 3.8. Skupne izgube oziroma poraba električne energije pogonskih sklopov sledilnega sistema E_c za dani trajektoriji, naklon $\beta(t)$ in azimut $a_w(t)$, so določene s (5.8) kot vsota energij, ki se porabijo za posamezne spremembe kotov.

$$E_c = \sum_{j=1}^N E_c(\Delta\beta_j) + \sum_{j=1}^N E_c(\Delta a_{wj}) + E_c(\Delta\beta_0) + E_c(\Delta a_{w0}) \quad (5.8)$$

Pri tem so z $E_c(\Delta\beta_0)$ in $E_c(\Delta a_{w0})$ označene izgube sledilnega sistema za vračanje le-tega v začetni položaj. Začetni položaj je definiran z naklonom β_0 in azimutom a_{w0} . $E_c(\Delta\beta_j)$ in $E_c(\Delta a_{wj})$ označujeta izgube sledilnega sistema za j -to spremembo naklona in azimuta.

V danem primeru smo za iskanje optimalnih trajektorij, naklona $\beta(t)$ in azimuta $a_w(t)$, ki sta definirani z elementi vektorja \mathbf{x} (5.5), uporabili DE in kriterijsko funkcijo q , definirano s (5.9).

$$q = E_{PT\ ideal} / (E_{PT\ opt} - E_c) \quad (5.9)$$

Pri tem je $E_{PT\ ideal}$ proizvedena električna energija sončne elektrarne z idealnim sledilnim sistemom, kjer zvezno sledimo trajektoriji sonca, tako da sončni žarki ves čas padajo pravokotno na aktivno površino modulov. Poraba električne energije oziroma izgube sledilnega sistema so v tem primeru enake nič. $E_{PT\ opt}$ predstavlja proizvedeno električno energijo sončne elektrarne, ki sledi soncu po trajektorijah naklona $\beta(t)$ in azimuta $a_w(t)$, ki sta definirani z elementi vektorja \mathbf{x} (5.5), katerega spreminja DE. E_c predstavlja električne izgube, ki nastanejo pri sledenju soncu z omenjenima trajektorijama $\beta(t)$ in $a_w(t)$.

Da pri optimizaciji ne pride do nerazumljivih rezultatov in da optimizacija ne poišče lokalnega minimuma izven dovoljene zaloge vrednosti trajektorij $\beta(t)$ in $a_w(t)$, vpeljemo omejitve od (5.10) do (5.15).

$$\beta_{min} \leq \beta(t) \leq \beta_{max}, \quad \forall t \in [t_1, t_2] \quad (5.10)$$

$$a_{w\ min} \leq a_w(t) \leq a_{w\ max}, \quad \forall t \in [t_1, t_2] \quad (5.11)$$

$$\sum_{j=1}^N \Delta\beta_j \leq \beta_{max} - \beta_{min} \quad (5.12)$$

$$\sum_{j=1}^N \Delta a_{wj} \leq a_{w \max} - a_{w \min} \quad (5.13)$$

$$\sum_{j=1}^N \Delta t_{\beta j} \leq t_2 - t_1 \quad (5.14)$$

$$\sum_{j=1}^N \Delta t_{awj} \leq t_2 - t_1 \quad (5.15)$$

Izraza (5.10) in (5.11) pogojujeta, da trajektoriji naklona in azimuta ostaneta znotraj območja gibanja sledilnega sistema. Vsota sprememb naklona in azimuta ne sme presežati razpona gibanja (5.12) in (5.13), medtem ko morajo biti vse spremembe končane znotraj obravnavanega časovnega intervala $[t_1, t_2]$ (5.14) in (5.15). Pri tem je minimalna sprememba kota naklona $\Delta\beta_j$ in azimuta Δa_{wj} omejena na dve stopinji in je določena z vklopom in izklopom pogona sledilnega sistema.

V danem primeru je interval opazovanja 24 ur oziroma od vzhoda do zahoda Sonca za obravnavani dan. Časovna diskretizacija je v vseh primerih 0,5 s. V optimizaciji je vsak vektor \mathbf{x} (5.5) generiran z DE, ovrednoten s kriterijsko funkcijo q (5.9). Pri tem se preverijo mejne vrednosti (5.6) in omejitveni pogoji od (5.10) do (5.15). Končni rezultat optimizacije je tako vektor \mathbf{x} (5.5) z najboljšo vrednostjo kriterijske funkcije q . Ta vektor v celoti določa optimalni trajektoriji naklona $\beta(t)$ in azimuta $a_w(t)$. Nastavitve parametrov DE, ki smo jih uporabili med optimizacijo, so zbrane v tabeli 5.1.

Tabela 5.1: Nastavitve parametrov DE med optimizacijo.

Parameter	Vrednost
Število iskanih parametrov D	170
Velikost populacije NP	$D*10$
Krmični parameter križanja CR	0.8
Faktor skaliranja F	0.5
Dovoljeno število generacij N	45000
Strategija	DE/rand-to-best/1/exp

Izkoristek ε oziroma učinkovitost sistema sledenja sončne elektrarne lahko v skladu z [91] ovrednotimo s (5.16).

$$\varepsilon = (E_{PT} - E_{PF}) - E_C \quad (5.16)$$

Pri tem je E_{PT} električna energija, proizvedena iz sončne elektrarne s sistemom za sledenje, E_C so električne izgube sledilnega sistema in E_{PF} električna energija, proizvedena iz fiksne sončne elektrarne. E_{PT} je izračunan s (5.4) glede na trajektorijo sledilnega sistema, ki je definirana z naklonom $\beta(t)$ in azimutom $a_w(t)$. Za izračun E_{PF} je uporabljen fiksni naklon sončnih modulov, ki je

enak naklonu sončnih modulov na sončni elektrarni Fakultete za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, $\beta = 23^\circ$. Azimut $\alpha_w(t)$ oziroma orientiranost je enak nič, kar pomeni, da so moduli usmerjeni proti jugu.

Za ovrednotenje predlagane metode smo optimizacijski postopek izvedli za več različnih dni v letu. Zaradi preglednosti bomo v doktorski disertaciji pokazali primere za štiri različne dni. Pri tem smo se osredotočili na poletni in zimski solsticij ter pomladno in jesensko enakonočje.

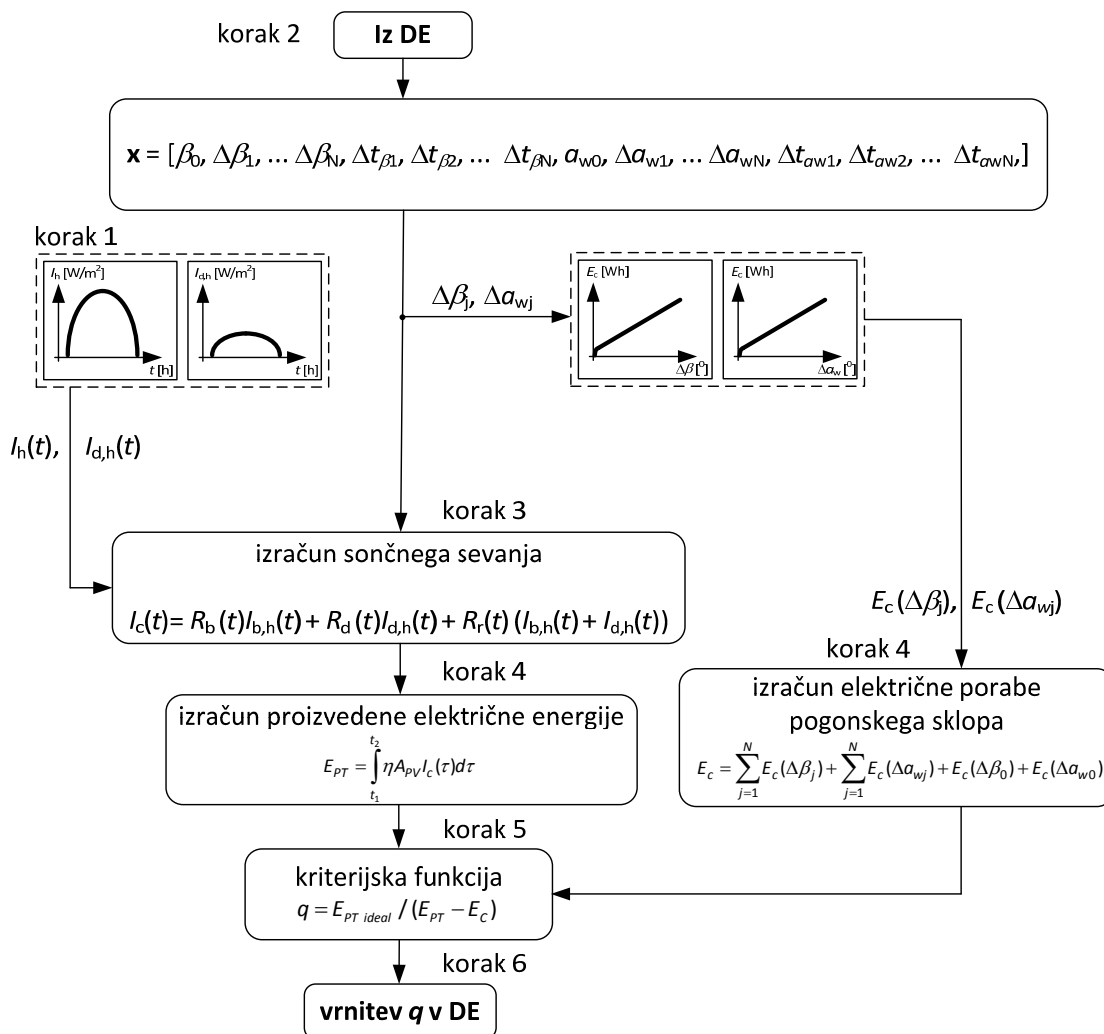
5.2 Primeri optimizacije trajektorij sledilnega sistema

Vsi rezultati, predstavljeni v tem delu, so podani za mesto Maribor. Geografske koordinate Maribora so $46^\circ 33'$ sever in $15^\circ 39'$ vzhod. Rezultati so podani za dvoosni sledilni sistem, ki je podrobneje predstavljen v poglavju tri. Sledilno sončno elektrarno sestavlja 12 modulov moči $P = 210$ W. Tako je inštalirana moč elektrarne $P = 2,5$ kWp in aktivne površine $A_{PV} = 15,32$ m². Izkoristek celotne elektrarne, kjer je upoštevan izkoristek modulov, DC/DC pretvornika z algoritmom za vodenje v točki največje moči in DC/AC razsmernika, je $\eta_{PV} = 0,098$. Električne izgube sledilnega sistema, v obliki porabe električne energije pri sledenju, so določene s karakteristiko, podano na slikah 3.5 in 3.8 ter podrobneje opisane v poglavju tri.

V [126] je pokazano, da v vsakem mesecu obstaja en dan, v katerem je sončno obsevanje enako povprečju mesečnega obsevanja. To je dan, ko je deklinacija enaka povprečnemu odklonu opazovanega meseca. Tako lahko pri izračunih upoštevamo le en dan v mesecu, ki predstavlja mesečno povprečje. Če nadaljujemo, lahko iz dvanajstih dni, ki predstavljajo povprečje posameznih mesecev, poiščemo štiri posebne dni, za katere bomo v doktorski disertaciji pokazali rezultate optimizacije trajektorij sledilnega sistema, in sicer za poletni in zimski solsticij ter za jesensko in pomladno enakonočje. Pri tem predpostavljamo, da so omenjeni dnevi jasni, brez oblakov.

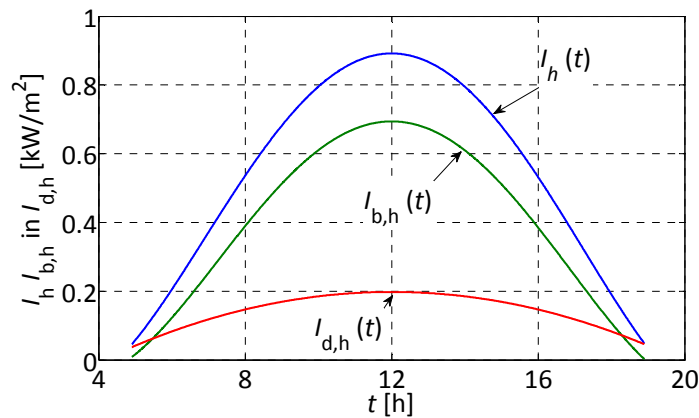
5.2.1 Optimalni trajektoriji sledilnega sistema za poletni solsticij

Postopek določitve trajektorij sledilnega sistema je podrobneje opisan v poglavju 5.1. V nadaljevanju na konkretnem primeru pokažemo, kako potekajo izračuni med optimizacijo. Za lažje razumevanje je potek izračunov med optimizacijo prikazan tudi shematsko, na sliki 5.2.



Slika 5.2: Shematski prikaz poteka izračuna med optimizacijo.

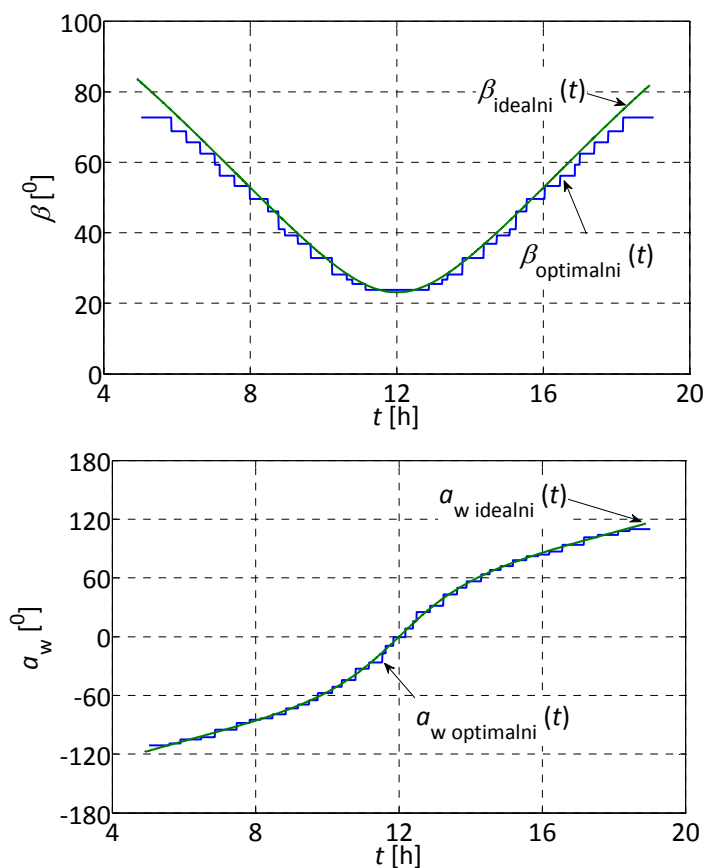
V prvem koraku (korak 1, slika 5.2) za obravnavan dan, v našem primeru je to poletni solsticij, ki je 172. dan v letu ($n = 172$), s pomočjo, v poglavju 4.3, opisano metodo napovemo celotno $I_h(t)$ in difuzno $I_{d,h}(t)$ sončno sevanje na vodoravno površino kot funkciji časa. Direktno sončno sevanje $I_{b,h}(t)$ na vodoravno površino je razlika celotnega in difuznega sončnega sevanja ($I_{b,h}(t) = I_h(t) - I_{d,h}(t)$). Slika 5.3 prikazuje napoved sončnega sevanja v obliki časovno odvisne funkcije za poletni solsticij.



Slika 5.3: Napoved celotnega $I_h(t)$, direktnega $I_{b,h}(t)$ in difuznega $I_{d,h}(t)$ sončnega sevanja na vodoravno površino kot funkcije časa za poletni solsticij.

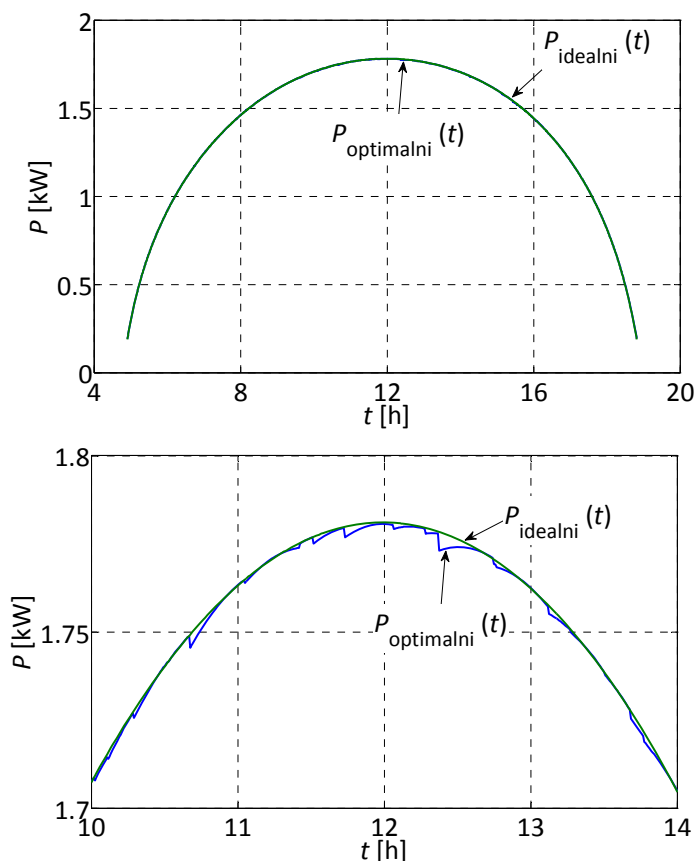
Ob dani napovedi sončnega sevanja lahko v naslednjem koraku (korak 2, slika 5.2) DE generira trajektoriji naklona $\beta(t)$ in azimuta $a_w(t)$. Sledi (korak 3, slika 5.2) izračun sončnega sevanja $I_c(t)$ na nagnjeno in orientirano površino glede na trajektoriji, generirani v prejšnjem koraku. V četrtem koraku (korak 4, slika 5.2) sledita izračuna proizvedene električne energije E_{PT} in porabe pogonskega sklopa E_c za trajektoriji, generirani v koraku dve. V petem koraku (korak 5, slika 5.2) sledi izračun kriterijske funkcije q . V zadnjem koraku (korak 6, slika 5.2) sledi vrnitev kriterijske funkcije q v DE in ponovitev za nove trajektorije naklona in azimuta, ki jih generira DE. Na takšen način opisani postopek, od koraka dva do koraka šest, iterativno ponavljamo tako dolgo, da vrednost kriterijske funkcije postane manjša od VTR ali da dosežemo na začetku predpisano število generacij G_{max} .

Po končani optimizaciji dobimo optimalni trajektoriji za naklon $\beta(t)$ in azimut $a_w(t)$, ki sta prikazani na sliki 5.4.



Slika 5.4: Optimalni trajektoriji naklona $\beta_{\text{optimalni}}(t)$ in azimuta $a_{w \text{ optimalni}}(t)$, določeni z DE in trajektoriji naklona $\beta_{\text{idealni}}(t)$ in azimuta $a_{w \text{ idealni}}(t)$ za idealno zvezno sledenje za poletni solsticij.

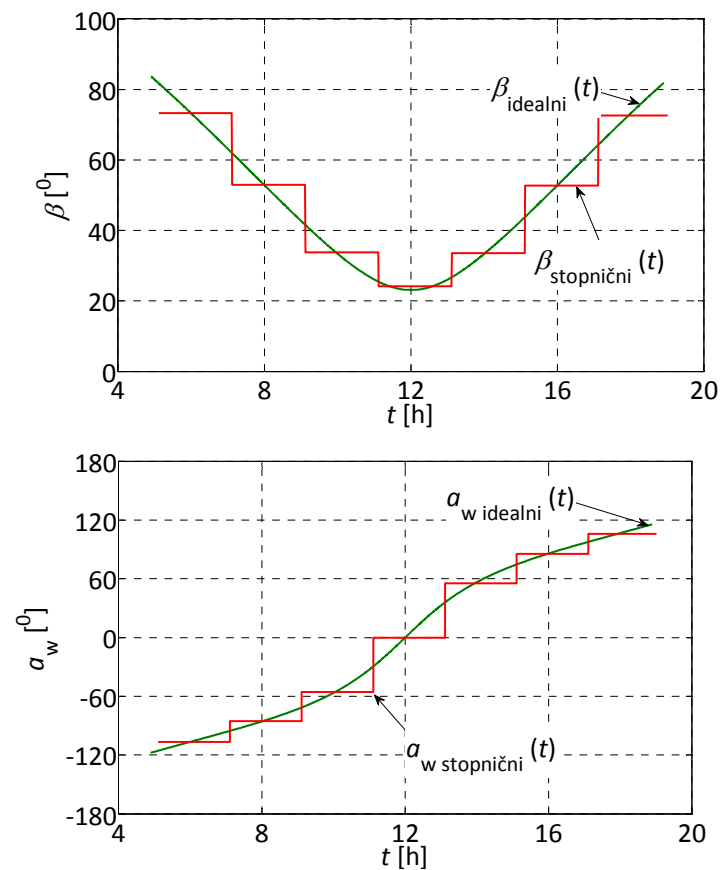
Pri tem sta na sliki 5.4 z $\beta_{\text{optimalni}}(t)$ in $a_{w \text{ optimalni}}(t)$ označeni optimalni trajektoriji določeni z DE, medtem ko sta z $\beta_{\text{idealni}}(t)$ in $a_{w \text{ idealni}}(t)$ označeni idealni trajektoriji za obravnavan dan. Po končani optimizaciji, za optimalni trajektoriji naklona $\beta(t)$ in azimuta $a_w(t)$, določimo moč sončne elektrarne v vsakem trenutku, prikazane na sliki 5.5. Na sliki 5.5 je zraven trenutne moči za optimalni trajektoriji, naklona $\beta(t)$ in azimuta $a_w(t)$, prikazana tudi trenutna moč $P_{\text{PT ideal}}$, ki bi jo dobili, če bi zvezno sledili trajektoriji sonca in za sledenje ne bi potrebovali električne energije.



Slika 5.5:Primerjava izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{optimalni}}(t)$ za trajektoriji, določeni z optimizacijo in izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{idealni}}(t)$ za trajektoriji, ki zvezno sledita soncu. Primerjava je narejena za poletni solsticij.

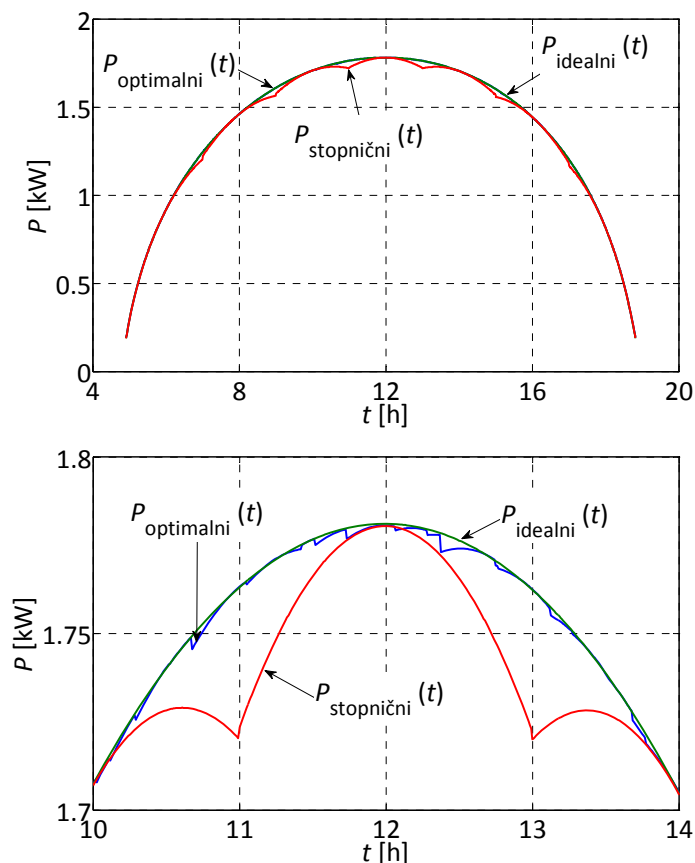
Na sliki 5.5 je s $P_{\text{optimalni}}(t)$ označena moč sončne elektrarne, izračunana za trajektoriji, $\beta_{\text{optimalni}}(t)$ in $a_{w \text{ optimalni}}(t)$, določeni z optimizacijo, kjer upoštevamo še izgube oziroma porabo sledilnega sistema. $P_{\text{idealni}}(t)$ označuje moč sončne elektrarne, izračunano za trajektoriji, $\beta_{\text{idealni}}(t)$ in $a_{w \text{ idealni}}(t)$, ki zvezno sledita soncu, pri čemer poraba električne energije za premikanje sledilnega sistema ni upoštevana. Iz slike 5.5 so razvidne majhne razlike med optimalno trenutno močjo $P_{\text{PT optimal}}$ in idealno trenutno močjo $P_{\text{PT ideal}}$.

Nadalje lahko optimalni trajektoriji sledilnega sistema in posledično optimalno proizvedeno električno energijo sončne elektrarne primerjamo še s sončno elektrarno, kjer sledilni sistem sledi trajektoriji sonca po urah. To pomeni, da sledilni sistem spreminja naklon $\beta(t)$ in azimut $a_w(t)$ na vsaki dve uri. Trajektoriji naklona $\beta_{\text{stopnični}}(t)$ in azimuta $a_{w \text{ stopnični}}(t)$ sta prikazani na sliki 5.6.



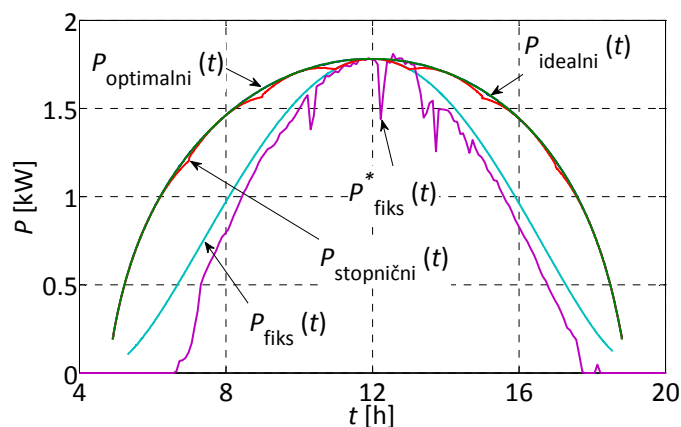
Slika 5.6: Urni trajektoriji naklona $\beta_{\text{stopnični}}(t)$ in azimuta $a_{w \text{ stopnični}}(t)$ in trajektoriji naklona $\beta_{\text{idealni}}(t)$ in azimuta $a_{w \text{ idealni}}(t)$ za idealno zvezno sledenje za poletni solsticij.

V primeru, ko sledilni sistem sledi soncu urno, je trenutna moč elektrarne $P_{\text{stopnični}}(t)$, podana na sliki 5.7. Za lažje ovrednotenje je zraven prikazana še trenutna moč sončne elektrarne pri optimalnem sledenju $P_{\text{optimalni}}(t)$ in trenutna moč sončne elektrarne pri idealnem sledenju $P_{\text{idealni}}(t)$.



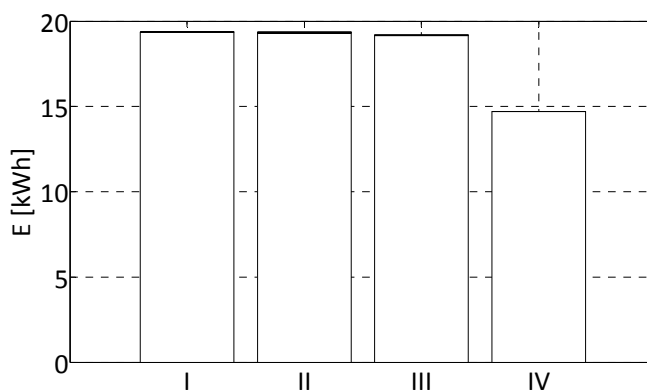
Slika 5.7: Primerjava izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{optimalni}}(t)$ za trajektoriji, določeni z optimizacijo, izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{idealni}}(t)$ za trajektoriji, ki zvezno sledita soncu in izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{stopnični}}(t)$ za trajektoriji, ki urno sledita soncu. Primerjava je narejena za poletni solsticij.

Iz slike 5.7 je razvidno večje odstopanje med optimalno trenutno močjo sončne elektrarne $P_{\text{optimalni}}(t)$ in trenutno močjo sončne elektrarne pri urnem sledenju sledilnega sistema $P_{\text{stopnični}}(t)$. Sončne elektrarne s sledilnim sistemom pogosto ovrednotimo s primerjavo med fiksnimi sončnimi elektrarnami. V danem primeru smo sledilno sončno elektrarno primerjali tudi s fiksno postavljeno sončno elektrarno na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko. Omenjena sončna elektrarna ima fiksni naklon $\beta = 24^\circ$ in je usmerjena v smeri juga $\alpha_w = 0^\circ$. Inštalirana moč in izkoristek fiksne sončne elektrarne sta enaka kot pri sončni elektrarni s sledilnim sistemom. Tako je na sliki 5.8 prikazana izmerjena P_{fiks}^* in izračunana P_{fiks} trenutna moč fiksne sončne elektrarne in izračunana trenutna moč sončne elektrarne pri sledenju z optimizacijo določenima trajektorijama $P_{\text{optimalni}}(t)$, pri idealnem sledenju brez izgub sledilnega sistema $P_{\text{idealni}}(t)$ in pri urnem sledenju $P_{\text{stopnični}}(t)$.



Slika 5.8: Primerjava izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{optimalni}}(t)$ za trajektoriji, določeni z optimizacijo, izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{idealni}}(t)$ za trajektoriji, ki zvezno sledita soncu, izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{stopnični}}(t)$ za trajektoriji, ki urno sledita soncu, izračunane moči fiksne sončne elektrarne $P_{\text{fiks}}(t)$ in izmerjene moči fiksne sončne elektrarne $P_{\text{fiks}}^*(t)$. Primerjava je narejena za poletni solsticij.

Iz slike 5.8 je razvidno dobro ujemanje med izmerjenimi in izračunanimi vrednostmi trenutne moči fiksne sončne elektrarne. Prav tako vidimo, da se trenutna moč fiksne sončne elektrarne približa trenutni moči sledilne sončne elektrarne v okolici poldneva, kjer sta naklon in orientacija fiksne in sledilne sončne elektrarne približno enaka. Če trenutne moči posameznih sončnih elektrarn integriramo po časovnem intervalu od t_1 do t_2 , dobimo proizvedeno električno energijo. Na sliki 5.9 in v tabeli 5.2 je grafično in tabelarično prikazana proizvedena električna energija posameznih sončnih elektrarn za obravnavan dan.



Slika 5.9: Primerjava proizvedene električne energije sončne elektrarne E_{idealni} , ki zvezno sledi soncu (stolpec I), proizvedene električne energije $E_{\text{optimalni}}$, ki sledi soncu po trajektorijah določenih z optimizacijo (stolpec II), proizvedene električne energije sončne elektrarne $E_{\text{stopnični}}$, ki urno sledi soncu in proizvedene električne energije fiksne sončne elektrarne E_{fiks} . Primerjava je narejena za poletni solsticij.

Tabela 5.2: Povzetek rezultatov o proizvodnji električne energije sončne elektrarne in električnih izgubah zaradi sledenja za poletni solsticij.

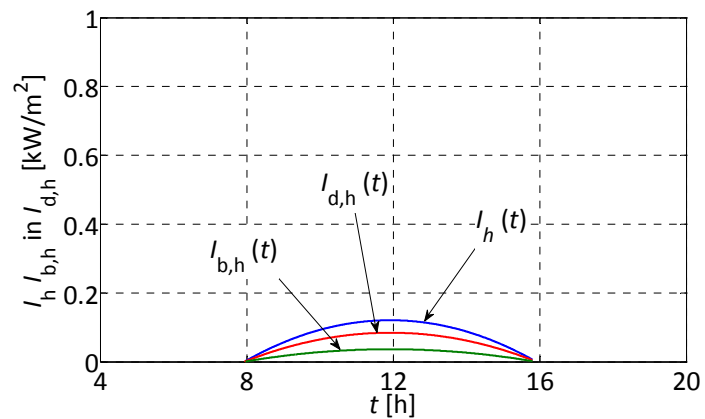
	I	II	III	IV
E_{PT} [kWh]	19,357	19,356	19,206	14,695
E_{PT} [%]	131,7	131,7	130,6	100
E_C [kWh]	0	0,061	0,056	0
$E_{PT} - E_C$ [kWh]	19,357	19,295	19,150	14,695
$E_{PT} - E_C$ [%]	131,7	131,3	130,3	100
ε [kWh]	4,662	4,600	4,455	0

Rezultati, predstavljeni na slikah od 5.3 do 5.9, so povzeti v tabeli 5.2. Pri tem stolpec, označen z I, predstavlja rezultate za sončno elektrarno, ki zvezno sledi soncu, stolpec II predstavlja rezultate, kjer sončna elektrarna sledi soncu po trajektoriji, določeni z optimizacijo, stolpec III predstavlja rezultate, kjer sončna elektrarna urno sledi soncu in stolpec IV predstavlja rezultate, fiksno postavljene sončne elektrarne. Pri tem je z E_{PT} označena proizvodnja električne energije sončne elektrarne v [kWh] in [%], E_C označuje porabo električne energije pogonskega sklopa zaradi sledenja. $E_{PT} - E_C$ označuje dejansko proizvedeno električno energijo, kjer upoštevamo električno porabo sledilnega sistema v [kWh] in [%] in ε , ki označuje izkoristek oziroma učinkovitost sledilne sončne elektrarne v [kWh], podan s (5.16).

V tem poglavju je bil predstavljen postopek določitve trajektorij sledilnega sistema za poletni solsticij. Iz rezultatov vidimo, da s sledenjem dejansko povečamo izplen proizvedene električne energije. Največji izplen je vsekakor v primeru, ko zvezno sledimo trajektoriji sonca, vendar za omenjen sistem ne moremo določiti porabe električne energije pogonskega sklopa. Če primerjamo rezultate optimalnega in urnega sledenja vidimo, da v danem primeru povečanje proizvodnje električne energije ni veliko, do 1 %. Vendar pa se lahko rezultati bistveno spremenijo za različne tipe in števila sončnih modulov kot tudi različnih sistemov in izgub pogonskih sklopov.

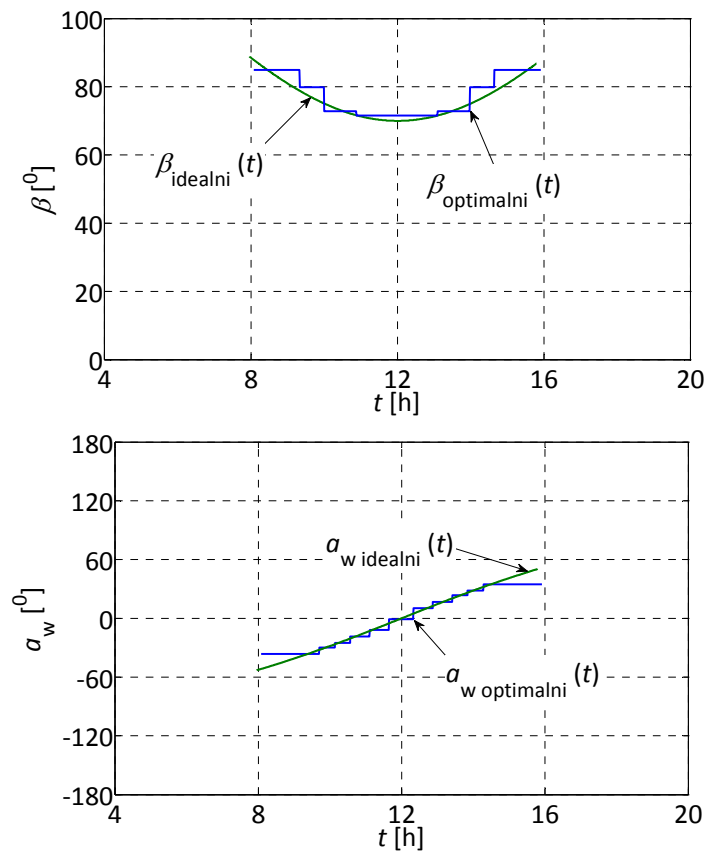
5.2.2 Optimalni trajektoriji sledilnega sistema za zimski solsticij

Na enak način, kot smo to naredili za poletni solsticij, bomo sedaj pokazali še za zimski solsticij, ki je 355. dan v letu ($n = 355$). Tako, kot v prejšnjem primeru, tudi v tem primeru pokažemo najprej z modelom, opisanim v poglavju 4.3, napovedano sončno sevanje za celotno $I_h(t)$ in difuzno $I_{d,h}(t)$ komponento na vodoravno površino, podano kot funkcijo časa. Direktno sončno sevanje $I_{b,h}(t)$ na vodoravno površino je razlika celotnega in difuznega sončnega sevanja ($I_{b,h}(t) = I_h(t) - I_{d,h}(t)$). Slika 5.10 prikazuje napoved sončnega sevanja v obliki časovno odvisne funkcije za poletni solsticij.



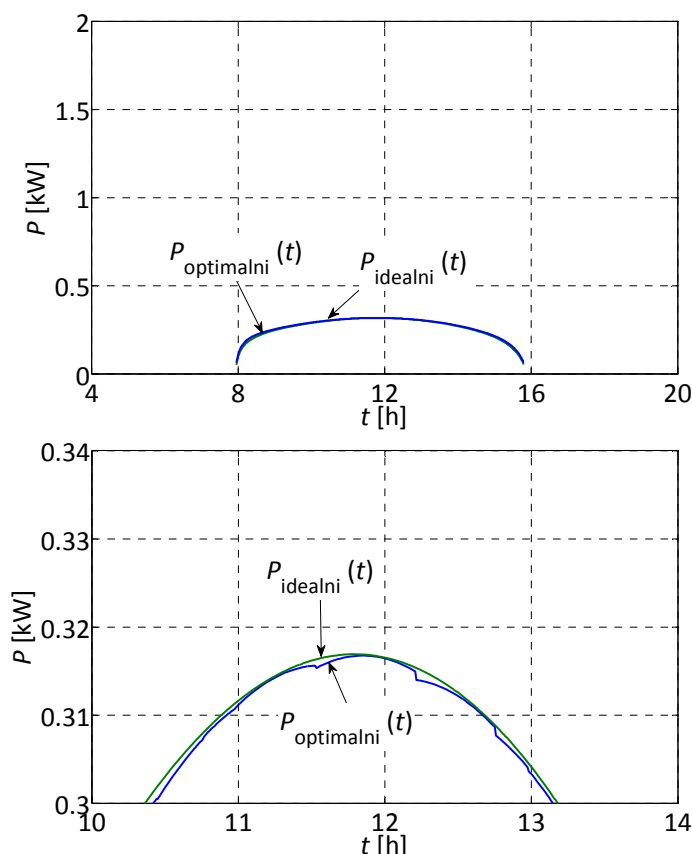
Slika 5.10: Napoved celotnega $I_h(t)$, direktnega $I_{b,h}(t)$ in difuznega $I_{d,h}(t)$ sončnega sevanja na vodoravno površino kot funkcije časa za zimski solsticij.

Po postopku, ki je podrobneje opisan v prejšnjem razdelku s pomočjo slike 5.2, sta v danem primeru s pomočjo napovedi sončnega sevanja in optimizacijskega postopka določeni optimalni trajektoriji naklona $\beta(t)$ in azimuta $a_w(t)$. Optimalni trajektoriji, naklon $\beta_{\text{optimalni}}(t)$ in azimut $a_{w\text{ optimalni}}(t)$, sta prikazani na sliki 5.11, skupaj z idealnima trajektorijama, naklon $\beta_{\text{idealni}}(t)$ in azimut $a_{w\text{ idealni}}(t)$, kjer zvezno sledimo soncu, brez upoštevanja porabe električne energije sledilnega sistema.



Slika 5.11: Optimalni trajektoriji naklona $\beta_{\text{optimalni}}(t)$ in azimuta $a_{w \text{ optimalni}}(t)$, določeni z DE in trajektoriji naklona $\beta_{\text{idealni}}(t)$ in azimuta $a_{w \text{ idealni}}(t)$ za idealno zvezno sledenje za zimski solsticij.

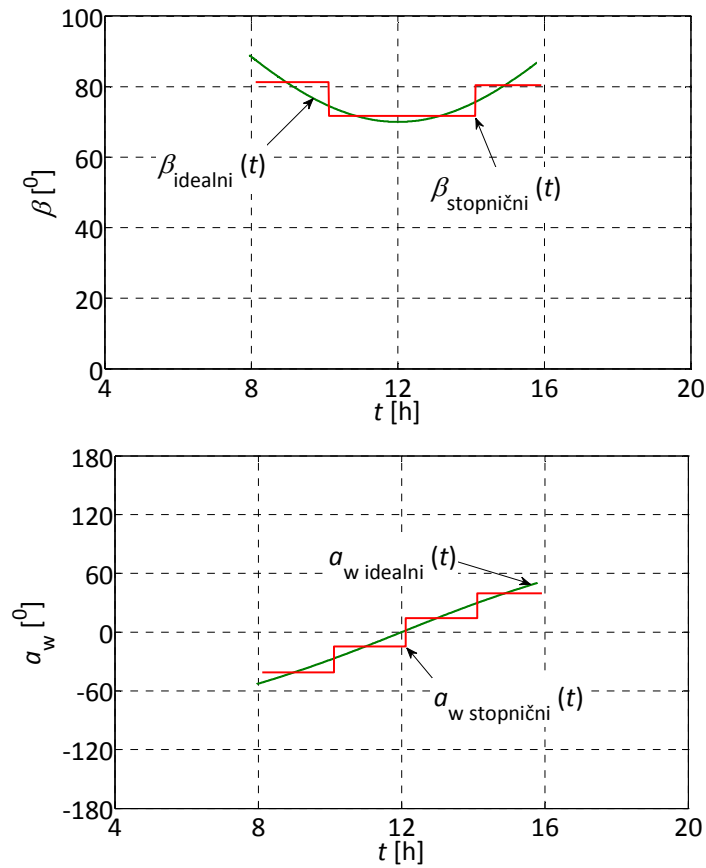
Po končani optimizaciji, za optimalni trajektoriji naklona $\beta_{\text{optimalni}}(t)$ in azimuta $a_{w \text{ optimalni}}(t)$, določimo moč sončne elektrarne v vsakem trenutku, ki je prikazana na sliki 5.12. Na sliki 5.12 je zraven trenutne moči za optimalni trajektoriji, naklona $\beta_{\text{optimalni}}(t)$ in azimuta $a_{w \text{ optimalni}}(t)$, prikazana tudi trenutna moč $P_{PT \text{ ideal}}$, ki bi jo dobili, če bi zvezno sledili trajektoriji, naklona $\beta_{\text{idealni}}(t)$ in azimuta $a_{w \text{ idealni}}(t)$, sonca in za sledenje ne bi potrebovali električne energije.



Slika 5.12: Primerjava izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{optimalni}}(t)$ za trajektoriji, določeni z optimizacijo in izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{idealni}}(t)$ za trajektoriji, ki zvezno sledita soncu. Primerjava je narejena za zimski solsticij.

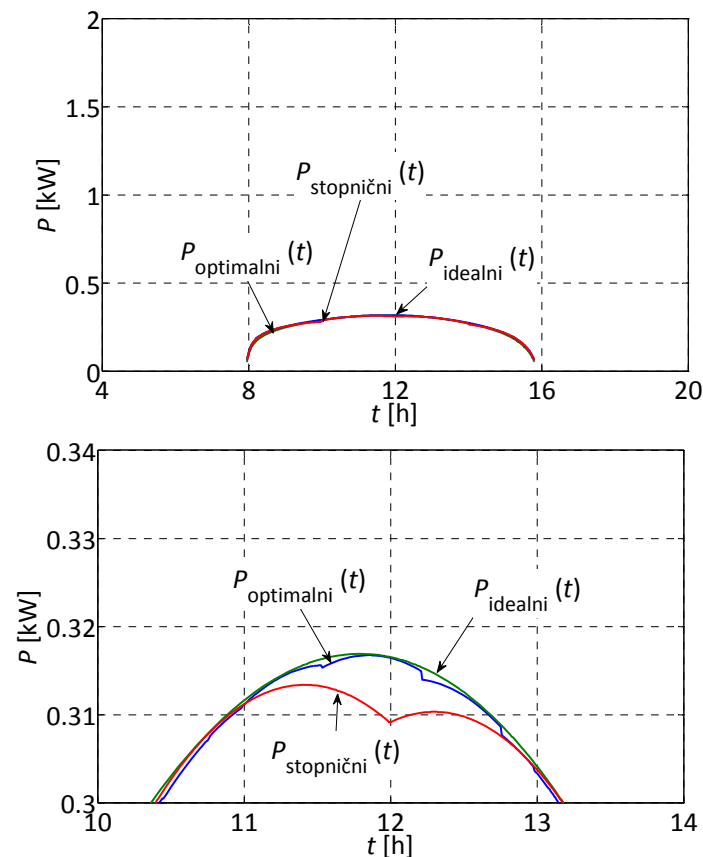
Na sliki 5.12 je s $P_{\text{optimalni}}(t)$ označena moč sončne elektrarne, izračunana za trajektoriji, $\beta_{\text{optimalni}}(t)$ in $a_{w\text{ optimalni}}(t)$, ki sta določeni z optimizacijo in kjer upoštevamo tudi izgube oziroma porabo sledilnega sistema. $P_{\text{idealni}}(t)$ označuje moč sončne elektrarne, izračunane za trajektoriji, $\beta_{\text{idealni}}(t)$ in $a_{w\text{ idealni}}(t)$, ki zvezno sledita soncu, pri čemer poraba električne energije za premikanje sledilnega sistema ni upoštevana. Iz slike 5.12 so razvidne majhne razlike med optimalno trenutno močjo $P_{\text{PT optimal}}$ in idealno trenutno močjo $P_{\text{PT ideal}}$.

Nadalje lahko optimalni trajektoriji sledilnega sistema in posledično optimalno proizvedeno električno energijo sončne elektrarne primerjamo še s sončno elektrarno, kjer sledilni sistem sledi trajektoriji sonca po urah. To pomeni, da sledilni sistem spreminja naklon $\beta(t)$ in azimut $a_w(t)$ na vsaki dve uri. Trajektoriji naklona $\beta_{\text{stopnični}}(t)$ in azimuta $a_{w\text{ stopnični}}(t)$ takega sledilnega sistema sta prikazani na sliki 5.13, skupaj z idealnima trajektorijama, naklona $\beta_{\text{idealni}}(t)$ in azimuta $a_{w\text{ idealni}}(t)$, kjer zvezno sledimo soncu.



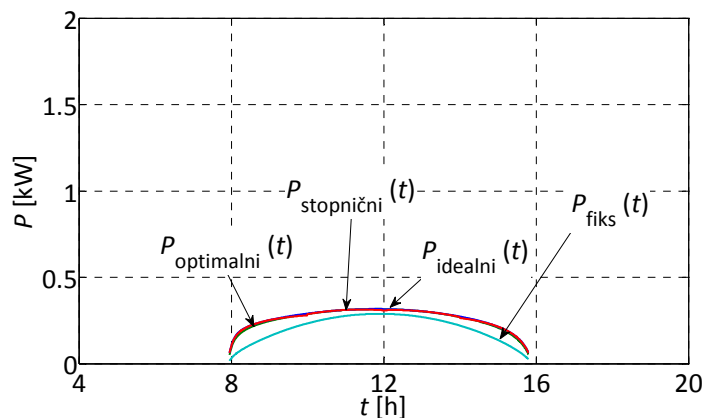
Slika 5.13: Urni trajektoriji naklona $\beta_{\text{stopnični}}(t)$ in azimuta $a_{w \text{ stopnični}}(t)$ in trajektoriji naklona $\beta_{\text{idealni}}(t)$ in azimuta $a_{w \text{ idealni}}(t)$ za idealno zvezno sledenje za zimski solsticij.

V primeru, ko sledilni sistem sledi soncu urno, je trenutna moč elektrarne $P_{\text{stopnični}}(t)$ podana na sliki 5.14. Za lažje ovrednotenje je zraven prikazana še trenutna moč sončne elektrarne pri optimalnem sledenju $P_{\text{optimalni}}(t)$ in trenutna moč sončne elektrarne pri idealnem sledenju $P_{\text{idealni}}(t)$.



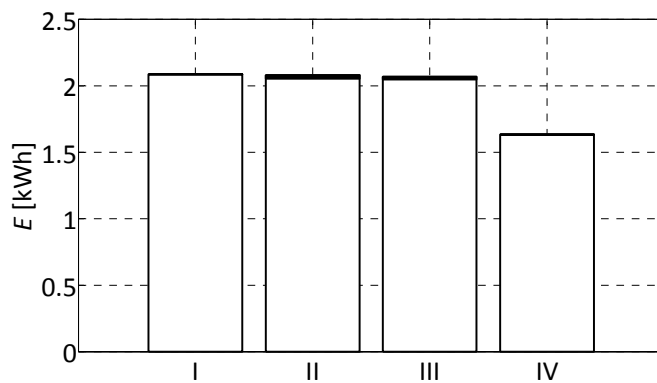
Slika 5.14: Primerjava izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{optimalni}}(t)$ za trajektoriji, določeni z optimizacijo, izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{idealni}}(t)$ za trajektoriji, ki zvezno sledita soncu in izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{stopnični}}(t)$ za trajektoriji, ki urno sledita soncu. Primerjava je narejena za zimski solsticij.

Iz slike 5.14 je razvidno večje odstopanje med optimalno trenutno močjo sončne elektrarne $P_{\text{optimalni}}(t)$ in trenutno močjo sončne elektrarne pri urnem sledenju sledilnega sistema $P_{\text{stopnični}}(t)$. Sončne elektrarne s sledilnim sistemom pogosto ovrednotimo tudi s primerjavo med fiksnimi sončnimi elektrarnami. V danem primeru smo sledilno sončno elektrarno primerjali tudi s fiksno postavljeno sončno elektrarno na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko. Omenjena sončna elektrarna ima fiksni naklon $\beta = 24^\circ$ in je usmerjena v smeri juga $\alpha_w = 0^\circ$. Inštalirana moč in izkoristek fiksne sončne elektrarne sta enaka kot pri sončni elektrarni s sledilnim sistemom. Tako je na sliki 5.15 prikazana izračunana P_{fiks} moč fiksne sončne elektrarne, izračunana moč sončne elektrarne pri sledenju z optimizacijo določenima trajektorijama $P_{\text{optimalni}}(t)$, pri idealnem sledenju, brez izgub sledilnega sistema $P_{\text{idealni}}(t)$ in pri urnem sledenju $P_{\text{stopnični}}(t)$.



Slika 5.15: Primerjava izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{optimalni}}(t)$ za trajektoriji, določeni z optimizacijo, izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{idealni}}(t)$ za trajektoriji, ki zvezno sledita soncu, izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{stopnični}}(t)$ za trajektoriji, ki urno sledita soncu in izračunane moči fiksne sončne elektrarne $P_{\text{fiks}}(t)$. Primerjava je narejena za zimski solsticij.

Iz slike 5.15 je razvidno, da se trenutna moč fiksne sončne elektrarne približa trenutni moči sledilne sončne elektrarne v okolici poldneva, kjer se naklon in azimut fiksne in sledilne sončne elektrarne približata. Če trenutne moči posameznih sončnih elektrarn integriramo po časovnem intervalu od t_1 do t_2 , dobimo proizvedeno električno energijo. Na sliki 5.16 je stolpično prikazana v obravnavanem dnevu proizvedena električna energija posameznih sončnih elektrarn.



Slika 5.16: Primerjava proizvedene električne energije sončne elektrarne E_{idealni} , ki zvezno sledi soncu (stolpec I), proizvedene električne energije $E_{\text{optimalni}}$, ki sledi soncu po trajektorijah, določenih z optimizacijo (stolpec II), proizvedene električne energije sončne elektrarne $E_{\text{stopnični}}$, ki urno sledi soncu in proizvedene električne energije fiksne sončne elektrarne E_{fiks} . Primerjava je narejena za zimski solsticij.

Tabela 5.3: Povzetek rezultatov o proizvodnji električne energije sončne elektrarne in električnih izgubah zaradi sledenja za zimski solsticij.

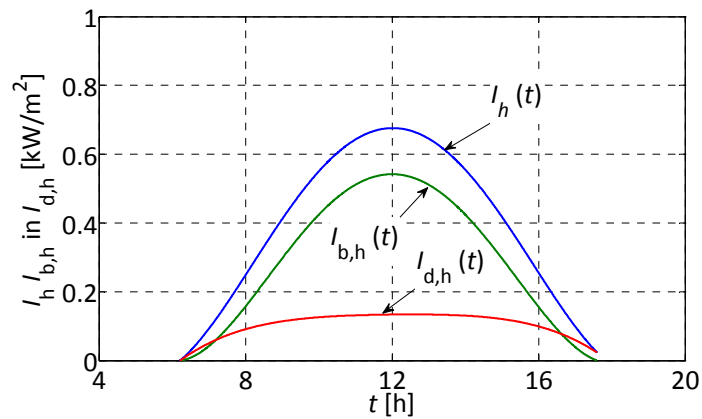
	I	II	III	IV
E_{PT} [kWh]	2,085	2,079	2,068	1,632
E_{PT} [%]	127,7	127,3	126,6	100
E_C [kWh]	0	0,027	0,022	0
$E_{PT} - E_C$ [kWh]	2,085	2,052	2,046	1,632
$E_{PT} - E_C$ [%]	127,7	125,7	125,3	100
ε [kWh]	0,452	0,419	0,414	0

Rezultati, predstavljeni na slikah od 5.10 do 5.16, so povzeti v tabeli 5.3. Pri tem stolpec, označen z I, predstavlja rezultate za sončno elektrarno, ki zvezno sledi soncu, stolpec II predstavlja rezultate, kjer sončna elektrarna sledi soncu po trajektoriji, določeni z optimizacijo, stolpec III predstavlja rezultate, kjer sončna elektrarna urno sledi soncu in stolpec IV predstavlja rezultate fiksno postavljene sončne elektrarne. Pri tem je z E_{PT} označena proizvodnja električne energije sončne elektrarne v [kWh] in [%], E_C označuje porabo električne energije pogonskega sklopa zaradi sledenja. $E_{PT} - E_C$ označuje dejansko proizvedeno električno energijo, kjer upoštevamo električno porabo sledilnega sistema v [kWh] in [%] in ε , ki označuje izkoristek oziroma učinkovitost sledilne sončne elektrarne v [kWh], podan s (5.16).

V tem poglavju je bil predstavljen postopek določitve trajektorij sledilnega sistema za zimski solsticij. Iz rezultatov vidimo, da s sledenjem dejansko povečamo izplen proizvedene električne energije. Največji izplen je vsekakor v primeru, ko zvezno sledimo trajektoriji sonca, vendar za omenjeni sistem ne moremo določiti porabe električne energije pogonskega sklopa. Če primerjamo rezultate optimalnega in urnega sledenja, vidimo, da v danem primeru povečanje proizvodnje električne energije ni veliko, do 1 %. Vendar se lahko rezultati bistveno spremenijo za različne tipe in števila sončnih modulov kot tudi različne sisteme in izgube pogonskih sklopov.

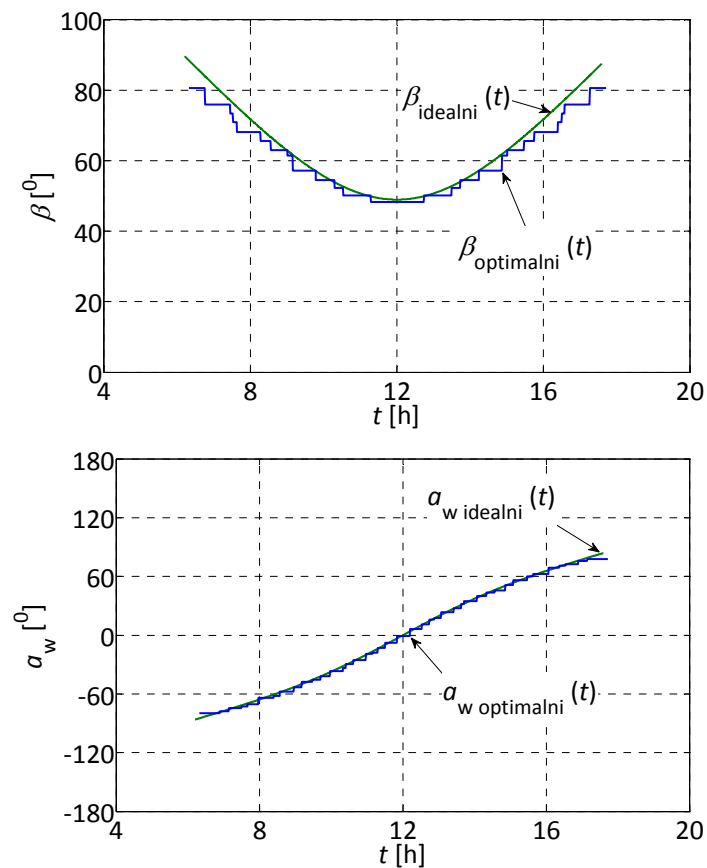
5.2.3 Optimalni trajektoriji sledilnega sistema za pomladno enakonočje

Na enak način, kot smo to naredili za poletni in zimski solsticij, bomo pokazali izračun optimalnih trajektorij sledilnega sistema za pomladno enakonočje, ki je 75. dan v letu ($n = 75$). Tako kot v prejšnjih primerih tudi v tem primeru najprej z modelom napovemo sončno sevanje za celotno $I_h(t)$ in difuzno $I_{d,h}(t)$ komponento na vodoravno površino kot funkcijo časa. Direktno sončno sevanje $I_{b,h}(t)$ na vodoravno površino je razlika celotnega in difuznega sončnega sevanja ($I_{b,h}(t) = I_h(t) - I_{d,h}(t)$). Slika 5.17 prikazuje napoved sončnega sevanja v obliki časovno odvisne funkcije za poletni solsticij.



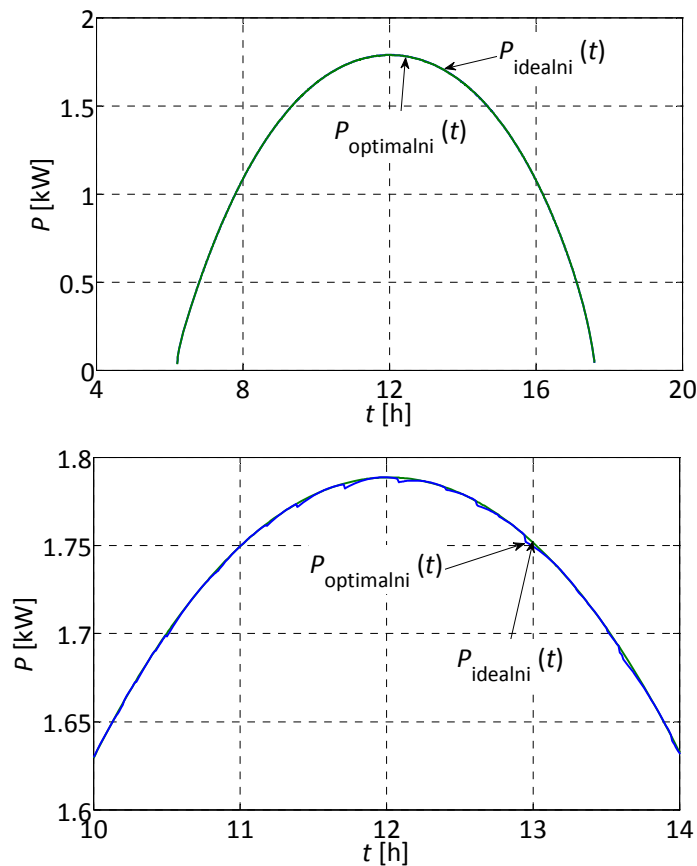
Slika 5.17: Napoved celotnega $I_h(t)$, direktnega $I_{b,h}(t)$ in difuznega $I_{d,h}(t)$ sončnega sevanja na vodoravno površino kot funkcije časa za pomladno enakonočje.

Po postopku, ki je podrobneje opisan v prejšnjem razdelku s pomočjo slike 5.2, sta v danem primeru s pomočjo napovedi sončnega sevanja in optimizacijskega postopka določeni optimalni trajektoriji naklona $\beta(t)$ in azimuta $\alpha_w(t)$. Optimalni trajektoriji, naklon $\beta_{\text{optimalni}}(t)$ in azimut $\alpha_{w \text{ optimalni}}(t)$, sta prikazani na sliki 5.18, skupaj z idealnima trajektorijama, naklon $\beta_{\text{idealni}}(t)$ in azimut $\alpha_{w \text{ idealni}}(t)$, kjer zvezno sledimo soncu, brez upoštevanja porabe električne energije sledilnega sistema.



Slika 5.18: Optimalni trajektoriji naklona $\beta_{\text{optimalni}}(t)$ in azimuta $\alpha_{w \text{ optimalni}}(t)$, določeni z DE in trajektoriji naklona $\beta_{\text{idealni}}(t)$ in azimuta $\alpha_{w \text{ idealni}}(t)$ za idealno zvezno sledenje za pomladno enakonočje.

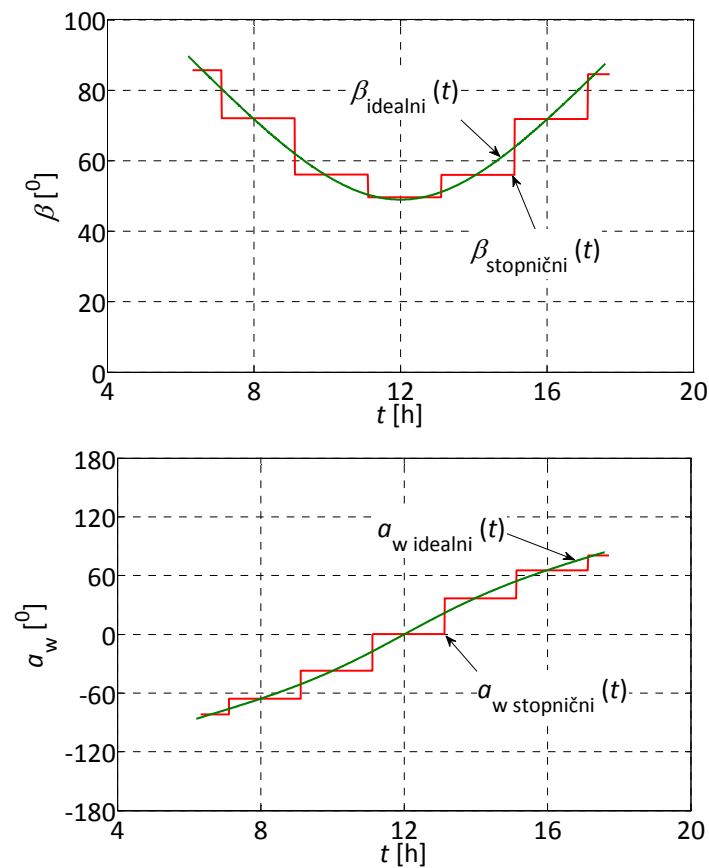
Po končani optimizaciji, za optimalni trajektoriji naklona $\beta_{\text{optimalni}}(t)$ in azimuta $\alpha_{w \text{ optimalni}}(t)$, določimo moč sončne elektrarne v vsakem trenutku, ki je prikazana na sliki 5.19. Na sliki 5.19 je zraven trenutne moči za optimalni trajektoriji, naklona $\beta_{\text{optimalni}}(t)$ in azimuta $\alpha_{w \text{ optimalni}}(t)$, prikazana tudi trenutna moč $P_{\text{PT ideal}}$, ki bi jo dobili, če bi zvezno sledili trajektoriji, sonca in za sledenje ne bi potrebovali električne energije.



Slika 5.19: Primerjava izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{optimalni}}(t)$ za trajektoriji, določeni z optimizacijo in izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{idealni}}(t)$ za trajektoriji, ki zvezno sledita soncu. Primerjava je narejena za pomladno enakonočje.

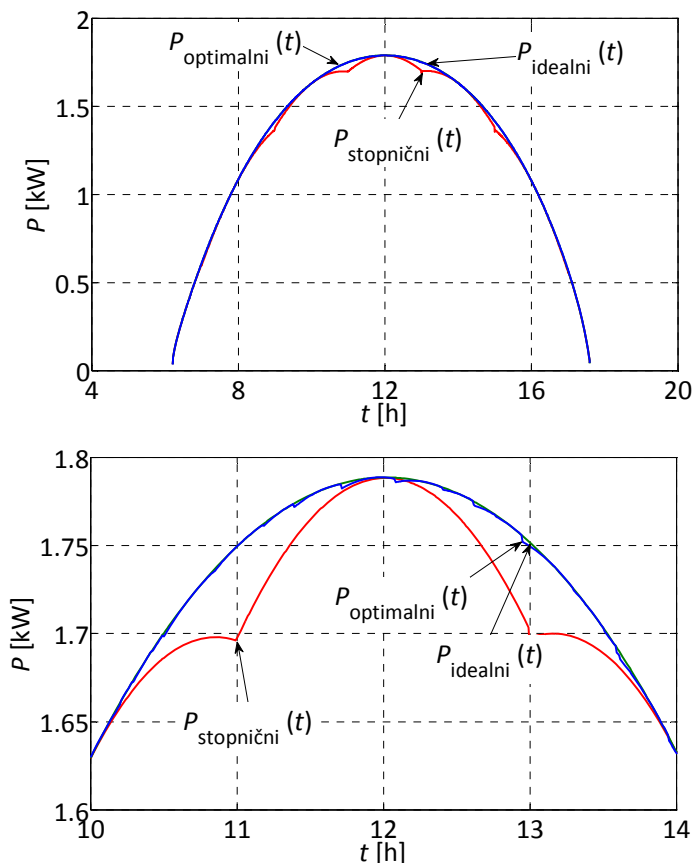
Na sliki 5.19 je s $P_{\text{optimalni}}(t)$ označena moč sončne elektrarne, izračunana za trajektoriji, $\beta_{\text{optimalni}}(t)$ in $a_{w\text{optimalni}}(t)$, določeni z optimizacijo, kjer upoštevamo še izgube oziroma porabo sledilnega sistema. $P_{\text{idealni}}(t)$ označuje moč sončne elektrarne, izračunane za trajektoriji, $\beta_{\text{idealni}}(t)$ in $a_{w\text{idealni}}(t)$, ki zvezno sledita soncu, pri čemer poraba električne energije za premikanje sledilnega sistema ni upoštevana. Iz slike 5.19 so razvidne majhne razlike med optimalno trenutno močjo $P_{\text{PT optimal}}$ in idealno trenutno močjo $P_{\text{PT ideal}}$.

Nadalje lahko optimalni trajektoriji sledilnega sistema in posledično optimalno proizvedeno električno energijo sončne elektrarne primerjamo še s sončno elektrarno, kjer sledilni sistem sledi trajektoriji sonca po urah. To pomeni, da sledilni sistem spreminja naklon $\beta(t)$ in azimut $a_w(t)$ na vsaki dve uri. Trajektoriji naklona $\beta_{\text{stopnični}}(t)$ in azimuta $a_{w\text{stopnični}}(t)$ sta prikazani na sliki 5.20.



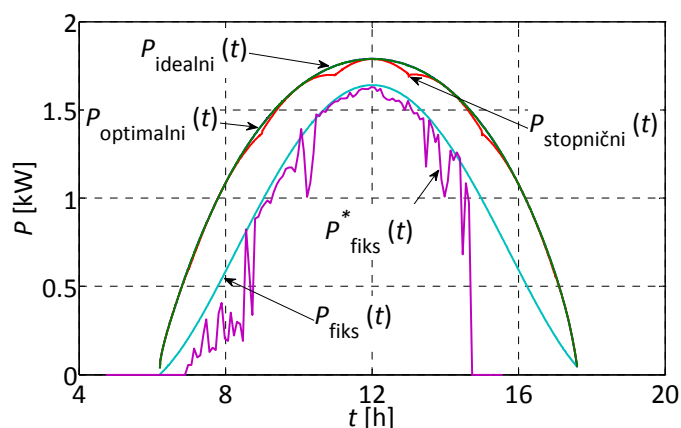
Slika 5.20: Urni trajektoriji naklona $\beta_{\text{stopnični}}(t)$ in azimuta $a_{w \text{ stopnični}}(t)$ in trajektoriji naklona $\beta_{\text{idealni}}(t)$ in azimuta $a_{w \text{ idealni}}(t)$ za idealno zvezno sledenje za pomladno enakonočje.

V primeru, ko sledilni sistem sledi soncu urno, je trenutna moč elektrarne $P_{\text{stopnični}}(t)$ podana na sliki 5.21. Za lažje ovrednotenje je zraven prikazana še trenutna moč sončne elektrarne pri optimalnem sledenju $P_{\text{optimalni}}(t)$ in trenutna moč sončne elektrarne pri idealnem sledenju $P_{\text{idealni}}(t)$.



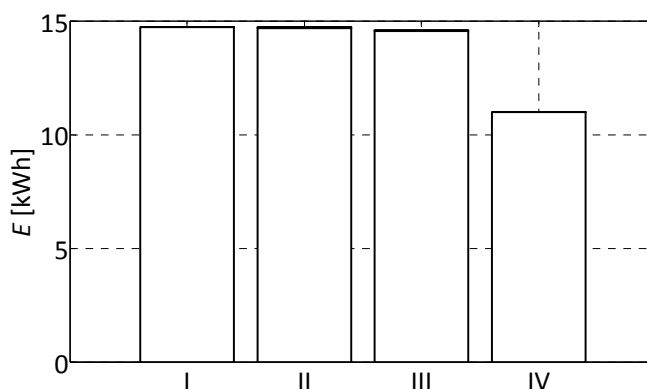
Slika 5.21: Primerjava izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{optimalni}}(t)$ za trajektoriji, določeni z optimizacijo, izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{idealni}}(t)$ za trajektoriji, ki zvezno sledita soncu in izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{stopnični}}(t)$ za trajektoriji, ki urno sledita soncu. Primerjava je narejena za pomladno enakonočje.

Iz slike 5.21 je razvidno večje odstopanje med optimalno trenutno močjo sončne elektrarne $P_{\text{optimalni}}(t)$ in trenutno močjo sončne elektrarne pri urnem sledenju sledilnega sistema $P_{\text{stopnični}}(t)$. Sončne elektrarne s sledilnim sistemom pogosto ovrednotimo s primerjavo med fiksnimi sončnimi elektrarnami. V danem primeru smo sledilno sončno elektrarno primerjali tudi s fiksno postavljenno sončno elektrarno na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko. Omenjena sončna elektrarna ima fiksni naklon $\beta = 24^\circ$ in je usmerjena v smeri juga $\alpha_w = 0^\circ$. Inštalirana moč in izkoristek fiksne sončne elektrarne sta enaka kot pri sončni elektrarni s sledilnim sistemom. Tako je na sliki 5.22 prikazana izmerjena P_{fiks}^* in izračunana P_{fiks} trenutna moč fiksne sončne elektrarne, izračunana trenutna moč sončne elektrarne pri sledenju z optimizacijo določenima trajektorijama $P_{\text{optimalni}}(t)$, idealnem sledenju brez izgub sledilnega sistema $P_{\text{idealni}}(t)$ in pri urnem sledenju $P_{\text{stopnični}}(t)$.



Slika 5.22: Primerjava izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{optimalni}}(t)$ za trajektoriji, določeni z optimizacijo, izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{idealni}}(t)$ za trajektoriji, ki zvezno sledita soncu, izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{stopnični}}(t)$ za trajektoriji, ki urno sledita soncu, izračunane moči fiksne sončne elektrarne $P_{\text{fiks}}(t)$ in izmerjene moči fiksne sončne elektrarne $P_{\text{fiks}}^*(t)$. Primerjava je narejena za pomladno enakonočje.

Iz slike 5.22 je razvidno dobro ujemanje med izmerjenimi in izračunanimi vrednostmi trenutne moči fiksne sončne elektrarne. Prav tako vidimo, da se trenutna moč fiksne sončne elektrarne ne približa trenutni moči sledilne sončne elektrarne v okolici poldneva, saj se naklon in orientacija fiksne in sledilne sončne elektrarne v tem primeru ne prekrivata. Če trenutne moči posameznih sončnih elektrarn integriramo po časovnem intervalu od t_1 do t_2 , dobimo proizvedeno električno energijo. Na sliki 5.23 je stolpično prikazana v obravnavanem dnevu proizvedena električna energija posameznih sončnih elektrarn.



Slika 5.23: Primerjava proizvedene električne energije sončne elektrarne E_{idealni} , ki zvezno sledi soncu (stolpec I), proizvedene električne energije $E_{\text{optimalni}}$, ki sledi soncu po trajektorijah, določenih z optimizacijo (stolpec II), proizvedene električne energije sončne elektrarne $E_{\text{stopnični}}$, ki urno sledi soncu in proizvedene električne energije fiksne sončne elektrarne E_{fiks} . Primerjava je narejena za pomladno enakonočje.

Tabela 5.4: Povzetek rezultatov o proizvodnji električne energije sončne elektrarne in električnih izgubah zaradi sledenja za pomladno enakonočje.

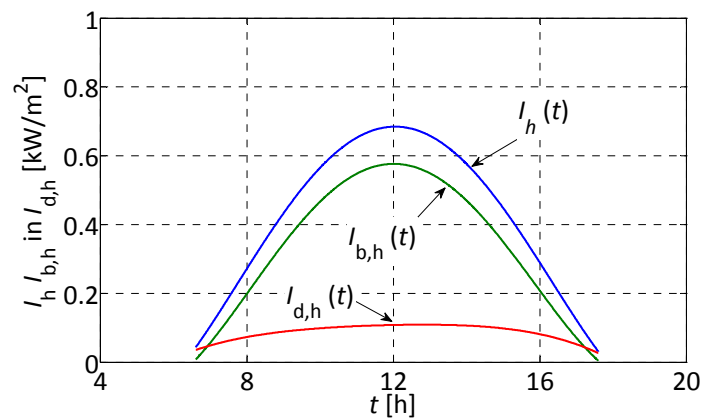
	I	II	III	IV
E_{PT} [kWh]	14,732	14,732	14,591	11,000
E_{PT} [%]	133,9	133,9	132,6	100
E_C [kWh]	0	0,045	0,041	0
$E_{PT} - E_C$ [kWh]	14,732	14,687	14,550	11,000
$E_{PT} - E_C$ [%]	133,9	133,5	132,2	100
ε [kWh]	3,732	3,687	3,550	0

Rezultati, predstavljeni na slikah od 5.17 do 5.23, so povzeti v tabeli 5.4. Pri tem stolpec, označen z I, predstavlja rezultate za sončno elektrarno, ki zvezno sledi soncu, stolpec II predstavlja rezultate, kjer sončna elektrarna sledi soncu po trajektoriji, določeni z optimizacijo, stolpec III predstavlja rezultate, kjer sončna elektrarna urno sledi soncu in stolpec IV predstavlja rezultate fiksno postavljene sončne elektrarne. Pri tem je z E_{PT} označena proizvodnja električne energije sončne elektrarne v [kWh] in [%], E_C označuje porabo električne energije pogonskega sklopa zaradi sledenja. $E_{PT} - E_C$ označuje dejansko proizvedeno električno energijo, kjer upoštevamo električno porabo sledilnega sistema v [kWh] in [%] in ε , ki označuje izkoristek oziroma učinkovitost sledilne sončne elektrarne v [kWh], podan s (5.16).

V tem poglavju je bil predstavljen postopek določitve trajektorij sledilnega sistema za pomladno enakonočje. Iz rezultatov vidimo, da s sledenjem dejansko povečamo izplen proizvedene električne energije. S primerjavo rezultatov optimalnega in urnega sledenja vidimo, da v danem primeru povečanje proizvodnje električne energije ni veliko. Vendar se lahko rezultati bistveno spremenijo za različne tipe in število sončnih modulov kot tudi različnih sistemov in izgub pogonskih sklopov.

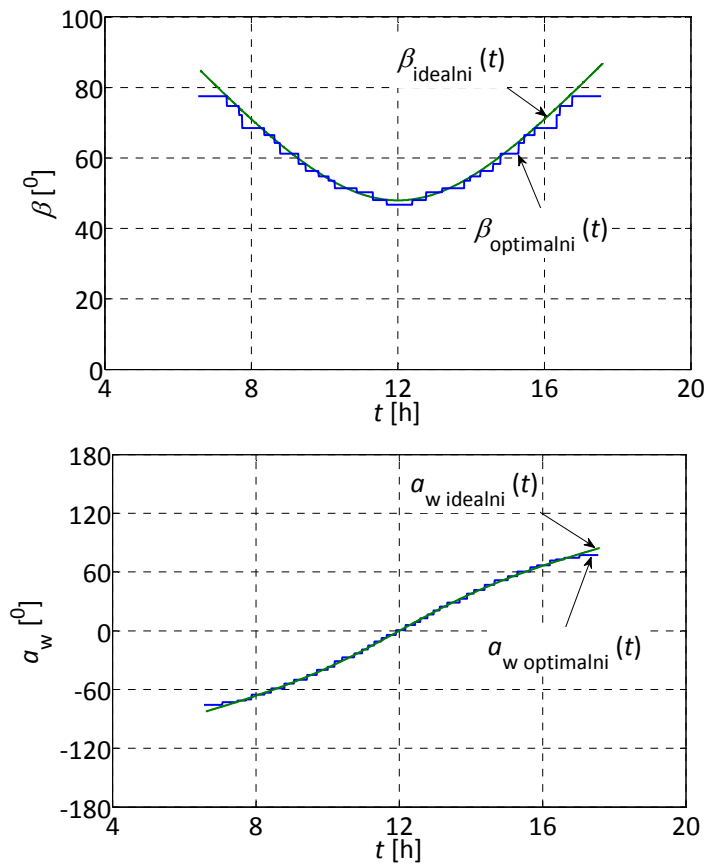
5.2.4 Optimalni trajektoriji sledilnega sistema za jesensko enakonočje

Na enak način, kot smo to naredili za poletni solsticij, zimski solsticij in pomladno enakonočje, pokažimo še izračun optimalnih trajektorij sledilnega sistema za pomladno enakonočje, ki je 267. dan v letu ($n = 267$). Tako kot v prejšnjih primerih, tudi v tem primeru najprej z modelom napovemo sončno sevanje za celotno $I_h(t)$ in difuzno $I_{d,h}(t)$ komponento na vodoravno površino kot funkcijo časa. Direktno sončno sevanje $I_{b,h}(t)$ na vodoravno površino je razlika celotnega in difuznega sončnega sevanja ($I_{b,h}(t) = I_h(t) - I_{d,h}(t)$). Slika 5.24 prikazuje napoved sončnega sevanja v obliki časovno odvisne funkcije za jesensko enakonočje.



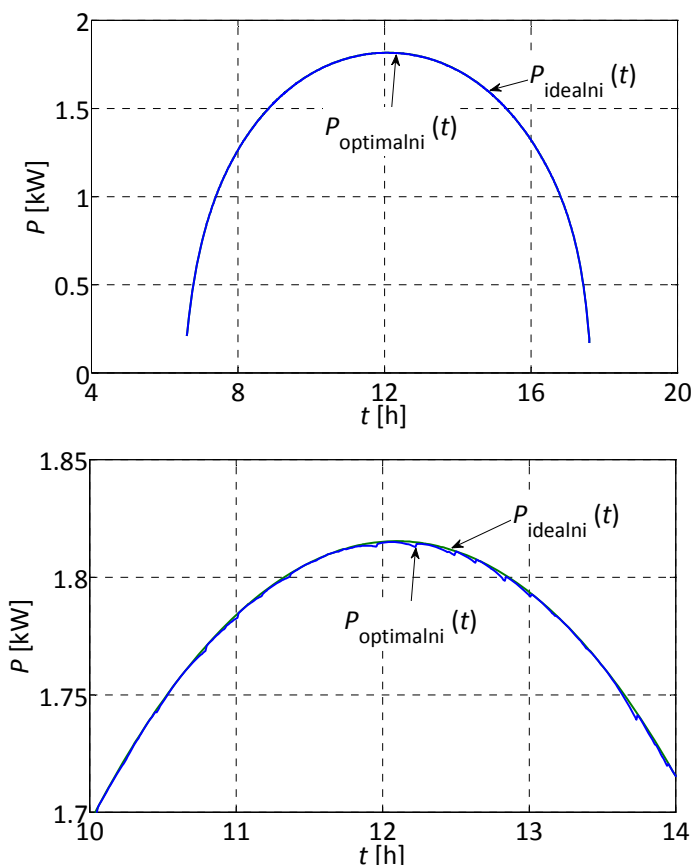
Slika 5.24: Napoved celotnega $I_h(t)$, direktnega $I_{b,h}(t)$ in difuznega $I_{d,h}(t)$ sončnega sevanja na vodoravno površino kot funkcije časa za jesensko enakonočje.

Po postopku, ki je podrobneje opisan v prejšnjem razdelku s pomočjo slike 5.2, sta v danem primeru s pomočjo napovedi sončnega sevanja in optimizacijskega postopka določeni optimalni trajektoriji naklona $\beta(t)$ in azimuta $a_w(t)$. Optimalni trajektoriji, naklon $\beta_{\text{optimalni}}(t)$ in azimut $a_{w\text{optimalni}}(t)$, sta prikazani na sliki 5.25, skupaj z idealnima trajektorijama, naklon $\beta_{\text{idealni}}(t)$ in azimut $a_{w\text{idealni}}(t)$, kjer zvezno sledimo soncu, brez upoštevanja porabe električne energije sledilnega sistema.



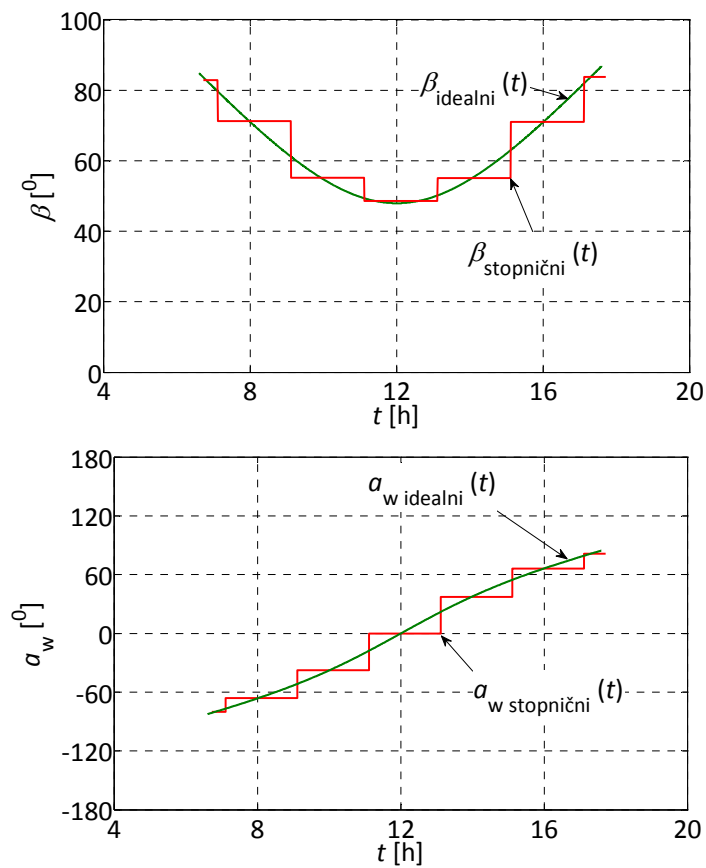
Slika 5.25: Optimalni trajektoriji naklona $\beta_{\text{optimalni}}(t)$ in azimuta $a_{w \text{ optimalni}}(t)$, določeni z DE in trajektoriji naklona $\beta_{\text{idealni}}(t)$ in azimuta $a_{w \text{ idealni}}(t)$ za idealno zvezno sledenje za jesensko enakonočje.

Po končani optimizaciji, za optimalni trajektoriji, naklona $\beta_{\text{optimalni}}(t)$ in azimuta $a_{w \text{ optimalni}}(t)$, določimo moč sončne elektrarne v vsakem trenutku, ki je prikazana na sliki 5.26. Na sliki 5.26 je zraven trenutne moči za optimalni trajektoriji, naklona $\beta_{\text{optimalni}}(t)$ in azimuta $a_{w \text{ optimalni}}(t)$, prikazana tudi trenutna moč $P_{\text{PT ideal}}$, ki bi jo dobili, če bi zvezno sledili trajektoriji, sonca in za sledenje ne bi potrebovali električne energije.



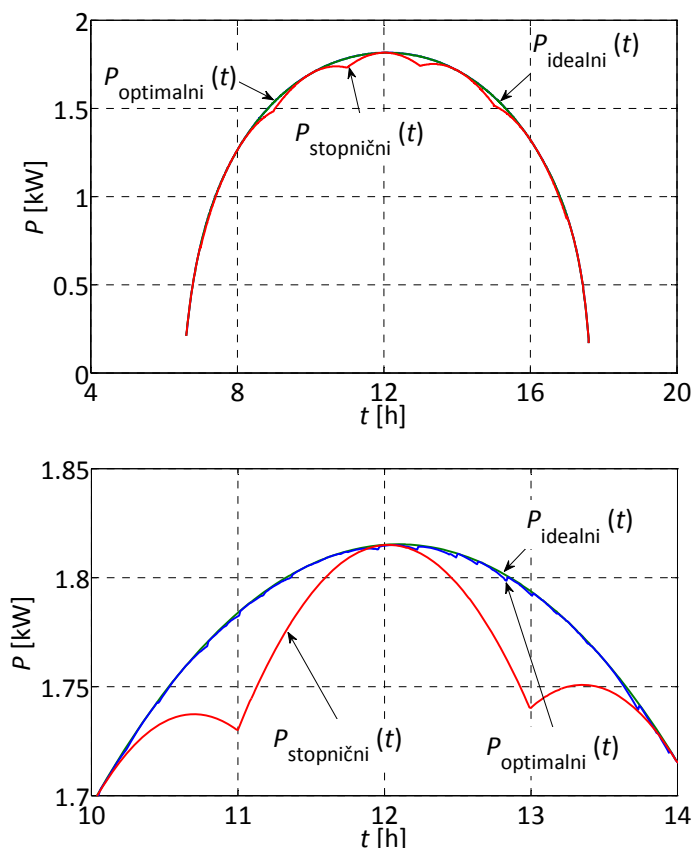
Slika 5.26: Primerjava izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{optimalni}}(t)$ za trajektoriji, določeni z optimizacijo in izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{idealni}}(t)$ za trajektoriji, ki zvezno sledita soncu. Primerjava je narejena za jesensko enakonočje.

Na sliki 5.26 je s $P_{\text{optimalni}}(t)$ označena moč sončne elektrarne, izračunana za trajektoriji, $\beta_{\text{optimalni}}(t)$ in $a_{w\text{ optimalni}}(t)$, določeni z optimizacijo, kjer upoštevamo še izgube oziroma porabo sledilnega sistema. $P_{\text{idealni}}(t)$ označuje moč sončne elektrarne, izračunano za trajektoriji, $\beta_{\text{idealni}}(t)$ in $a_{w\text{ idealni}}(t)$, ki zvezno sledita soncu, pri čemer poraba električne energije za premikanje sledilnega sistema ni upoštevana. Iz slike 5.26 so razvidne majhne razlike med optimalno trenutno močjo $P_{\text{PT optimal}}$ in idealno trenutno močjo $P_{\text{PT ideal}}$. Nadalje lahko optimalni trajektoriji sledilnega sistema in posledično optimalno proizvedeno električno energijo sončne elektrarne primerjamo še s sončno elektrarno, kjer sledilni sistem sledi trajektoriji sonca po urah. To pomeni, da sledilni sistem spreminja naklon $\beta(t)$ in azimut $a_w(t)$ na vsaki dve uri. Trajektoriji naklona $\beta_{\text{stopnični}}(t)$ in azimuta $a_{w\text{ stopnični}}(t)$ sta prikazani na sliki 5.27.



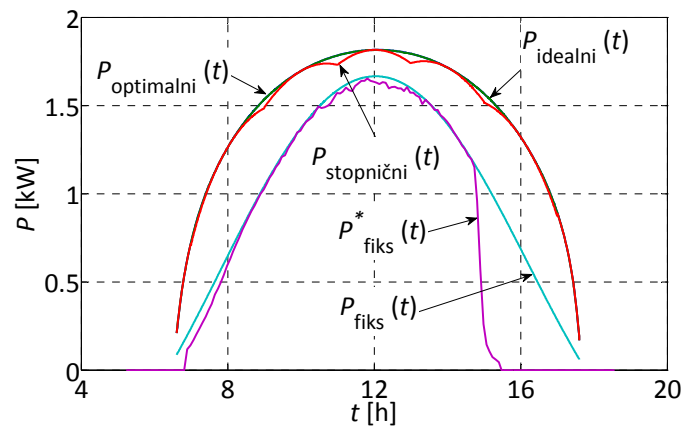
Slika 5.27: Urni trajektoriji naklona $\beta_{\text{stopnični}}(t)$ in azimuta $\alpha_{w \text{ stopnični}}(t)$ in trajektoriji naklona $\beta_{\text{idealni}}(t)$ in azimuta $\alpha_{w \text{ idealni}}(t)$ za idealno zvezno sledenje za jesensko enakonočje.

V primeru, ko sledilni sistem sledi soncu urno, je trenutna moč elektrarne $P_{\text{stopnični}}(t)$ podana na sliki 5.28. Za lažje ovrednotenje je zraven prikazana še trenutna moč sončne elektrarne pri optimalnem sledenju $P_{\text{optimalni}}(t)$ in trenutna moč sončne elektrarne pri idealnem sledenju $P_{\text{idealni}}(t)$.



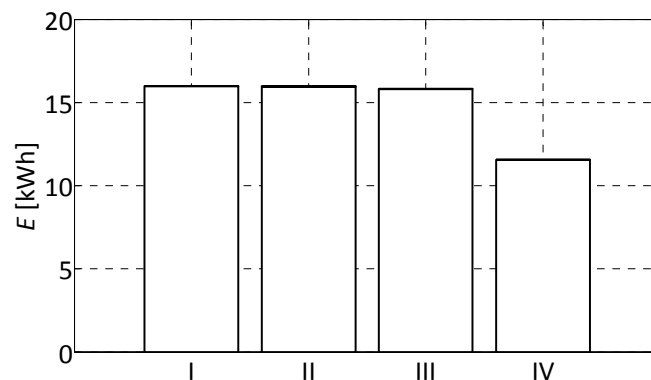
Slika 5.28: Primerjava izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{optimalni}}(t)$ za trajektoriji, določeni z optimizacijo, izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{idealni}}(t)$ za trajektoriji, ki zvezno sledita soncu in izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{stopnični}}(t)$ za trajektoriji, ki urno sledita soncu. Primerjava je narejena za jesensko enakonočje.

Iz slike 5.28 je razvidno večje odstopanje med optimalno trenutno močjo sončne elektrarne $P_{\text{optimalni}}(t)$ in trenutno močjo sončne elektrarne pri urnem sledenju sledilnega sistema $P_{\text{stopnični}}(t)$. Sončne elektrarne s sledilnim sistemom pogosto ovrednotimo s primerjavo med fiksnimi sončnimi elektrarnami. V danem primeru smo sledilno sončno elektrarno primerjali tudi s fiksno postavljeno sončno elektrarno na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko. Omenjena sončna elektrarna ima fiksni naklon $\beta = 24^\circ$ in je usmerjena v smeri juga $\alpha_w = 0^\circ$. Inštalirana moč in izkoristek fiksne sončne elektrarne sta enaka kot pri sončni elektrarni s sledilnim sistemom. Tako je na sliki 5.29 prikazana izmerjena P_{fiks}^* in izračunana P_{fiks} trenutna moč fiksne sončne elektrarne, izračunana trenutna moč sončne elektrarne pri sledenju z optimizacijo določenima trajektorijama $P_{\text{optimalni}}(t)$, pri idealnem sledenju brez izgub sledilnega sistema $P_{\text{idealni}}(t)$ in pri urnem sledenju $P_{\text{stopnični}}(t)$.



Slika 5.29: Primerjava izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{optimalni}}(t)$ za trajektoriji, določeni z optimizacijo, izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{idealni}}(t)$ za trajektoriji, ki zvezno sledita soncu, izračunane moči sončne elektrarne $P_{\text{stopnični}}(t)$ za trajektoriji, ki urno sledita soncu, izračunane moči fiksne sončne elektrarne $P_{\text{fiks}}(t)$ in izmerjene moči fiksne sončne elektrarne $P^*_{\text{fiks}}(t)$. Primerjava je narejena za jesensko enakonočje.

Iz slike 5.29 je razvidno dobro ujemanje med izmerjenimi in izračunanimi vrednostmi trenutne moči fiksne sončne elektrarne. Prav tako vidimo, da se trenutna moč fiksne sončne elektrarne ne približa trenutni moči sledilne sončne elektrarne v okolici poldneva, saj se naklon in orientacija fiksne ter sledilne sončne elektrarne v tem primeru ne približata. Če trenutne moči posameznih sončnih elektrarn integriramo po časovnem intervalu od t_1 do t_2 , dobimo proizvedeno električno energijo. Na sliki 5.30 je stolpično prikazana v obravnavanem dnevu proizvedena električna energija posameznih sončnih elektrarn.



Slika 5.30: Primerjava proizvedene električne energije sončne elektrarne E_{idealni} , ki zvezno sledi soncu (stolpec I), proizvedene električne energije $E_{\text{optimalni}}$, ki sledi soncu po trajektorijah, določenih z optimizacijo (stolpec II), proizvedene električne energije sončne elektrarne $E_{\text{stopnični}}$, ki urno sledi soncu in proizvedene električne energije fiksne sončne elektrarne E_{fiks} . Primerjava je narejena za jesensko enakonočje.

Tabela 5.5: Povzetek rezultatov o proizvodnji električne energije sončne elektrarne in električnih izgubah zaradi sledenja za jesensko enakonočje.

	I	II	III	IV
E_{PT} [kWh]	15,987	15,982	15,833	11,559
E_{PT} [%]	138,3	138,2	136,9	100
E_C [kWh]	0	0,044	0,041	0
$E_{PT} - E_C$ [kWh]	15,987	15,938	15,793	11,559
$E_{PT} - E_C$ [%]	138,3	137,9	136,6	100
ε [kWh]	4,428	4,379	4,234	0

Rezultati, predstavljeni na slikah od 5.24 do 5.30, so povzeti v tabeli 5.5. Pri tem stolpec, označen z I, predstavlja rezultate za sončno elektrarno, ki zvezno sledi soncu, stolpec II predstavlja rezultate, kjer sončna elektrarna sledi soncu po trajektoriji, določeni z optimizacijo, stolpec III predstavlja rezultate, kjer sončna elektrarna urno sledi soncu in stolpec IV predstavlja rezultate fiksno postavljene sončne elektrarne. Pri tem je z E_{PT} označena proizvodnja električne energije sončne elektrarne v [kWh] in [%], E_C označuje porabo električne energije pogonskega sklopa zaradi sledenja. $E_{PT} - E_C$ označuje dejansko proizvedeno električno energijo, kjer upoštevamo električno porabo sledilnega sistema v [kWh] in [%] in ε , ki označuje izkoristek oziroma učinkovitost sledilne sončne elektrarne v [kWh], podan s (5.16).

V tem poglavju je bil predstavljen postopek določitve trajektorij sledilnega sistema za jesensko enakonočje. Iz rezultatov vidimo, da s sledenjem dejansko povečamo izplen proizvedene električne energije. S primerjavo rezultatov optimalnega in urnega sledenja vidimo, da v danem primeru povečanje proizvodnje električne energije ni veliko. Vendar se lahko rezultati bistveno spremenijo za različne tipe in število sončnih modulov kot tudi različne sisteme in izgube pogonskih sklopov.

5.3 Zaključek poglavja

Jedro doktorske disertacije je zbrano v tem poglavju, kjer uporabimo model sledilnega sistema in časovno odvisno napoved gostote sončnega sevanja na poljubno orientirani površini za določitev tistih trajektorij azimuta in naklonskega kota sledilnega sistema, ki ob upoštevanju porabe energije za premikanje sledilnega sistema, omogoča največjo dnevno proizvodnjo električne energije. Trajektorije sledilnega sistema so bile določene z optimizacijo. Pri tem so z uporabo Diferenčne evolucije določene začetne vrednosti za azimut in naklonski kot, hkrati pa so določene tudi vrednosti posameznih sprememb azimuta in naklonskega kota ter časi, v katerih naj te spremembe nastopijo.

6 Sklep

Osnovni namen dela je poiskati optimalne trajektorije sledilnega sistema sončne elektrarne, ki sledi poti sonca in pri tem upoštevati še električne izgube oziroma porabo sistema za sledenje. Sistem za sledenje, za spreminjanje naklona in azimuta, uporablja pogonska sklopa, ki sta porabnika električne energije. Motorja pogonskih sklopov lahko vklapljamemo in izklapljamemo pri čemer imata konstantno hitrost vrtenja. Posledično pogonska sklopa ne omogočata zveznega sledenja soncu. Tako omejitve obravnavanega problema predstavljajo konstantna hitrost premikanja in minimalna sprememba kota premika pogonskih sklopov sledilnega sistema. V doktorski nalogi smo poiskali trajektoriji naklona in azimuta, ki ob navedenih omejitvah omogočata največjo proizvedeno električno energijo iz sončne elektrarne ob razpoložljivem sončnem sevanju.

Pri izračunih in analizi razmer sledenja fotonapetostnega sistema soncu potrebujemo čim bolj natančne vrednosti o razpoložljivi energiji sončnega sevanja v danem trenutku. V ta namen smo izdelali tudi nov model za napoved sončnega sevanja. Da bi bil model čim bolj primeren za našo uporabo, smo ga zapisali v obliki časovno odvisne funkcije. Sončno sevanje v obliki časovno odvisne funkcije smo uporabili v optimizacijskem modelu za določitev optimalnih trajektorij sledilnega sistema. V sami optimizaciji smo upoštevali tudi električne izgube oziroma porabo, ki nastanejo pri posameznih spremembah naklona in azimuta. Optimalno sledenje fotonapetostnega sistema soncu ob upoštevanju izgub pogonskega sklopa smo določili z optimizacijskim algoritmom, imenovanim Diferenčna evolucija. Uporabe Diferenčne evolucije za iskanje optimalnih trajektorij sledilnega sistema v literaturi ni mogoče zaslediti, tako da je v tem delu za ta namen uporabljena prvič.

V tem delu so predstavljeni naslednji izvirni znanstveni prispevki:

- model za napoved gostote moči sončnega sevanja v poljubni točki na površini Zemlje, pri čemer sta gostoti moči celotnega in razpršenega sevanja predstavljeni kot funkciji dolžine poti sončnih žarkov skozi atmosfero;
- aproksimaciji faktorjev prepustnosti ozračja z eksponentnima funkcijama in določitev parametrov aproksimacijskih funkcij na osnovi rezultatov večletnih meritev;
- model za časovno odvisno napoved gostote moči sončnega sevanja na poljubno orientirani površini;

- na meritvah temelječ dinamični model sledilnega sistema in model za izračun porabe energije v sledilnem sistemu;
- na Diferenčni evoluciji temelječ postopek za določitev optimalnih trajektorij naklonskega kota in azimuta, ki ob upoštevanju porabe energije v sistemu sledenja omogoča največjo dnevno proizvodnjo električne energije.

Na tem mestu želimo poudariti, da je model za določitev optimalnih trajektorij sledilnega sistema mogoče uporabiti za ovrednotenje proizvedene električne energije sončne elektrarne. Model je zasnovan tako, da kot vhodni podatek potrebujemo le željeni dan. Po postopkih, ki so opisani v tej nalogi, lahko nato določimo trajektorije sledilnega sistema ter izračunamo trenutno moč in proizvedeno električno energijo sončne elektrarne.

Uporabi Diferenčne evolucije v modelu za določitev trajektorij sledilnega sistema smo namenili posebno pozornost, saj smo hoteli model zapisati tako, da ga bo mogoče uporabiti za različne modele sledilnih sistemov in tudi za različno konfiguracijo sončnih modulov s pripadajočo opremo.

Literatura

- [1] J. Tabak, "Solar and Geothermal Energy (Energy and the Environment)", Infobase Publishing, 2009.
- [2] Global Market Outlook for Photovoltaic Until 2014, *European Photovoltaic Industry Association (EPIA)*, www.epia.org, May, 2010.
- [3] D. Kastelec, J. Rakovec, K. Zakšek, "Sončna energija v Sloveniji", ZRC SAZU, Ljubljana, 2007.
- [4] Ångström, "Solar and terrestrial radiation", *Quart J Roy Met Soc*, 50, 121-5, 1924.
- [5] Y. H. Liu, R. C. Jordan, "Daily insolation on surfaces tilted towards the equator", *Trans ASHRAE*, 526-41, 1962.
- [6] P. S. Koronakis, "On the choice of the angle of tilt for south facing solar collectors in the Athens basin area", *Solar Energy*, 36 (3), p 217-225, 1986.
- [7] J. I. Jimenez, Y. Castro, "National assembly of geophysics and geodesy", 2, p 805, 1986.
- [8] F. H. Al-Sadah, F. M. Ragab, M. K. Arshad, "Hourly solar radiation over Bahrain", *Energy*, 15 (5), p 395-402, 1990.
- [9] M. Iqbal, "An introduction to solar radiation", *Canada: Academic Press*, 1983.
- [10] R. C. Temps, K. L. Coulson, "Solar radiation incident upon slopes of different orientation", *Solar Energy*, 19 (2), p 179-184, 1977.
- [11] J. W. Bugler, "The determination of hourly insolation on an inclined plane using a diffuse irradiance model based on hourly measured global horizontal insolation", *Solar Energy*, 19 (6), p 477-491, 1977.
- [12] T. M. Klucher, "Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces", *Solar Energy*, 23 (2), p 111-114, 1979.
- [13] J. E. Hay, "Study of shortwave radiation on non-horizontal surfaces", *Atmospheric Environment Service, Downsview, Ontario, Canada*, Rep. 79-12, 1979.
- [14] C. J. Willmott, "On the climatic optimization of the tilt and azimuth of flat-plate solar collectors", *Solar Energy*, 28 (3), p 205-216, 1982.
- [15] H. Ogelman, A. Ecevit, E. Tasdemiroglu, "A new method for estimating solar radiation from bright sunshine data", *Solar Energy*, 33, p 619-625, 1984.

- [16] V. Bahel, H. Bakhsh, R. Srinivasan, "A correlation for estimation of global solar radiation", *Energy*, 12 (2), p 131–135, 1987.
- [17] C. C. Y. Ma, M. Iqbal, "Statistical comparison of models for estimating solar radiation on inclined surfaces", *Solar Energy*, 31 (3), p 313–317, 1983.
- [18] Skartveit, J. A. Olseth, "Modeling slope irradiance at high latitudes", *Solar Energy*, 36 (4), p 333–344, 1986.
- [19] D. T. Reindl, W. A. Beckman, J. A. Duffie, "Evaluation of hourly tilted surface radiation models", *Solar Energy*, 45 (1), p 9–17, 1990.
- [20] T. Muneer, "Solar radiation modelling for the United Kingdom", *PhD thesis*, CNAA, London, 1987.
- [21] W. E. Alnaser, "New model to estimate the solar global irradiation using astronomical and meteorological parameters", *Renewable Energy*, 3, p 175–177, 1993.
- [22] A. Raja. "Insolation sunshine relation with site elevation and latitude", *Solar Energy*, 53, p 53–56, 1994.
- [23] T. Muneer, "Solar radiation model for Europe", *Building Services Eng Res Technol*, 11 (4), p 153–163, 1990.
- [24] R. Perez, R. Stewart, R. Arbogast, J. Seals, J. Scott, "An anisotropic hourly diffuse radiation model for surfaces: description, performance validation, site dependency evaluation", *Solar Energy*, 36 (6), p 481–497, 1986.
- [25] R. Perez, R. Seals, P. Ineichen, R. Stewart, D. Menicucci, "A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces", *Solar Energy*, 39 (3), p 221–231, 1987.
- [26] R. Perez, P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky, R. Stewart, "Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance", *Solar Energy*, 44 (5), p 271–289, 1990.
- [27] J. C. Ododo, A. T. Sulaiman, J. Aidan, M. M. Yuguda, F. A. Ogbu, "The importance of maximum air temperature in the parameterisation of solar radiation in Nigeria", *Renewable Energy*, 6, p 751–763, 1995.
- [28] Supit, R. R. V. Kappel, "A simple method to estimate global radiation". *Solar Energy*, 63, p 147–160, 1998.
- [29] T. Togrul, E. Onat, "A study for estimating solar radiation in Elazig using geographical and meteorological data", *Energy Conversion and Management*, 40, 1577–1584, 1999.
- [30] C. Ertekin, O. Yaldiz, "Comparison of some existing models for estimating global solar radiation for Antalya (Turkey)", *Energy Conversion and Management*, 41, p 311–330, 2000.
- [31] Soler, "Dependence on cloudiness of the relation between the ratio of diffuse to global radiation and the ratio of global to extraterrestrial radiation for average daily values", *Solar Energy*, 44, p 179–181, 1990.
- [32] Gueymard, "Radiation on tilted planes: a physical model adaptable to any computational time-step", *Proc INTERSOL85. Elmsford, NY: Pergamon Press* p. 2463–2467, 1986.
- [33] Gueymard, "An anisotropic solar irradiance model for tilted surfaces and its comparison with selected engineering algorithms", *Solar Energy*, 38 (5), p 367–386, 1987.
- [34] M. Chegaar, A. Chibani, "Global solar radiation estimation in Algeria", *Energy Conversion and Management*, 42, p 967–973, 2001.

- [35] J. Almorox, M. Benito, C. Hontoria, "Estimation of monthly Angström–Prescott equation coefficients from measured daily data in Toledo, Spain", *Renewable Energy*, 30, p 931–936, 2005.
- [36] J. Almorox, C. Hontoria, M. Benito, "Statistical validation of day length definitions for estimation of global solar radiation in Toledo, Spain", *Energy Conversion and Management*, 46, p 1465–1471, 2005.
- [37] C. Tiba, R. Aguiar, N. Fraidenraich, "Analysis of a new relationship between monthly global irradiation and sunshine hours from a database of Brazil", *Renewable Energy*, 30, p 957–966, 2005.
- [38] S. Tarhan, A. Sari, "Model selection for global and diffuse radiation over the Central Black Sea (CBS) region of Turkey", *Energy Conversion and Management*, 46, p 605–614, 2005.
- [39] Z. Jin, W. Yezheng, Y. Gang, "General formula for estimation of monthly average daily global solar radiation in China", *Energy Conversion and Management*, 46, p 257–268, 2005.
- [40] M. Collares-Pereira, A. Rabl, "The average distribution of solar radiation correlation between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values" *Solar Energy*, 22, p 155, 1979.
- [41] S. K. Srivastava, O. P. Singh, G. N. Pandey, "Correlations for the estimation of hourly global solar radiation", *Applied Energy*, 52 (1), p 55-64, 1995.
- [42] O. P. Singh, S. K. Srivastava, G. N. Pandey, "Estimation of hourly global solar radiation in the plane areas of Uttar Pradesh, India", *Energy Conversion and Management*, 38 (8), p 779-785, 1997.
- [43] S. K. Srivastava, A. Gaur, O. P. Singh, R. N. Tiwari, "Comparison of methods for estimating daily and hourly diffuse solar radiation", *Applied Energy*, 51 (2), p 119-123, 1995.
- [44] R. Chen, E. Kang, X. Ji, Y. Jianping, J. Wang, "An hourly solar radiation model under actual weather and terrain conditions: A case study in Heihe river basin", *Energy*, 32, p 1148-1157, 2007.
- [45] K. Yang, T. Koike, "Estimating surface solar radiation from upper-air humidity", *Solar Energy*, 72, p 177-186, 2002.
- [46] S. Seme, G. Štumberger, J. Pihler, "Predicting daily distribution of solar irradiation by neural networks" *International conference on renewable energies and power quality (ICREPQ)*, 2009
- [47] Sözen, E. Arcakliqlu, M. Özalp, N. Çağlar, "Forecasting based on neural network approach of solar potential in Turkey", *Renewable Energy*, 30, p 1075-1090, 2005.
- [48] H. K. Elminir, F. F. Areed, T. S. Elsayed, "Estimation of solar radiation components incident on Helwan site using neural networks", *Solar Energy*, 79, p 270-279, 2005.
- [49] J. Cao, X. Lin, "Study of hourly and daily solar irradiation forecast using diagonal recurrent wavelet neural networks", *Energy Conversion and Management*, 49, p 1396-1406, 2008.
- [50] J. C. Lam, K. K. W. Wan, L. Yang, "Solar radiation modelling using ANNs for different climates in China", *Energy Conversion and Management*, 49, p 1080-1090, 2008.

- [51] M. W. Gardner, S. R. Dorling, "Artificial neural networks (the multilayer perceptron) – a review of applications in the atmospheric sciences", *Atmospheric Environment*, 32 (14), p 2627-2636, 1998.
- [52] S. M. Al-Alawi, H. A. Al-Hinai, "An ANN based approach for predicting global radiation in locations with no direct measurement instrumentation", *Renewable Energy*, 14, p 199-204, 1998.
- [53] D. G. Erbs, S. A. Klein, J. A. Duffie, "Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly average global radiation", *Solar Energy*, 28, p 293, 1982.
- [54] Goetzberger, J. Knobloch, B. Voss, "Crystalline Silicon Solar Cells", John Wiley & Sons Ltd, 1998.
- [55] J. Nijs, S. Sivoththaman, J. Szlufcik, K. De Clercq, F. Duerinckx, E. VaN Kerschaever, R. Einhaus, J. Poortmans, T. Vermeulen, R. Mertens, "Overview of solar cell technologies and results on high efficiency multicrystalline silicon substrates", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 48, p 199-217, 1997.
- [56] M. K. El-Adawi, I. A. Al-Nuaim, "The temperature functional dependence of VOC for a solar cell in relation to its efficiency new approach", *Desalination*, 209, p 91-96, 2007.
- [57] P. Singh, S. N. Singh, M. Lal, M. Husain, "Temperature dependence of I-V characteristics and performance parameters of silicon solar cell," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92, p 1611-1616, 2008.
- [58] Pandey, N. Dasgupta, A. K. Mukerjee, "A simple single-sensor MPPT solution", *IEEE Transaction on Power Electronics*, 22 (2), p 698-700, 2007.
- [59] G. de Cesare, D. Caputo, A. Nascetti, "Maximum power point tracker for portable photovoltaic systems with resistive-like load", *Solar energy*, 80, p 982-988, 2006.
- [60] J. W. Kimball P. T. Krein, "Discrete-time ripple correlation control for maximum power point tracking", *IEEE Transaction on Power Electronics*, 23 (5), p 2353-2362, 2008.
- [61] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, E. R. Filho, "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays", *IEEE Transaction on Power Electronics*, 24 (5), p 1198-1208, 2009.
- [62] T. Kerekes, R. Teodorescu, M. Liserre, C. Klumpner, M. Sumner, "Evaluation of Three-Phase Transformerless Photovoltaic Inverter Topologies", *IEEE Transaction on Power Electronics*, 24 (9), p 2202-2211, 2009.
- [63] J.-M. Kwon, B.-H. Kwon, K.-H. Nam, "Three-Phase Photovoltaic System With Three-Level Boosting MPPT Control", *IEEE Transaction on Power Electronics*, 23 (5), p 2319-2327, 2008.
- [64] R.-Y. Kim, J.-S. Lai, "A Seamless Mode Transfer Maximum Power Point Tracking Controller For Thermoelectric Generator Applications", *IEEE Transaction on Power Electronics*, 23 (5), p 2310-2318, 2008.
- [65] Q. Li, P. Wolfs, "A Review of the Single Phase Photovoltaic Module Integrated Converter Topologies With Three Different DC Link Configurations", *IEEE Transaction on Power Electronics*, 23 (3), p 1320-1333, 2008.
- [66] Sefa, M. Demirtas, I. Colak, "Application of one-axis sun tracking system", *Energy Conversion and Management*, 50 (11), p 2709-2718, 2009.

- [67] S. Abdallah, O. O. Badran, "Sun tracking system for productivity enhancement of solar still", *Desalination*, 220 (1-3), p 669-676, 2008.
- [68] R. A. Beg, M. R. I. Sarker, R. Parvez, "An Experimental Investigation on Photovoltaic Power output through Single Axis Automatic controlled sun tracker", *Proceedings of the 4th BSME-ASME*, 2008.
- [69] B. J. Huang, F. S. Sun, "Feasibility study of one axis three positions tracking solar PV with low concentration ratio reflector", *Energy Conversion and Management*, 48 (4), p 1273-1280, 2007.
- [70] K. K. Chong, C. W. Wong, "General formula for on-axis sun-tracking system and its application in improving tracking accuracy of solar collector", *Solar Energy*, 83, p 298-305, 2009.
- [71] B. J. Huang, F. S. Sun, "Feasibility of one axis three positions tracking solar PV with low concentration ration reflector", *Energy Conversion and Management*, 48, p 1273-1280, 2007.
- [72] T. Huld, M. Šuri, T. Cebecauer, E. Dunlop, "Optimal mounting strategy for single-axis tracking non-concentrating PV in Europe", *23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2008.
- [73] T. Huld, T. Cebecauer, M. Šuri, E. Dunlop, "An analysis of one-axis tracking strategies for PV systems in Europe", *Progress in Photovoltaics*, 18 (3), p 183-194, 2010.
- [74] P. Roth, A. Georgiev and H. Boudinov, "Cheap two axis sun following device", *Energy Conversion and Management*, 46 (7-8), p 1179-1192, 2005.
- [75] M. Kacira, M. Simsek, Y. Babur, S. Demirkol, "Determining optimum tilt angles and orientations of photovoltaic panels in Sanliurfa, Turkey", *Renewable Energy*, 29, p 1265-1275, 2004.
- [76] G. C. Bakos, "Design and construction of a two-axis Sun tracking system for parabolic trough collector (PTC) efficiency improvement", *Renewable Energy*, 31, p 2411-2421, 2006.
- [77] S. Abdallah, S. Nijmeh, "Two axes sun tracking system with PLC control," *Energy Conversion and Management*, 45 (11-12), p 1931-1939, 2004.
- [78] M. Serhan, L. El-Chaar, "Two axes sun tracking system : comparison with a fixed system", *International conference on renewable energies and power quality (ICREPQ)*, 2010.
- [79] F. Duarte, P. D. Gaspar, L. C. Goncalves, "Two axis solar tracker based on solar maps, controlled by a low-poer microcontroller", *International conference on renewable energies and power quality (ICREPQ)*, 2010.
- [80] A.-J. N. Khalifa, S. S. Al-Mutawalli, "Effect of two-axis sun tracking on the performance of compound parabolic concentrators", *Energy Conversion and Management*, 39 (10), p 1073-1079, 1998.
- [81] Z. M. Zhao, X. Y. Yuan, Y. Guo, F. Xu, Z. G. Li, "Modelling and simulation of a two-axis tracking system", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 224 (2), p 125-137, 2010.
- [82] M. R. I. Sarker, Md. R. Pervez, R. A. Beg, "Design, Fabrication and Experimental study of a Novel Two-Axis Sun Tracker", *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, 10 (1), 2010.

- [83] M. Guo, Z. Wang, W. Liang, X. Zhang, C. Zang, Z. Lu, X. Wei, "Tracking formulas and strategies for a receiver oriented dual-axis tracking toroidal heliostat", *Solar Energy*, 84, p 939-947, 2010.
- [84] Kh. S. Karimov, M. A. Saqib, P. Akhter, M.M. Ahmed, J. A. Chattha, S. A. Yousafzai, "A simple photo-voltaic tracking system", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 87, p 49-59, 2005.
- [85] T. T. N. Khatib, A. Mohamed, R. J. Khan, N. Amin, "A novel active sun tracking controller for photovoltaic panels", *Journal of Applied Sciences*, 9 (22), p 4050-4055, 2009.
- [86] F. R. Rubio, M. G. Ortega, F. Gordillo, M. Lopez-Martinez, "Application of new control strategy for sun tracking", *Energy Conversion and Management*, 48 (7), p 2174-2184, 2007.
- [87] Visa, D. V. Diaconescu, A. Duta, V. Popa, "PV tracking data needed in the optimal design of the azimuthal tracker's control program", *11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, p 449-54, 2008.
- [88] D. V. Diaconescu, I. Visa, B. G. Burduhos, R. Saulescu, "PV orientation data needed in the design of the pseudo-equatorial tracker's control program", *11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, p 455-60, 2008.
- [89] Visa, D. Diaconescu, V. Popa, "On the dependence between the step orientation and the received direct solar radiance of a PV panel. Part I: the step azimuthal orientation", *International conference on renewable energies and power quality (ICREPQ)*, 2008.
- [90] D. Diaconescu, I. Visa, B. Burduhos, R. Saulescu, "On the dependence between the step orientation and the received direct solar radiance of a PV panel. Part II: the pseudo-equatorial orientation", *International conference on renewable energies and power quality (ICREPQ)*, 2008.
- [91] C. Alexandru, C. Pozna, "Different tracking strategies for optimizing the energetic efficiency of a photovoltaic system", *IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics*, 3, p 434-439, 2008.
- [92] C. Alexandru and C. Pozna, "Simulation of a dual-axis solar tracker for improving the performance of a photovoltaic panel", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 224 (6), 2010.
- [93] C. Alexandru, "The design and optimization of a photovoltaic tracking mechanism", *2nd International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives Proceedings*, 2009.
- [94] C. Alexandru, C. Pozna, "Virtual prototype of a dual-axis tracking system used for photovoltaic panels", *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, p 1598-1603, 2008.
- [95] C. Alexandru, M. Comsit, P. Alexandru, "Dynamic optimization of a 2-DOF pseudo-equatorial tracking in virtual prototyping concept", *International conference on renewable energies and power quality (ICREPQ)*, 2008.
- [96] C. Alexandru, C. Pozna, "The optimization of the tracking mechanism used for a group of PV panels", *International conference on renewable energies and power quality (ICREPQ)*, 2009.

- [97] C. Alexandru, M. Comsit, "The energy balance of the photovoltaic tracking systems using virtual prototyping platform", *5th International Conference on the European Electricity Market (EEM)*, p 1-6, 2008.
- [98] C. Alexandru, "Software platform for Analyzing and Optimizing the Mechanical System", *SYROM*, 2009.
- [99] C. Alexandru, M. Comsit, "Virtual prototyping of the solar tracking systems", *International conference on renewable energies and power quality (ICREPO)*, 2007.
- [100] C. Alexandru, "Aspects regarding the mechatronic tracking systems used for improving the photovoltaic conversion", *Fascicle of Management and Technological Engineering*, 7, 2008.
- [101] M. Comsit, I. Visa, "Design of the linkages type tracking mechanisms of the solar energy conversion systems by using Multi Body Systems Method", *12th IFToMM World Congress*, 2007
- [102] K. V. Price, R. M. Storn, J. A. Lampinen, "Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization (Natural Computing Series)", *Springer*, 2005.
- [103] T. Marčič, "Načrtovanje in analiza trifaznih in enofaznih sinhronskih motorjev s potopljenimi trajnimi magneti in kratkostično kletko", *doktorska disertacija*, 2008
- [104] G. Štumberger, D. Dolinar, U. Pahner, K. Hameyer, "Optimization of Radial Active Magnetic Bearings Using the Finite Element Technique and the Differential Evolution Algorithm", *IEEE Transactions on magnetics*, 36 (4), 2000.
- [105] G. Štumberger, S. Seme, B. Štumberger, B. Polajžer, D. Dolinar, "Determining Magnetically Nonlinear Characteristics of Transformers and Iron Core Inductors by Differential Evolution", *IEEE Transactions on magnetics*, 44 (6), 2008.
- [106] Glotić, J. Pihler, J. Ribič, G. Štumberger, "Determining a Gas-Discharge Arrester Model's Parameters by Measurements and Optimization", *IEEE Transactions on power delivery*, 25 (2), 2010.
- [107] D. Lenardič, "Fotonapetostni sistemi", *Agencija POTI*, 2009.
- [108] U. Eicker, "Solar technologies for buildings", *Wiley*, 2001
- [109] R. Burgers, "New metallisation patterns and analysis of light trapping for silicon solar cells", *Energieonderzoek Centrum Nederland*, 2005.
- [110] Skaale, "The development of a new maximum power point tracker for a very high efficiency, compound curve photovoltaic array for a solar powered vehicle", *Renewable Energy*, 22 (1-3), p 295-302, 2001.
- [111] Hua, J. Lin, "An on-line MPPT algorithm for rapidly changing illuminations of solar arrays", *Renewable Energy*, 28 (7), p 1129-1142, 2003.
- [112] Nafeh Abd El-Shafy, "Evaluation of a proper controller performance for maximum-power point tracking of a stand-alone PV system", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 75 (3-4), p 726-728, 2003.
- [113] M. Milanovič, "Uvod v močnostno elektroniko", *Založniška dejavnost FERl - učbenik*, 1997.
- [114] D. Dolinar, G. Štumberger, "Modeliranje in vodenje elektromehanskih sistemov", *Založniška dejavnost FERl - učbenik*, 2004.

- [115] K. Brecl, J. Krč, A. Likovič, F. Nemas, U. Opara-Krašovec, F. Smole, G. Škarja, M. Topič, M. Vukadinovič, "SOLTRAIN", *slovenski priročnik*, 2004.
- [116] U. Eicker, "Solar Technologies for buildings", *John Wiley & Sons Ltd*, 2003.
- [117] W. Maranda, De M. Gilbert, De V, Alexis, "Optimization of the master-slave inverter system for grid-connected photovoltaic plants", *Energy Conversion and Management*, 39 (12), p 1239-1246, 1998.
- [118] J. Voršič, A. Orgulan, "Pretvarjanje v električno energijo", *Tiskarna tehniških fakultet FERJ*, 1996.
- [119] M. Kleemann, M. Meliβ, "Regenerative Energiequellen", *Springer-Verlag Berline*, 1988.
- [120] D. Y. Goswami, F. Kreith, J. F. Kreider, "Principles of Solar Engineering", *CRC Press*, 2000.
- [121] W. C. Dickinson, P. N. Cheremisinoff, "Solar Energy Technology Handbook", *Marcel Dekker Inc*, 1977.
- [122] S. Medved, P. Novak, "Varstvo okolja in obnovljivi viri energije", *Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo*, 2000.
- [123] J. Czichos, C. Dick-Pfaff, R. Kayser, J. O. Löffken, D. Marszek, D. Säβe, M. Willemsen, "Vesolje", *Mladinska knjiga*, 2010.
- [124] N. Bronštejn, K. A. Semendjajev, "Matematični priročnik – za inženirje in študente" *Založba življenje in tehnika*, 1967.
- [125] S. Seme, G. Štumberger, J. Voršič, "Napoved porazdelitve oddane moči sončne elektrarne, temelječa na napovedi porazdelitve moči globalnega sončnega sevanja", *Elektrotehniški vestnik*, 75 (5), p 271-276, 2008.
- [126] R. Sorichetti, O. Perpignan, "PV Solar Tracking Systems Analysis", *22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2007.
- [127] M.T.Y. Tadros, "Uses of sunshine duration to estimate the global solar radiation over eight meteorological stations in Egypt", *Renew Energy*, 21, p 231-246, 2000.
- [128] Tiba, R. Aguiar, N. Fraidenraich, "Analysis of new relationship between monthly global irradiation and sunshine hours from a database of Brazil", *Renew Energy*, 30, p 957-966, 2005.
- [129] lanetz, V. Lyubansky, I. Setter, B. Kriheli, E. G. Evseev, A. I. Kudish, "Inter-comparison of different models for estimating clear sky solar global radiation for the Negev region of Israel", *Energy Conversion and Management*, 48, p 259-268, 2007.
- [130] S. M. Robaa, "Validation of the existing models for estimating global solar radiation over Egypt", *Energy Conversion and Management*, 50, p 184-193, 2009.
- [131] Zeroual, M. Ankrim, A. J. Wilkinson, "Stochastic modelling of daily global solar radiation measured in Marrakesh, Morocco", *Renew Energy*, 6 (7), p 787-793, 1995.
- [132] M. Paulescu, Z. Schlett, "Performance assessment of global solar irradiation models under Romanian climate", *Renew Energy*, 29, p 767-777, 2004.

Dodatek A

Obrađivan dvoosni sledilni sistem



Slika A.1: Dvoosni sledilni sistem.

Življenjepis

Osební podatki:

ime in priimek: Sebastijan Seme
rojen: 2. oktober 1981 v Murski Soboti
državljanstvo: slovensko
e-pošta: sebastijan.seme@uni-mb.si

Šolanje:

1988 – 1996: Osnovna šola Radenci, Radenci.
1996 – 2000: Srednja elektro-računalniška šola (SERŠ), Maribor.
2000 – 2004: Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko. Študij na visokošolskem strokovnem študijskem programu Elektrotehnika – smer Močnostna elektrotehnika. Diplomsko delo z naslovom “Določitev parametrov magnetno nelinearnega dinamičnega modela transformatorja” opravil pod mentorstvom prof. dr. Gorazda Štumbergerja.
2004 – 2006: Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko. Študij na univerzitetnem študijskem programu Elektrotehnika – smer Močnostna elektrotehnika. Diplomsko delo z naslovom “Ugotavljanje izvorov upadov napetosti” opravil pod mentorstvom prof. dr. Gorazda Štumbergerja.
2006 do danes: Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko. Vpis na podiplomski študij, v enovit doktorski študijski program Elektrotehnika.

Izobraževanje v tujini:

2006: Trimesečno izobraževanje na Rheinisch-Westfaelische Technische Hochschule Aachen (RWTH – Aachen) – Nemčija v okviru mednarodnega programa Socrates – Erasmus.

Zaposlitev:

2006 do danes: Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko. Delovno mesto: mladi raziskovalec (NR).

Raziskovalna dejavnost:

2006 do danes: Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko. Vključitev v raziskovalno skupino Laboratorija za vodenje elektromehanskih sistemov.

Nagrade in priznanja:

- 2006: Priznanje Univerze v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko za uspešno raziskovalno delo med dodiplomskim študijem na projektu "Ugotavljanje izvorov upadov napetosti" (Maribor, 14. decembra 2006).
- 2007 Priznanje Slovenskega društva elektroenergetikov CIGRE/CIRED za diplomsko nalogo z naslovom "Ugotavljanje izvorov upadov napetosti" (Ljubljana, 30. maj 2007).
- 2008 Nagrada združenja IEEE-IAS za najboljši članek v letu 2008, ki ga podelujeta The industrial and commercial power systems department in power systems engineering committee za članek z naslovom "Generalization of Methods for Voltage Sag Source Detection Using Vector Space Approach", 2008 (Kot soavtor članka: Boštjan Polajžer, Gorazd Štumberger, Sebastijan Seme in Drago Dolinar)
- 2009 Diploma Slovenskega društva elektroenergetikov CIGRE/CIRED za najboljši referat v študijskem komiteju CIRED ŠK-2 z naslovom "Sprememba energije kot kriterij za ugotavljanje izvorov upadov napetosti" (Kranjska Gora, 26. maj 2009).

Objave izvirnih znanstvenih člankov (Cobiss, 13.4.2011):

1. SEME, Sebastijan, ŠTUMBERGER, Gorazd, VORŠIČ, Jože. Napoved porazdelitve oddane moči sončne elektrarne, temelječa na napovedi porazdelitve moči globalnega sončnega sevanja. *Elektroteh. vestn.*, 2008, letn. 75, št. 5, str. 271-276. [COBISS.SI-ID [13038358](#)]
2. ŠTUMBERGER, Gorazd, SEME, Sebastijan, ŠTUMBERGER, Bojan, POLAJŽER, Boštjan, DOLINAR, Drago. Determining magnetically nonlinear characteristics of transformers and iron core inductors by differential evolution. *IEEE trans. magn.*, Jun. 2008, vol. 44, no. 6, str. 1570-1573. <http://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2007.915878>, doi: [10.1109/TMAG.2007.915878](http://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2007.915878). [COBISS.SI-ID [12327446](#)], [JCR, WoS, št. citatov do 6. 4. 2011: 6, brez avtocitatov: 4, normirano št. citatov: 3]
3. POLAJŽER, Boštjan, ŠTUMBERGER, Gorazd, SEME, Sebastijan, DOLINAR, Drago. Detection of voltage sag sources based on instantaneous voltage and current vectors and orthogonal Clarke's transformation. *IET generation, transmission & distribution*. [Print ed.], Mar. 2008, vol. 2, iss. 2, str. 219-226. <http://dx.doi.org/10.1049/iet-gtd:20070114>.

- [COBISS.SI-ID [12231702](#)], [JCR, WoS, št. citatov do 7. 5. 2008: 0, brez avtocitatov: 0, normirano št. citatov: 0]
4. POLAJŽER, Boštjan, ŠTUMBERGER, Gorazd, SEME, Sebastijan, DOLINAR, Drago. Generalization of methods for voltage sag source detection using vector space approach. *IEEE trans. ind. appl.*, Nov./Dec. 2009, vol. 45, no. 6, str. 2152-2161, doi: [10.1109/08IAS.2008.370](#). [COBISS.SI-ID [13688086](#)], [JCR, WoS, št. citatov do 7. 5. 2010: 0, brez avtocitatov: 0, normirano št. citatov: 0]
 5. KNEZ, Matjaž, BAJOR, Péter, SEME, Sebastijan. Green logistics - a solar warehouse concept. *Logistics and sustainable transport*, 01-03-11, vol. 2, iss. 2, 8 str. [http://www.jlst.org/uploads/bajor,%20knez, %20seme_obdelano.pdf](http://www.jlst.org/uploads/bajor,%20knez,%20seme_obdelano.pdf). [COBISS.SI-ID [512293181](#)]
 6. SEME, Sebastijan, ŠTUMBERGER, Gorazd. Comparison of different experimental methods for determining the magnetically nonlinear iron core characteristics of transformers. *Prz. Elektrotech.*, 2011, vol. 87, iss. 3, str. 166-169. [COBISS.SI-ID [14884118](#)], [JCR]
 7. SEME, Sebastijan, ŠTUMBERGER, Gorazd, VORŠIČ, Jože. The optimal tracking strategies for two-axis PV system. *Prz. Elektrotech.*, 2011, vol. 87, iss. 3, str. 170-174. [COBISS.SI-ID [14884886](#)], [JCR]



Univerza v Mariboru

Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko

IZJAVA DOKTORSKEGA KANDIDATA

Podpisani Sebastijan SEME,
vpisna številka 95029532

izjavljam,

da je doktorska disertacija z naslovom OPTIMALNO SLEDENJE FOTONAPETOSTNEGA SISTEMA SONCU OB UPOŠTEVANJU IZGUB POGONSKEGA SKLOPA

- rezultat lastnega raziskovalnega dela,
- da predložena disertacija v celoti ali v delih ni bila predložena za pridobitev kakršnekoli izobrazbe po študijskem programu druge fakultete ali univerze,
- da so rezultati korektno navedeni in
- da nisem kršil-a avtorskih pravic in intelektualne lastnine drugih.

Podpis doktorskega kandidata:

Sebastijan Seme



Univerza v Mariboru

Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko

IZJAVA KANDIDATOVEGA MENTORJA O USTREZNOSTI DOKTORSKE DISERTACIJE

Podpisani red. prof. dr. Gorazd ŠTUMBERGER, mentor doktorskemu kandidatu, izjavljam, da je doktorska disertacija z naslovom

OPTIMALNO SLEDENJE FOTONAPETOSTNEGA SISTEMA SONCU OB

UPOŠTEVANJU IZGUB POGONSKEGA SKLOPA

ki jo je izdelal doktorski kandidat Sebastijan SEME,

v skladu z odobreno temo, Pravilnikom o pripravi in zagovoru doktorske disertacije ter mojimi navodili in predstavlja izviren prispevek k razvoju znanstvene discipline.

Datum in kraj:

20.4.2011

Podpis mentorja:

Gorazd Štumberger



Univerza v Mariboru

Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko

IZJAVA O OBJAVI ELEKTRONSKE VERZIJE DOKTORSKE DISERTACIJE IN OSEBNIH PODATKOV, VEZANIH NA ZAKLJUČEK ŠTUDIJA

Ime in priimek doktoranda: Sebastijan SEME

Vpisna številka: 95029532

Študijski program: Elektrotehnika

Naslov doktorskega dela:

OPTIMALNO SLEDENJE FOTONAPETOSTNEGA SISTEMA SONCU OB

UPOŠTEVANJU IZGUB POGONSKEGA SKLOPA

Mentor: red. prof. dr. Gorazd ŠTUMBERGER

Somentor: red. prof. dr. Jože Voršič

Podpisani soglašam z objavo doktorske disertacije v Digitalni knjižnici Univerze v Mariboru.

Tiskana verzija doktorske disertacije je istovetna elektronski verziji, ki sem jo oddal v Digitalno knjižnico Univerze v Mariboru.

Podpisani hkrati izjavljam, da dovoljujem objavo osebnih podatkov, vezanih na zaključek študija (ime, priimek, leto in kraj rojstva, datum diplomiranja, naslov diplomskega dela) na spletnih straneh in v publikacijah Univerze v Mariboru.

Datum in kraj:

20.4.2011

Podpis doktoranda:

Sebastijan Seme

