

Autonomni sustav za proizvodnju i pohranu električne energije

Pečaver Šošić, Dominik

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:819631>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-16**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Dominik Pečaver Šošić

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**AUTONOMNI SUSTAV ZA PROIZVODNJU I
POHRANU ELEKTRIČNE ENERGIJE**

Mentorica:

Doc. dr. sc. Ankica Kovač, MEng. AE.

Student:

Dominik Pečaver Šošić

Zagreb, 2020.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i korištenjem navedene literature.

Zahvaljujem se docentici Ankici Kovač na ukazanoj pomoći tijekom izrade ovog završnog rada.

Zahvaljujem se svojoj obitelji, pogotovo ocu i baki, na podršci tijekom mog studija.

Dominik Pečaver Šošić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student:

Dominik Pečaver
Šošić

Mat. br.: 0035203577

Naslov rada na

hrvatskom jeziku:

Autonomni sustav za proizvodnju i pohranu električne energije

Naslov rada na

engleskom jeziku:

An autonomous system for the production and storage of electrical energy

Opis zadatka:

Današnji sustavi za proizvodnju električne energije u mikromreži zasnovani su na dizelskim motor-generatorima. Takvi agregati različitih snaga i veličina u radu stvaraju veliku buku i ispuštaju CO₂, NO_x i druge plinove pa su ekološki neprihvatljivi i zavisni od dobave goriva. Tehnički sigurniji i ekološki prihvatljiviji su agregati na sunčevu energiju i s drukčijom energetsom jezgrom od dizelskih motora. Takva jezgra sastoji se od elektrolizatora, spremnika vodika i svežnja gorivnih članaka. Jezgra može biti dimenzionirana za veću ili manju proizvodnju električne energije ovisno o potrebama korisnika. Za potrebe ovoga rada dimenzionirat će se jezgra za manju proizvodnju električne energije.

U radu je potrebno:

1. Definirati ulazne parametre autonomnog sustava koji uključuje proizvodnju i pohranu električne energije za potrebe odabranog kućanstva.
2. Provesti simulaciju prethodno definiranog sustava koji uključuje sunčanu elektranu, vodik kao spremnik energije, te gorivne članke.
3. Na temelju dobivenih rezultata, provesti analizu troška dimenzioniranoga sustava.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

28. studenog 2019.

Datum predaje rada:

1. rok: 21. veljače 2020.
2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.
3. rok: 17. rujna 2020.


Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 24.2. – 28.2.2020.
2. rok (izvanredni): 3.7.2020.
3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadao:


Doc. dr. sc. Ankica Kovač, MEng. AE.

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Igor Balen

Sadržaj

Popis slika	2
Popis tablica	3
Popis oznaka.....	4
Sažetak	6
1. Uvod.....	7
2. Zadatak	8
3. Sustav	9
3.1. Opis komponenti sustava.....	9
3.1.1. Fotonaponski (FN) članak	9
3.1.2. Elektrolizator	11
3.1.3. Kompresor	13
3.1.4. Spremnik vodika.....	14
3.1.5. Svežanj gorivnih članaka.....	16
3.1.6. Trošilo	17
3.2. Modeliranje komponenti sustava.....	18
3.2.1. Model FN članka, modula i polja	18
3.2.2. Model elektrolizatora.....	23
3.2.3. Model spremnika vodika	26
3.2.4. Model kompresora.....	28
3.2.5. Model gorivnog članka i svežnja.....	30
3.2.6. Tijek simulacije	33
4. Rezultati simulacije	35
4.1. FN polje.....	35
4.2. Elektrolizator	37
4.3. Spremnik vodika.....	41
4.4. Kompresor	43
4.5. Svežanj gorivnih članaka.....	43
4.6. Kapaciteti sustava	49
4.7. Analiza troška.....	50
5. Zaključak.....	51
Popis literature.....	52
Dodatak	54

Popis slika

Slika 1. Shema tokova električne energije i vodika u sustavu.....	8
Slika 2. Građa i princip rada FN članka [1].....	9
Slika 3. Raspored FN članaka u modulu (za poli i monokristalne FN module) [4]	10
Slika 4. FN modul na bazi amorfnog silicija [6]	11
Slika 5. Izgled i pincip rada elektrolizatora [7]	12
Slika 6. Primjer klipnog kompresora za vodik [12]	14
Slika 7. Presjek i dijelovi kompozitnog spremnika vodika [14].....	15
Slika 8. Shema rada PEM gorivnog članka [16]	16
Slika 9. Radna područja za različite tipove gorivnih članaka [17].....	17
Slika 10. Primjer komercijalnog rheostata snage 1kW [18].....	17
Slika 11. Shema modela FN članka [19].....	18
Slika 12. U-I karakteristika FN članka i položaj MPP [21].....	19
Slika 13. U-I karakteristike za različita ozračenja i pripadajuće krivulje snage [22]	20
Slika 14. Shema ulaznih i izlaznih veličina za model FN polja	20
Slika 15. Prosječno sunčevo ozračenje za jedan dan u lipnju i prosincu.....	21
Slika 16. Temperatura zraka.....	21
Slika 17. Temperatura FN članaka prilikom rada	22
Slika 18. U-I karakteristika jednog FN članka	23
Slika 19. U-I karakteristika elektrolizatora [27].....	24
Slika 20. U-I karakteristika elektrolizatora za različite temperature [28]	25
Slika 21. Shema ulaznih i izlaznih veličina za model elektrolizatora	25
Slika 22. Shema ulaznih i izlaznih veličina za model spremnika vodika	27
Slika 23. Shema ulaznih i izlaznih podataka za model kompresora.....	29
Slika 24. U-I karakteristika gorivnog članka [30].....	31
Slika 25. Shema ulaznih i izlaznih veličina za model svežnja gorivnih članaka.....	32
Slika 26. Situacije u simulaciji u odnosu na proizvodnju i potrošnju energije.....	34
Slika 27. Izlazna snaga FN polja	35
Slika 28. Struja dobivena iz FN polja.....	36
Slika 29. Napon na elektrolizatoru	37
Slika 30. Struja elektrolizatora	38
Slika 31. Maseni protok proizvedenog vodika na izlazu elektrolizatora.....	39
Slika 32. Masa elektrolizatorom proizvedenog vodika	39
Slika 33. Rezultantni maseni protok vodika kroz spremnik.....	41
Slika 34. Masa vodika u spremniku	42
Slika 35. Stanje tlaka u spremniku vodika	42
Slika 36. Snaga kompresora	43
Slika 37. Napon na svežnju gorivnih članaka	44
Slika 38. Struja iz svežnja gorivnih članaka.....	44
Slika 39. Maseni protok vodika u svežanj gorivnih članaka	45
Slika 40. Masa potrošenog vodika u svežnju gorivnih članaka.....	45
Slika 41. Ponašanje sustava za jedan dan u lipnju.....	47
Slika 42. Ponašanje sustava za jedan dan u prosincu	47
Slika 43. Simulink model FN članka.....	54
Slika 44. Simulink model elektrolizatora	55
Slika 45. Simulink model spremnika vodika.....	56
Slika 46. Simulink model kompresora	57
Slika 47. Simulink model svežnja gorivnih članaka	58

Slika 48. Simulink model cijelog sustava.....	59
---	----

Popis tablica

Tablica 1. Kapaciteti sustava.....	49
Tablica 2. Tablica troškova	50

Popis oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis
A	m ²	površina
A _{EL}	m ²	površina elektroda
A _{FC}	cm ²	aktivna površina elektroda gorivnih članaka
e	C	naboj elektrona
e _{ul,izl}	W	tok energije u/iz sustava
E _{Nernst}	V	teorijski postizivi maksimalan napon gorivnog članka
E	W/m ²	Sunčevo ozračenje
F	C/mol	Faradayeva konstanta
H _g	J/kg	gornja ogrjevna vrijednost vodika
I	A	struja
i	A/cm ²	gustoća električne struje
i ₀	A/cm ²	potrebna gustoća električne struje za početak elektrolize
I _{EL}	A	struja na elektrolizatoru
I _{FC}	A	struja iz svežnja gorivnih članaka
i _L	A/cm ²	granična vrijednost gustoće električne struje
I _{ph}	A	foto struja
I _s	A	struja zasićenja na diodi
I _{sc}	A	struja kratkog spoja FN članka
k	J/K	Boltzmannova konstanta
m	-	faktor idealnosti
m	kg	masa vodika u spremniku
m _{ul,izl}	kg/s	maseni protok vodika u/iz spremnika
n _c	-	broj članaka u elektrolizatoru
n _s	-	broj serijski spojenih FN modula
n _p	-	broj paralelno spojenih FN modula
n _c	mol/s	ulazni tok vodika u kompresor
n _{FC}	-	broj gorivnih članaka u svežnju
p _{H2}	bar	tlak vodika u spremniku
P _{EL}	W	snaga elektrolizatora
P _{FC}	W	snaga svežnja gorivnih članaka
P _{komp}	W	snaga kompresora
P _{FN}	W	snaga FN polja
P _{trošilo}	W	snaga električnog trošila
R	J/kmolK	opća plinska konstanta
R _g	J/kgK	plinska konstanta
R _i	Ωcm ²	ukupni unutarnji otpor gorivnog članka
R _s	Ω	serijski otpor u FN članku
R _{sh}	Ω	paralelni otpor u FN članku
r	Ωm ²	ohmski otpor elektrolita
s	V	koeficijent za prenapon na elektrodama
t	m ² /A	koeficijent za prenapon na elektrodama
T _c	°C	temperatura FN članka
T _e	°C	vanjska temperatura zraka
T _{NOCT}	°C	temperatura FN modula pri normalnim uvjetima rada

U_{EL}	V	radni napon elektrolizatora
U_{rev}	V	reverzibilni napon članka elektrolizatora
V_{akt}	V	pad napona uslijed aktivacije
V_{cell}	V	napon jednog gorivnog članka
V_{FC}	V	radni napon cijelog svežnja gorivnih članaka
V_{konc}	V	pad napona uslijed koncentracijskog gubitka
V_{ohm}	V	pad napona uslijed ohmskih gubitaka
V_{sp}	m^3	volumen spremnika vodika
W_{komp}	J	ukupni obavljeni rad kompresora
$W_{I,II}$	J/mol	specifični radovi kompresora
Z	-	faktor stlačivosti vodika
α	-	koeficijent prijenosa
ρ	kg/m^3	gustoća vodika
η	-	učinkovitost

Sažetak

U ovom radu razrađen je autonomni sustav za proizvodnju i pohranu električne energije. Sunčeva energija se fotonaponskim (FN) modulima pretvara u električnu energiju koja se dalje koristi za pokrivanje potreba trošila. Kada proizvodnja električne energije nadmašuje potrošnju, višak se koristi za pretvorbu preko elektrolizatora u plinoviti vodik, koji se komprimira i pohranjuje u spremnik. U vrijeme nedovoljne proizvodnje električne energije iz FN modula, aktiviraju se gorivni članci koji troše pohranjeni vodik i time stvaraju električnu energiju za pokrivanje potrošnje. U sklopu zadatka izvršilo se odgovarajuće dimenzioniranje sustava. Ponašanje cijelog sustava se simuliralo u računalnom programu MATLAB/Simulink. Simulacija se vršila za dva reprezentativna dana, jedan u lipnju, jedan u prosincu, kako bi se provjerili modeli i utvrdili rasponi snaga u kojem se sustav mora kretati. Nakon dimenzioniranja sustava napravila se analiza troška komponenti sustava.

Model i simulacija mogu poslužiti kao koristan alat za dimenzioniranje budućih autonomnih sustava s drukčijim parametrima.

Ključne riječi: fotonaponski modul, vodik, elektrolizator, gorivni članci, simulacija, električna energija

1. Uvod

U današnje vrijeme suočeni smo sa sve većim i ozbiljnijim problemom globalnog zagrijavanja koje je primarno posljedica ljudskog djelovanja osobito u smislu ispuštanja znatnih količina ugljikovog dioksida (CO_2) u atmosferu. To je najviše uzrokovano izgaranjem fosilnih goriva, koja još uvijek čine većinski udio u primarnoj energiji koju čovjek iskorištava za razne potrebe (promet, dobivanje električne i toplinske energije itd.).

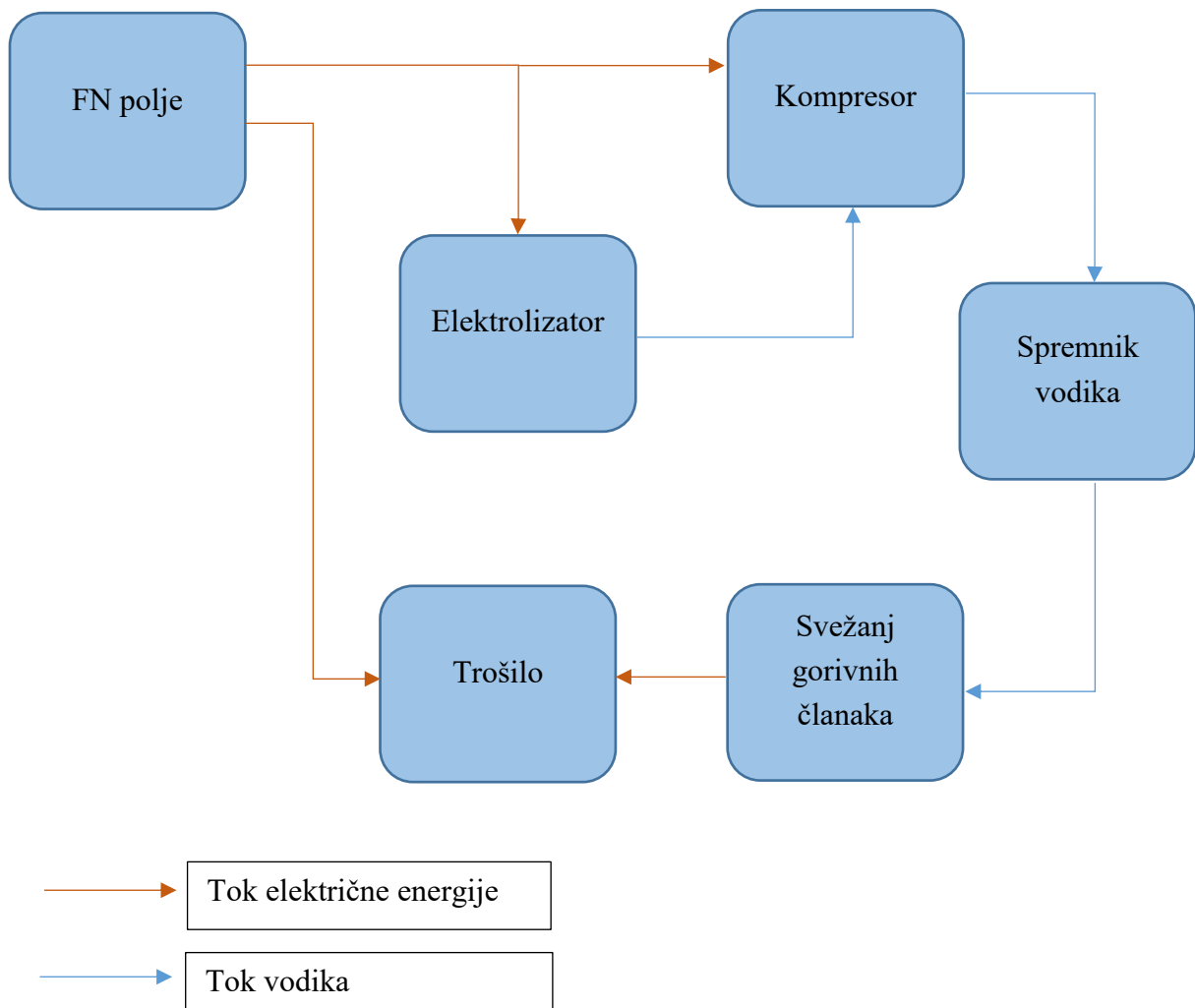
Zato se okreće prema obnovljivim izvorima energije (OIE), koji nude mogućnost dobivanja električne, a i toplinske energije bez ispuštanja štetnih plinova ili stakleničkih plinova poput CO_2 . Iako OIE imaju puno pozitivnih aspekata, jedna od glavnih mana koja im se pripisuje je njihova intermitentnost. To se konkretno odnosi ponajviše na vjetar i sunce. Na vjetar možda u većoj mjeri jer tijekom puhanja vjetra može više varirati iz dana u dan, dok se za sunce može bolje predvidjeti promjena insolacije i zna se kakvog je oblika uprosječni graf sunčeve insolacije, stoga se može i bolje planirati energetska sustav u sklopu kojega bi FN paneli bili integrirani.

Nadalje, u svakom novom sustavu koji planira koristiti OIE ključno je odabrati metodu pohrane energije, kako bi se spremala energija dok je ima u suvišku, i trošila dok OIE ne mogu pokriti potrebe potrošača. Ako se razmatraju metode pohrane električne energije na manjoj skali, trenutno se u svijetu znatno razvijaju baterije i njih se pokušava plasirati kao najpogodnije rješenje za pohranu energije. Jedan od njihovih najvećih nedostataka je korištenje rijetkih (i skupih) i po zdravlje opasnih metala poput kobalta pri izradi baterije. Drugi nedostatak je relativno mala gustoća energije koju mogu sadržavati naspram volumena i mase baterije. Treći je problem odlagališta i reciklaže. Četvrti nedostatak je samopražnjenje, posebno na niskim temperaturama što dovodi u pitanje njihovu pouzdanost.

Zato se kao alternativa javlja vodik kao spremnik energije, koji se može koristiti za dobivanje i električne i toplinske energije. Vodik za razliku od baterija ima puno veću gustoću energije po jedinici mase. Posebna je njegova prednost što njegovim elektrokemijskim izgaranjem ne nastaju štetni staklenički plinovi, naime nastaje voda ili vodena para, ovisno o radnoj temperaturi, ali se vodena para ne smatra štetnim stakleničkim plinom.

2. Zadatak

Cilj ovog zadatka je bio dimenzioniranje autonomnog sustava koji će osiguravati pokrivanje potreba za električnom energijom u iznosu od 1kW konstantno tijekom vremena. Sustav se sastoji od FN polja, elektrolizatora, kompresora, spremnika vodika i svežnja gorivnih članaka. Ideja vodilja je da dok sunce obasjava FN polje dovoljno velikim intenzitetom ono će moći pokrivati potrebe potrošnje električnog trošila (rheostata u ovom slučaju), a višak energije će moći koristiti za pretvorbu električne energije u kemijsku, odnosno u proizvodnju plinovitog vodika koji će se pohranjivati u spremnik. Iz tog spremnika će se vodik uzimati u vrijeme dok sunčevog ozračenja nema ili je ono nedovoljnog intenziteta kako bi se preko gorivnih članaka taj vodik koristio za pretvorbu u električnu energiju i time pokrivala potreba trošila.



Slika 1. Shema tokova električne energije i vodika u sustavu

3. Sustav

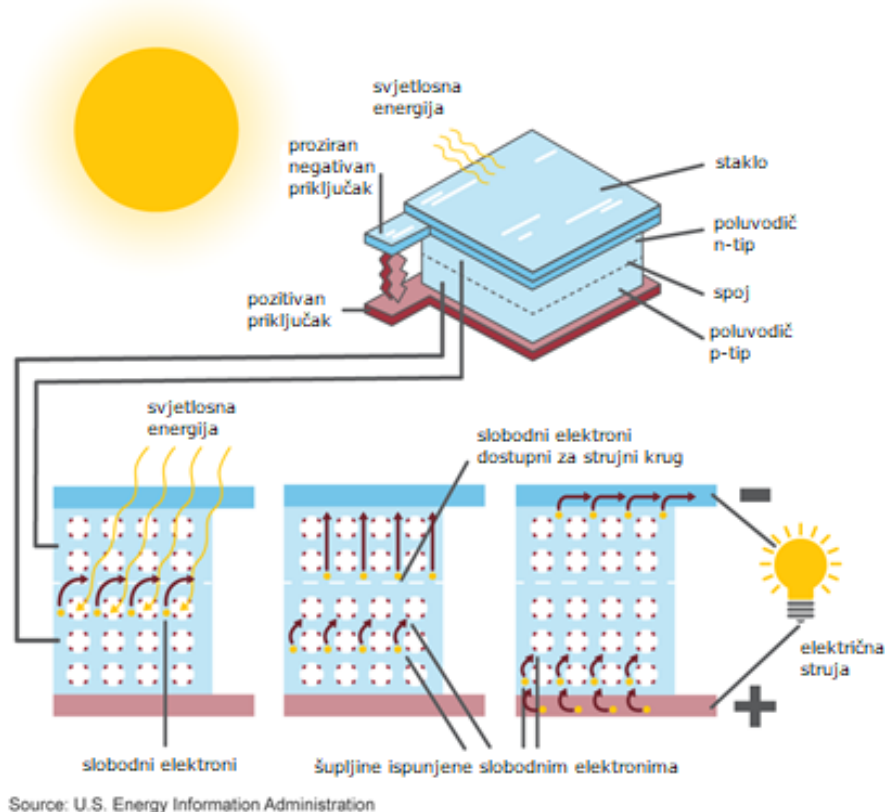
3.1. Opis komponenti sustava

3.1.1. Fotonaponski (FN) članak

FN članak je poluvodički uređaj koji se sastoji od 2 različita sloja silicija; silicija dopiranog fosforom (tip n) i silicija dopiranog borom (tip p). Kod spoja ta 2 sloja dogodit će se difuzija elektrona iz n-područja u p-područje i difuzija šupljina iz p-područja u n-područje ako će članak biti obasjan Sunčevim ozračenjem. Ti parovi elektron-šupljina će uzrokovati razliku potencijala između 2 sloja koja se može iskoristiti za dobivanje električne struje u slučaju da je trošilo spojeno na članak [1].

Dobivena razlika potencijala će ovisiti o intenzitetu Sunčevog ozračenja koje pada na FN članak.

Unutrašnjost fotonaponskog članka



Slika 2. Građa i princip rada FN članka [1]

FN moduli se sastoje od grupe serijski spojenih FN članaka kojih je najčešće 36. Svaki FN članak ima nominalni napon od 0,6 V, što znači da jedna ploča ima nominalni napon od 21 V [2].

Glavna podjela tipova FN članaka je:

1. Polikristalni FN članci,
2. Monokristalni FN članci,
3. Amorfni FN članci (tehnologija tankog filma).

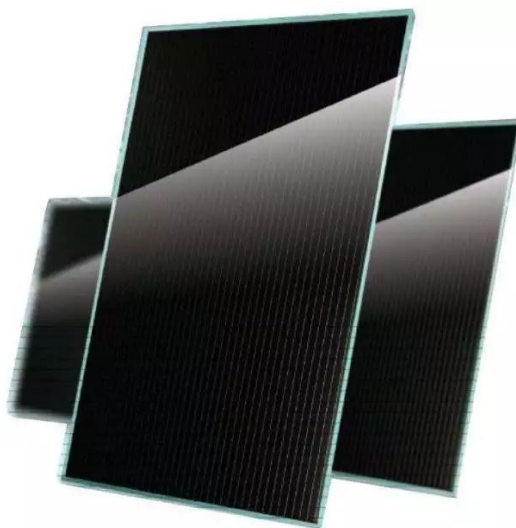
Polikristalni FN članci se sastoje od više kristala silicija između kojih se nalaze određene nesavršenosti što dovodi do niže učinkovitosti pri radu. Učinkovitost im se kreće u rasponu 13% - 16%. Izrađuju se ulijevanjem tekućeg silicija u blokove. Kod skrućivanja pojavljuju se kristalne strukture različitih veličina i na njihovim granicama se pojavljuju nesavršenosti. Ti blokovi se zatim režu u ploče [3].

Monokristalni FN članci se sastoje od jednog i homogenog kristala u čijoj strukturi nema nesavršenosti na granicama zrna. Zbog toga imaju malo višu učinkovitost od polikristalnih FN članaka: 15% – 18%. Njihova proizvodnja je nešto skuplja jer se zahtjeva silicij vrlo visoke čistoće. Monokristalne ploče nastaju iz rezanih monokristalnih štapića koji se izvade iz rastaljenog silicija [3].



Slika 3. Raspored FN članaka u modulu (za poli i monokristalne FN module) [4]

Amorfni FN članci su dio tehnologije tankog filma. Nastaju kemijskim nanošenjem tankog sloja silicija na staklo. Manje su učinkovitosti: 5% - 7%, ali zato imaju drugih prednosti kao što su, npr. manja cijena, manje potrebnog silicija za izradu i mala masa panela [5].



Slika 4. FN modul na bazi amornog silicija [6]

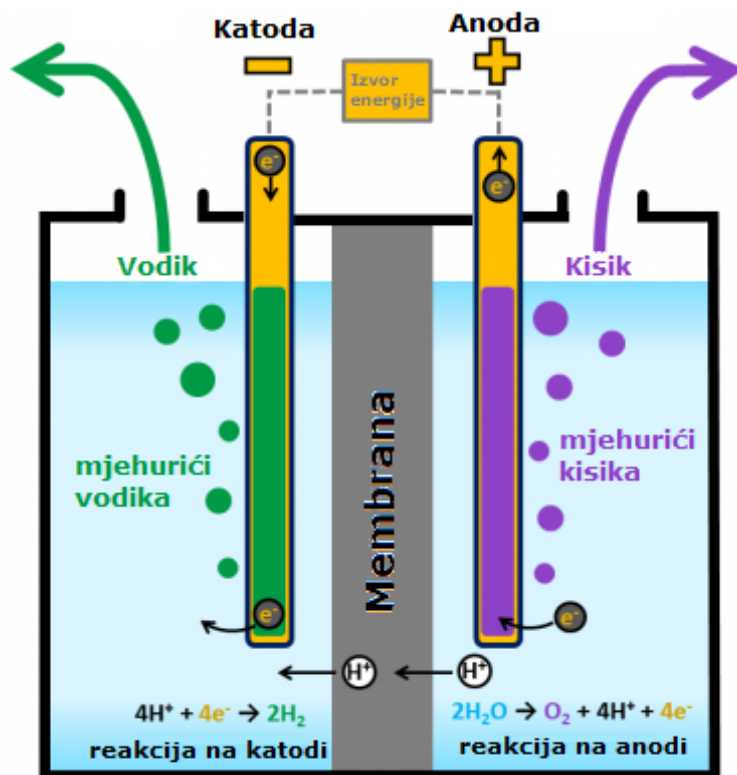
Za ovu simulaciju odabran je FN modul koji koristi amorfni silicij.

3.1.2. Elektrolizator

Elektroliza vode je elektrokemijski proces razlaganja vode na plinoviti vodik i kisik koristeći električnu struju. Laboratorijski izvor napona je spojen na dvije elektrode koje se nalaze uronjene u elektrolit. Na negativno nabijenoj katodi izlučuju se pozitivni vodikovi ioni (H^+), a na pozitivno nabijenoj anodi izlučuju se negativno nabijeni kisikovi ioni (O^-) [7].

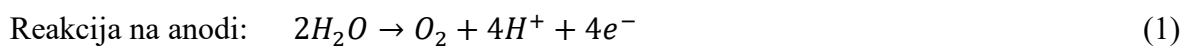
Između elektroda se umeće i membrana koja sprječava miješanje proizvedenih plinova, kratke spojeve između elektroda i omogućava da elektrode budu bliže jedna drugoj.

Kod alkalnog elektrolizatora elektrode se nalaze u vodenoj otopini kalijevog hidroksida (KOH) ili natrijevog hidroksida (NaOH). Učinkovitost takvih elektrolizatora se kreće u rasponu 60% - 80% [8].



Slika 5. Izgled i princip rada elektrolizatora [7]

Rad elektrolizatora je opisan ovim dvjema reakcijama:



Iz jednadžbi se može zaključiti kakvi su molni udjeli potrošene vode i proizvedenog vodika.

Za svaki mol H_2O elektrolizom se dobije jedan mol H_2 . Ako se uzmu u obzir molarne mase sudionika u reakciji:

$$M(\text{H}_2\text{O})=18,015 \text{ g/mol}$$

$$M(\text{H}_2)=2,016 \text{ g/mol}$$

Slijedi da za 1 kg H_2 treba osigurati 8,936 kg H_2O .

Količina dobivenog vodika se može odrediti po prvom Faradayevom zakonu:

$$n = \frac{I \cdot t}{z \cdot F} \quad (3)$$

Pri čemu su:

- I - struja kroz elektrolizator [A]
- $z = 2$ - broj otpuštenih elektrona po molekuli H_2O
- $F = 96485$ - Faradayeva konstanta [C/mol]
- n - količina proizvedenog H_2 [mol]

3.1.3. Kompresor

Kompresor je uređaj koji dovodi plin (u ovom slučaju vodik) na višu energetska razinu, odnosno tlak. Zbog vrlo male gustoće vodika potrebno je isti stlačiti na dovoljno visok tlak kako bi se moglo dovoljno veliku masu vodika pohraniti u spremnik i kako isti ne bi zauzimao prevelike dimenzije.

Neki od tipova mehaničkih kompresora su:

- Klipni kompresor koji pomakom klipa smanjuje volumen zarobljenom vodikom i time povećava tlak. Koristi se za vrlo visoke kompresijske omjere. Mogu dostići tlakove u rasponu 300 – 700 bar [9] [10].
- Rotacijski kompresori rotacijom krila, vijaka ili zupčanika zarobljuje vodik između statora i rotora ili između 2 zupčanika/vijaka. Time se vrši kompresija po sličnom principu kao i kod prethodno spomenutog klipnog kompresora. Problem kod ovakvih kompresora je potreba za preciznim tolerancijama dijelova kako bi se smanjilo neželjeno povratno istjecanje vodika [11].
- Ionski kompresori rade po sličnom principu kao i klipni kompresori samo što umjesto klipa koriste ionsku kapljevinu kao klip. Prednost takvog kompresora je što ima manji broj dijelova od konvencionalnih kompresora, nemaju brtve i ležajeve i imaju manju potrošnju energije [11].
- Centrifugalni kompresori imaju mogućnost rada s velikim protocima vodika i imaju srednji kompresijski omjer. Bitno je reći kako centrifugalni kompresori za vodik moraju raditi s triput većim brzinama vrtnje za istu veličinu rotora kao kod kompresora za

prirodni plin kako bi se postigao isti kompresijski omjer. Razlog tome je mala molarna masa vodika [11].



Slika 6. Primjer klipnog kompresora za vodik [12]

Za potrebe simulacije nije uzet konkretan model kompresora. Njegova značajka je samo da ima učinkovitost od otprilike 80%. No, obzirom da radi s relativno visokim kompresijskim omjerima (do 1:10), bio bi odabran klipni kompresor.

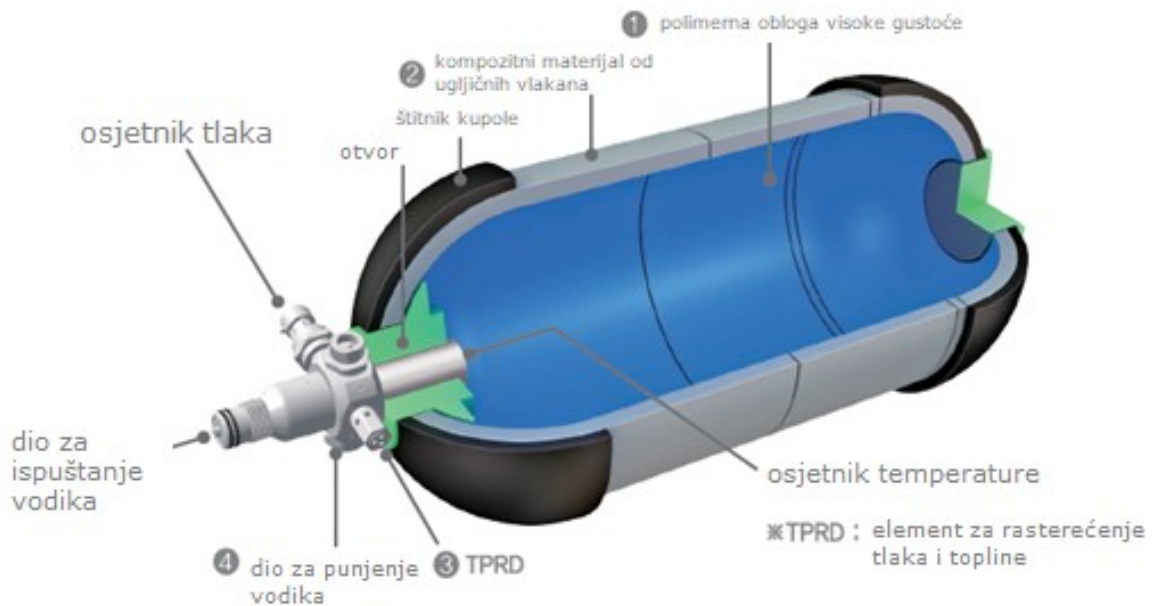
3.1.4. Spremnik vodika

Vodik ima vrlo nisko vrelište (na $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$) što znači da se pri standardnom tlaku i temperaturi nalazi u plinovitom stanju. Vodik je najlakši element u periodnom sustavu elemenata sa gustoćom od samo $0,08988\text{ g/L}$.

Iako je prednost vodika ta da ima vrlo visoku ogrjevnu vrijednost po masi (s gornjom ogrjevnom vrijednosti od $141,7\text{ MJ/kg}$ što je 270% više od gornje ogrjevne vrijednosti prirodnog plina), njegova mana je da ima nisku ogrjevnu vrijednost po volumenu (s gornjom ogrjevnom vrijednosti od $12,7\text{ MJ/m}^3$ što je 31% od gornje ogrjevne vrijednosti prirodnog plina). Ta činjenica otežava odabir idealnog spremnika vodika koji će zadovoljiti kriterije sigurnosti, kompaktnosti i ekonomičnosti [13].

Neki od načina pohrane vodika su:

- Pohrana plinovitog vodika u kompozitnim spremnicima ima prednost jer su spremnici manjih masa, komercijalno su dostupni i normirani što znači da je veća sigurnost takvih spremnika. Jedna važna prednost je da za razliku od drugih metoda pohrane, kod ove metode nije potreban izmjenjivač topline (zato što se plin prije kompresije pothlađuje). Najveći nedostatak ovakvih spremnika je njihova visoka cijena.

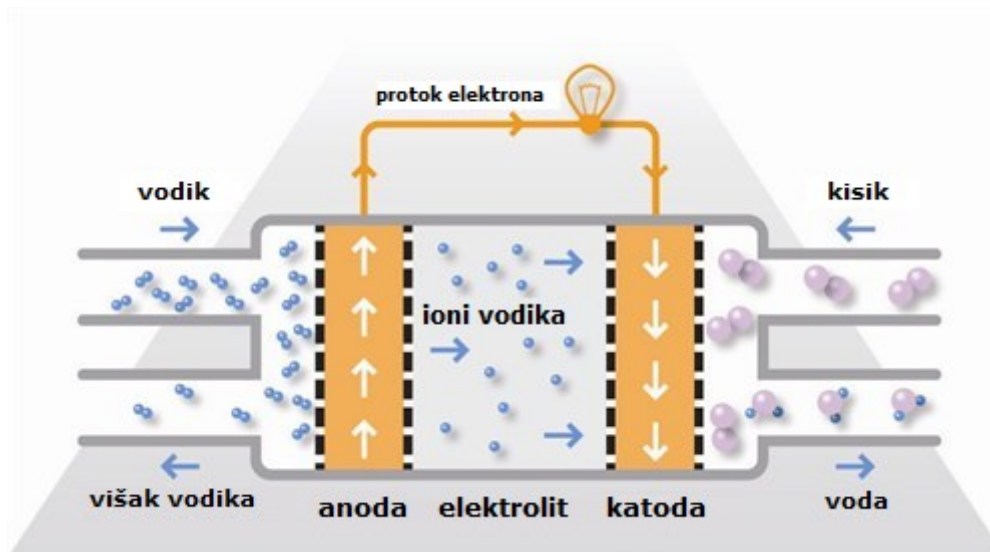


Slika 7. Presjek i dijelovi kompozitnog spremnika vodika [14]

- Pohrana kapljeviteg vodika ima prednost što u određeni volumen spremnika može više stati vodika nego da je taj isti stlačen i u plinovitom stanju. No, mana je ta što se 30 – 40% energije izgubi kad se proizvodi kapljeviti vodik. Nadalje, zbog vrlo niske temperature vodika potrebna je vrlo velika debljina izolacije kako bi se ona održala. Zbog neidealnosti toplinske izolacije stalno otparavanje vodika će uvijek biti prisutno.
- Pohrana krutog vodika u obliku metalnih hidrida (MgH_2 , LiH , $TiFeH_2$) također ima neke prednosti kao što su sigurnost pohrane i dobre radne značajke. Obzirom da spremnik nije pod visokim tlakom smatra se zato sigurnijim. Nedostatak takvog spremnika proizlazi iz činjenice da metalni hidridi tvore čvrste veze s vodikom što znači da su potrebne visoke temperature (120 – 200 °C) da se vodik oslobodi iz spremnika. No, postoje i legure kod kojih su potrebne temperature niže od uobičajenog [15].

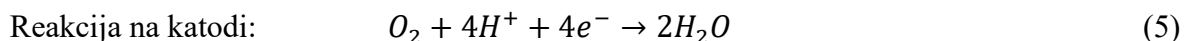
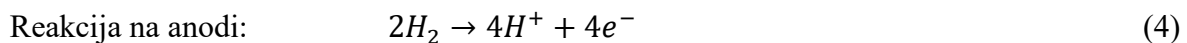
3.1.5. Svežanj gorivnih članaka

Gorivni članci su elektrokemijski uređaji koji služe za pretvorbu kemijske energije (u ovom slučaju pohranjene u plinovitom vodik) u električnu energiju. Gorivni članak sadrži 2 elektrode uronjene u elektrolit. Na anodi se događa oksidacija goriva (vodika), a na katodi se vrši redukcija oksidansa (kisika). Na anodi se stvaraju elektroni i oni prolaskom kroz trošilo dolaze do katode gdje se zbog tih elektrona događa redukcija oksidansa [16].



Slika 8. Shema rada PEM gorivnog članka [16]

Rad gorivnih članaka je opisan ovim dvjema reakcijama:

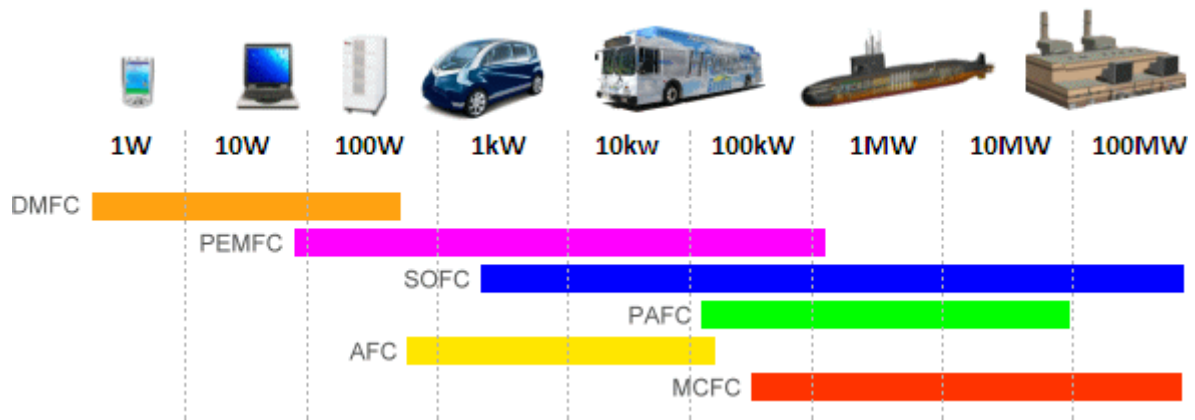


Neke od pogodnih značajki gorivnih članaka su da imaju visoku učinkovitost pri radu, nemaju pokretnih dijelova i ne proizvode buku. Nadalje, zadržavaju dobre značajke i pri opterećenjima izvan projektnih što govori o njihovoj fleksibilnosti.

Gorivni članci prema vrsti elektrolita se dijele na: gorivne članke s alkalnim elektrolitom (AFC), gorivne članke s protonski izmjenjivom membranom kao elektrolitom (PEMFC), gorivne članke s fosfornom kiselinom (PAFC), gorivne članke s rastaljenim karbonatima kao elektrolitom (MCFC) i gorivne članke s čvrstim oksidima kao elektrolitom (SOFC).

Za potrebe ove simulacije uzet je svežanj gorivnih članaka s protonski izmjenjivom membranom kao elektrolitom (PEM gorivni članak).

Prednosti PEM gorivnih članaka su visoka gustoća energije, mala masa, rad pri nižim temperaturama (oko 80 °C) što znači da mogu krenuti iz hladnog starta i ne treba im dugo da dođu do potrebne radne temperature. No jedan bitan nedostatak je skupi katalizator, odnosno platina koja utječe na njegovu cijenu [17].



Slika 9. Radna područja za različite tipove gorivnih članaka [17]

3.1.6. Trošilo

Kao trošilo je odabran rheostat koji bi trebao predstavljati potrošnju električne energije u iznosu od 1 kW.



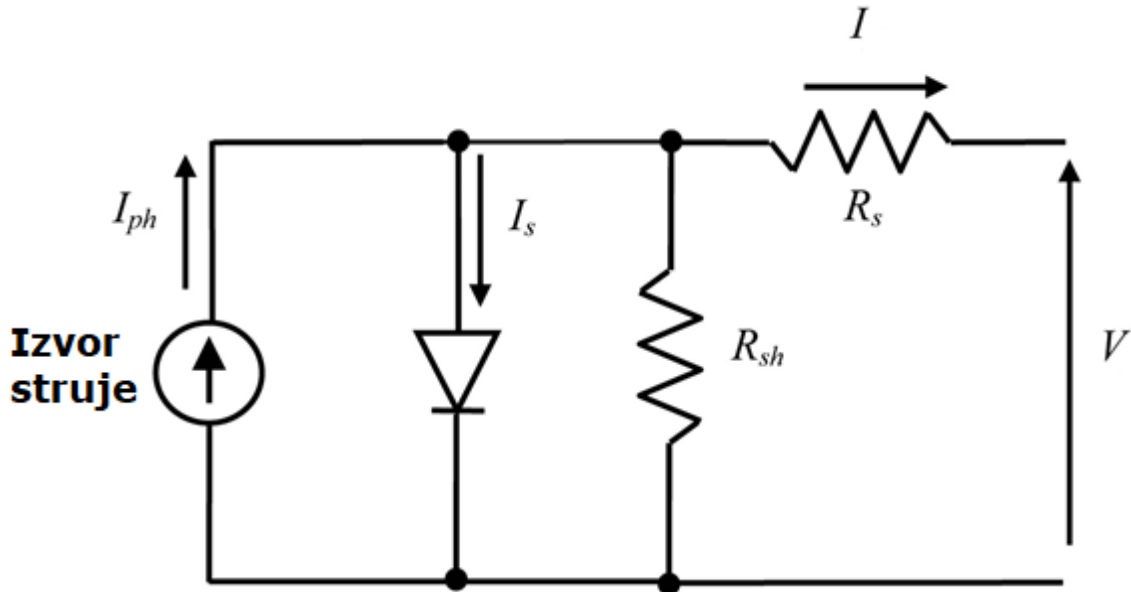
Slika 10. Primjer komercijalnog rheostata snage 1kW [18]

Rheostat je u stvari uređaj kojemu se može mijenjati otpor i kao takav služi za testiranje električnih sustava.

3.2. Modeliranje komponenti sustava

3.2.1. Model FN članka, modula i polja

Kao model FN članka uzet je model s jednom diodom prikazan na slici broj 11. Veličine koje se razmatraju u modelu su foto struja (I_{ph}), serijski otpor (R_s), paralelni otpor (R_{sh}), struja zasićenja na diodi (I_s) i faktor idealnosti (m).



Slika 11. Shema modela FN članka [19]

Za FN modul korišten u simulaciji uzeto je da ima 36 takvih članaka spojenih u serijski spoj. Pripadni napon (U) i struja (I) na izlazu opisani su sljedećim jednadžbama:

$$I = I_{ph} - I_r * \left(\exp\left(\frac{U + I * R_s}{m * U_T}\right) - 1 \right) \quad (6)$$

$$f(I) = I_{ph} - I_r * \left(\exp\left(\frac{U + I * R_s}{m * U_T}\right) - 1 \right) - I = 0 \quad (7)$$

Pri čemu su:

$$I_{ph} = I_{phc} * n_p \quad (8)$$

$$I_r = I_{sc} * n_p \quad (9)$$

$$R_s = R_{sc} * \frac{n_s}{n_p} \quad (10)$$

$$U_T = \frac{n_s * k * T_c}{e} \quad (11)$$

$$I_{phc} = I_{phc1000} * \frac{E(t)}{E_{1000}} \quad (12)$$

$$I_{sc} = I_{sc0} * T_c^3 * \exp\left(-\frac{E_g}{k*T_c}\right) \quad (13)$$

Sljedeće vrijednosti su dobivene iz lista s podacima za određeni model FN modula, podaci su uglavnom temeljeni na U-I karakteristici FN modula pod standardnim testnim uvjetima (1000 W/m², 25 °C i AM1,5) [20].

$$m = 1 \quad (14)$$

$$R_{sc} = 0,013558 \Omega \quad (15)$$

$$n_s = 36 \quad (16)$$

$$n_p = 1 \quad (17)$$

$$I_{phc_{1000}} = 3,27 \text{ A} \quad (18)$$

$$E_{1000} = 1000 \text{ W/m}^2 \quad (19)$$

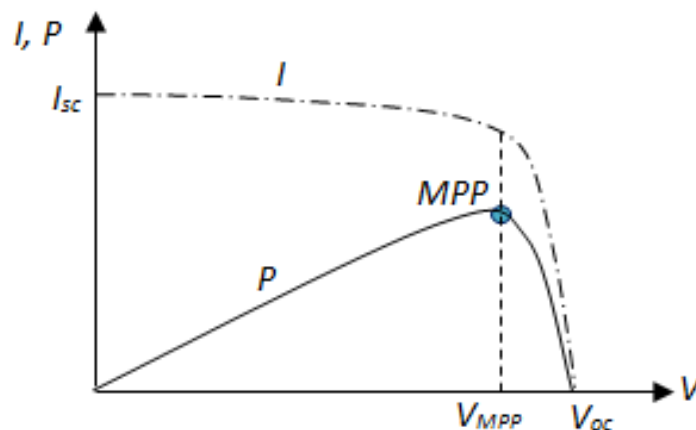
$$k = 1,3806 * 10^{-23} \text{ J/K} \quad (20)$$

$$e = 1,60219 * 10^{-19} \text{ C} \quad (21)$$

$$I_{sc0} = 3,727873 \text{ A/K}^3 \quad (22)$$

$$E_g = 1,794 * 10^{-19} \text{ J} \quad (23)$$

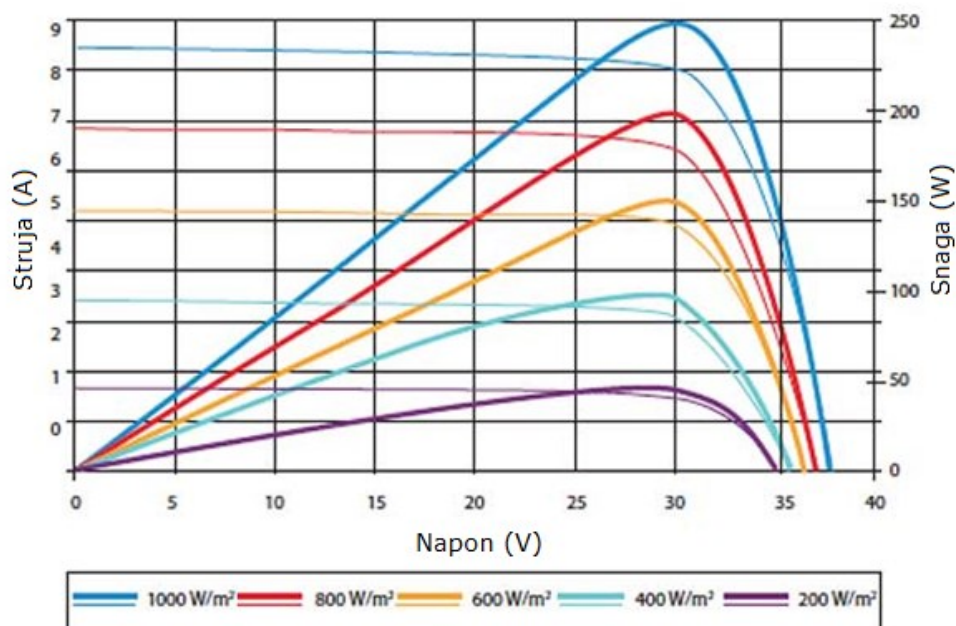
Za FN modul je važno da se iz njega dobije najveća moguća snaga kako bi se iskoristio najveći mogući udio sunčevog ozračenja koje upada na sami modul. Točka najveće snage se označava kao MPP (Maximum Power Point). Radna (U-I) karakteristika će ovisiti o dospjelijem sunčevom ozračenju i temperaturi FN modula [21].



Slika 12. U-I karakteristika FN članka i položaj MPP [21]

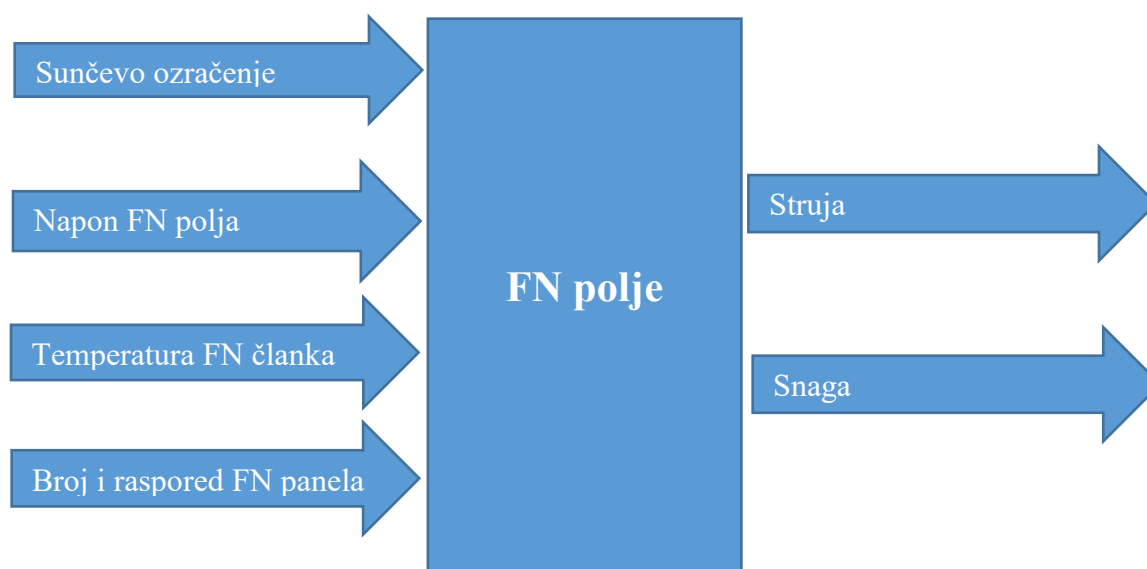
Na slici 13. prikazane su U-I karakteristike FN modula pri različitim sunčevim ozračenjima i pripadajuće snage za svako ozračenje.

Krivulja struja-napon & snaga-napon



Slika 13. U-I karakteristike za različita ozračenja i pripadajuće krivulje snage [22]

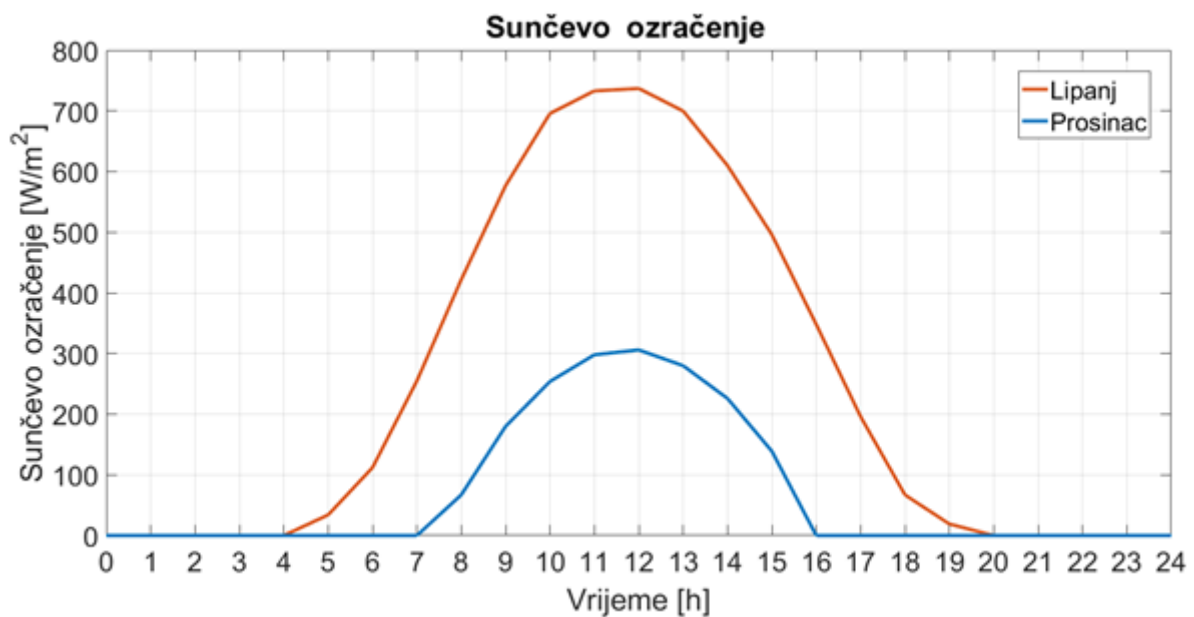
U ovoj simulaciji kao metoda osiguravanja rada u točki barem približnoj MPP-u je održavanje konstantnog napona FN modula. Bez MPP tracker-a teško će se moći postići u potpunosti optimalna radna točka, ali iz gornje slike se može primijetiti da napon MPP točke ne varira znatno obzirom na sunčevo ozračenje.



Slika 14. Shema ulaznih i izlaznih veličina za model FN polja

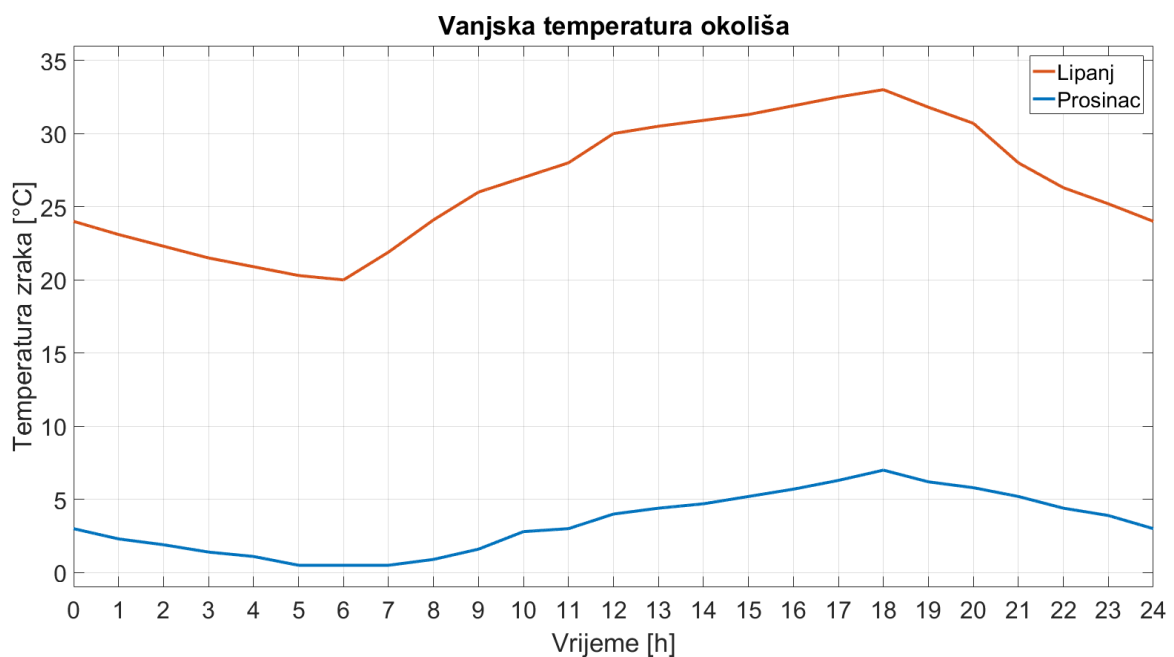
Ulazni podaci:

Prosječno sunčevo ozračenje je prikazano na slici 15.



Slika 15. Prosječno sunčevo ozračenje za jedan dan u lipnju i prosincu

Podaci za sunčevo ozračenje za grad Zagreb preuzeti su sa stranice PVGIS iz baze podataka PVGIS-SARAH. Ujedno su se uzimale vrijednosti ozračenja za slučaj kada su FN moduli bili nagnuti za 35° što je određeno kao godišnji optimum za FN module na ovom geografskom području [23].



Slika 16. Temperatura zraka

Podaci za vanjsku temperaturu zraka su preuzeti sa web-stranice „Timeanddate“ i oni su bili korišteni u svrhu određivanja temperature FN modula [24]. Temperatura FN modula (T_{FN}) se može odrediti preko sljedećeg izraza [25]:

$$T_{FN} = T_e + (T_{NOCT} - 20) * \frac{E(t)}{800} \quad (24)$$

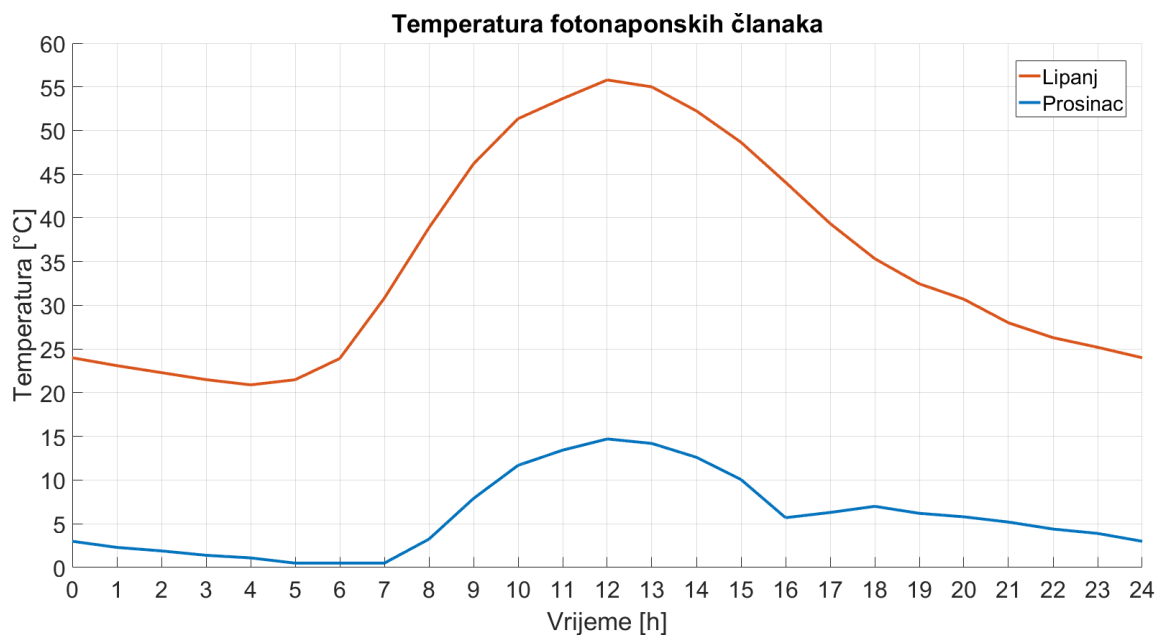
Pri čemu su:

T_{NOCT} - temperatura panela pri normalnim uvjetima rada (uzeta kao 48 °C)

T_e - vanjska temperatura zraka [°C]

T_{FN} - temperatura FN modula [°C]

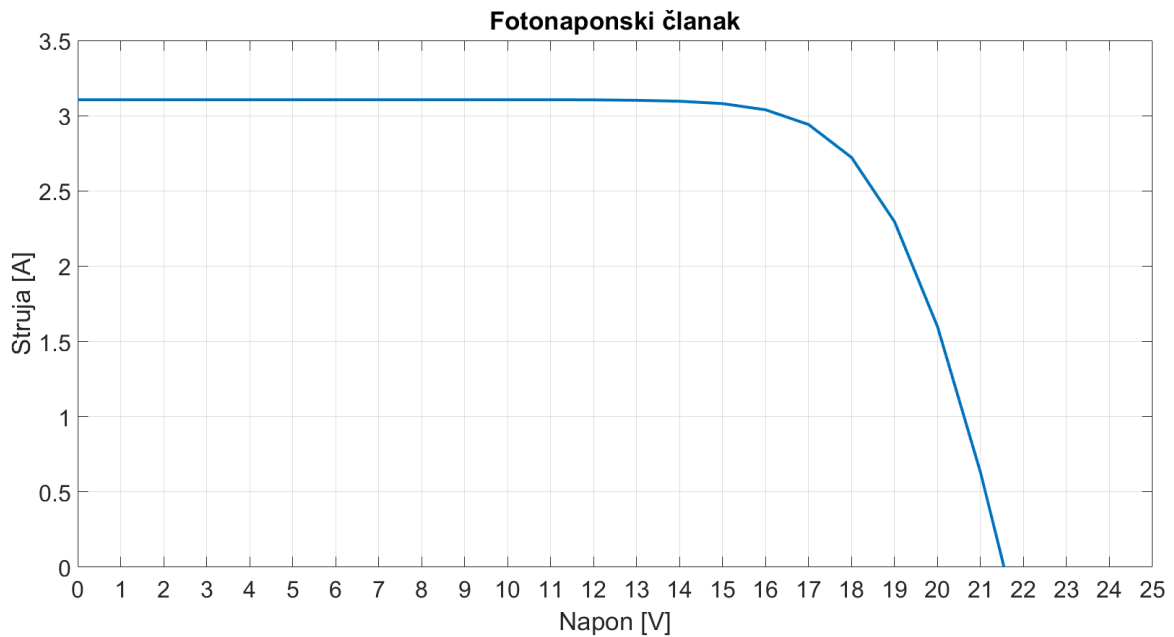
Izraz daje zadovoljavajuće rezultate jer pretpostavlja da postoji slobodna cirkulacija zraka iza FN modula što i je ovdje slučaj. Kretanje temperature FN članka je prikazano na sljedećem grafu:



Slika 17. Temperatura FN članka prilikom rada

Iz slike je vidljivo kako se u prosincu temperatura FN članka kreće u rasponu 0 °C – 15 °C, a u lipnju u rasponu 20 °C – 55 °C. Prosinac ima bolji raspon temperatura jer veća temperatura FN članka ima negativan utjecaj na učinkovitost, no prosinac svejedno ima znatno nepovoljniju količinu sunčevog ozračenja tako da za taj mjesec temperatura FN članka ima manji utjecaj od sunčevog ozračenja na rad FN polja.

Na sljedećoj slici prikazana je U-I karakteristika jednog FN članka pri standardnim uvjetima.



Slika 18. U-I karakteristika jednog FN članka

U ovom modelu uzeto je da se FN polje za mjesec lipanj sastoji od kompleta od 3 serijski i 40 paralelno, odnosno 3 serijski i 165 paralelno spojena FN modula za mjesec prosinac. Broj serijski spojenih panela određuje koliki će maksimalni napon davati sustav, a broj paralelno spojenih FN modula određuje koliku maksimalnu struju će moći davati sustav.

Broj serijski i paralelno spojenih modula je prilagođen tako da odgovara U-I karakteristici elektrolizatora. Ujedno se ciljalo da FN polje bude na naponu koji je najbliži (MPP) pri različitim sunčevim ozračenjima.

3.2.2. Model elektrolizatora

Za simulaciju elektrolizatora uzet je eksperimentalno određen model za konkretan elektrolizator [26].

$$U_{EL} = n_c * U_{rev} + r \left(\frac{I}{A_{EL}} \right) + s * \log \left(t \left(\frac{I}{A_{EL}} \right) + 1 \right) \quad (25)$$

Pri čemu su:

U_{EL} - radni napon elektrolizatora [V]

U_{rev} - reverzibilni napon jednog članka elektrolizatora [V]

r - ohmski otpor elektrolita [Ωm^2]

s, t - koeficijenti za prenapon na elektrodama

A_{EL} - površina elektrode [m^2]

I - struja koja prolazi kroz elektrolizator [A]

n_c - broj članaka

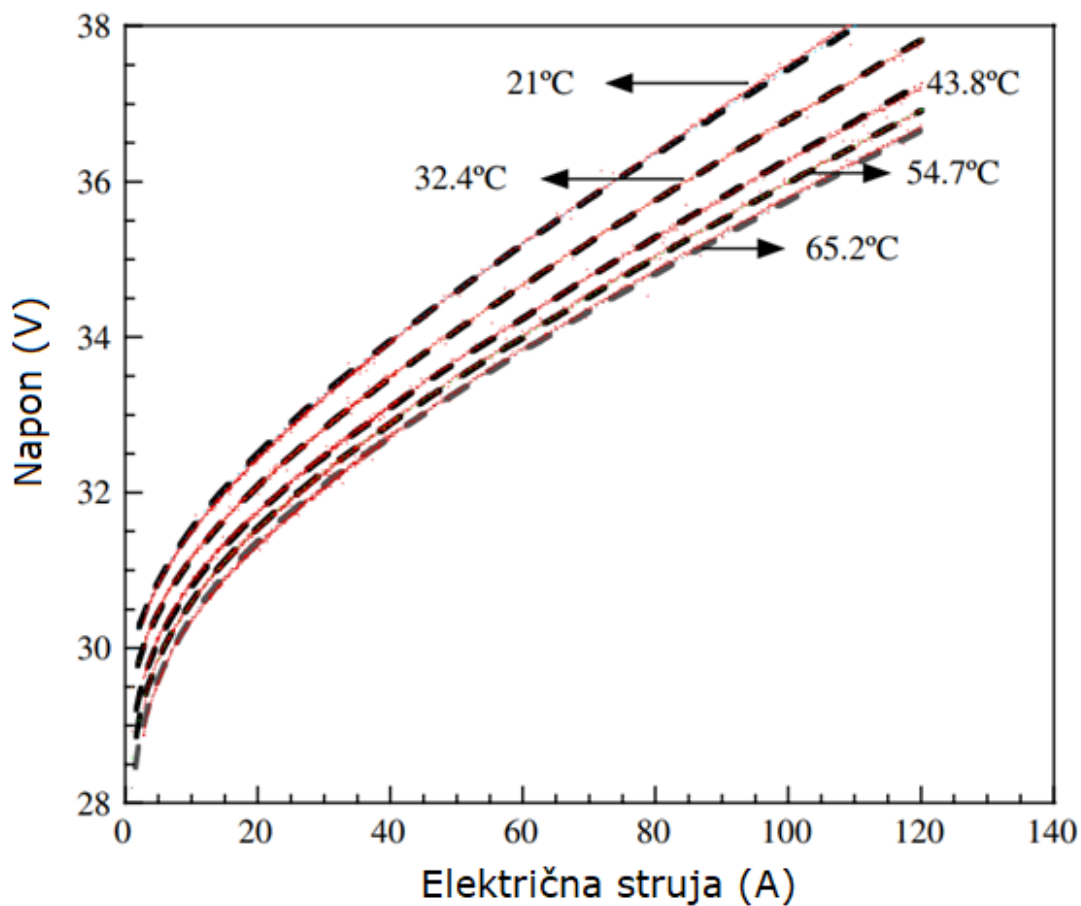
Koeficijenti r, s, t su ovisni o temperaturi [20].

$$r = 0,0025 \Omega\text{m}^2$$

$$s = 2,8946 \text{ V}$$

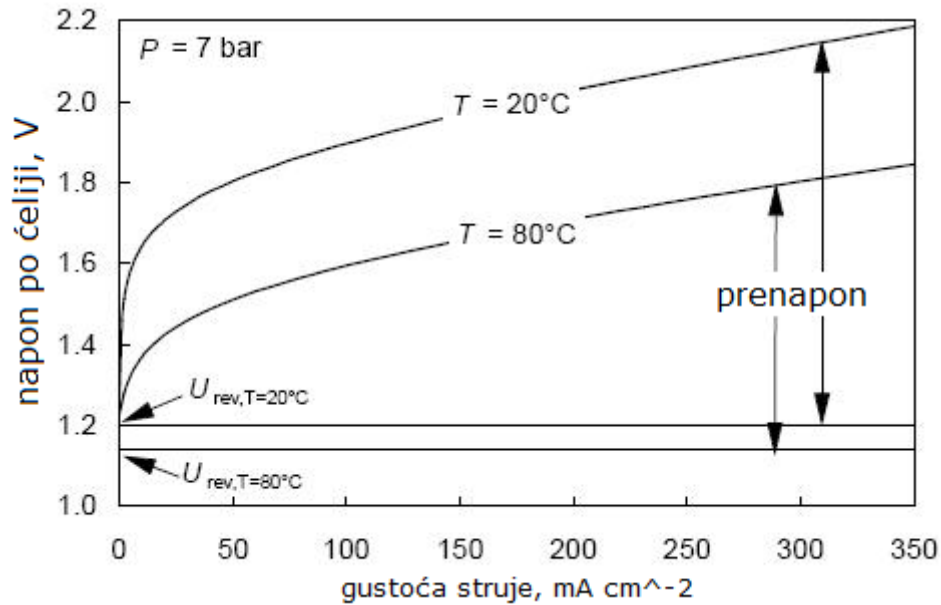
$$t = 0,299 \text{ m}^2/\text{A}$$

$$U_{EL} = n_c * U_{rev} + 0,0025 \left(\frac{I}{A_{EL}} \right) + 2,8946 * \log * \left(0,299 \left(\frac{I}{A_{EL}} \right) + 1 \right) \quad (26)$$



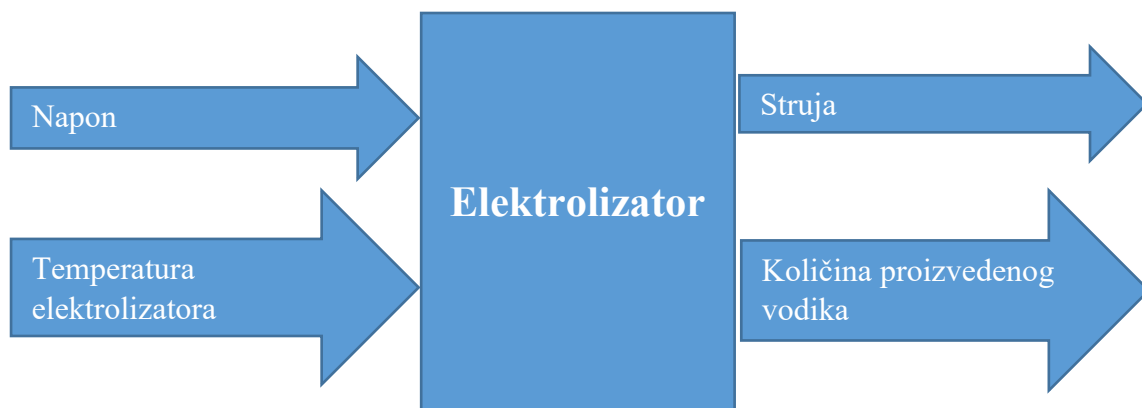
Slika 19. U-I karakteristika elektrolizatora [27]

U-I karakteristika elektrolizatora je prikazana na slici 19. i ujedno prikazuje kako se karakteristika mijenja s promjenom temperature. S porastom temperature za isti napon na elektrolizatoru, elektrolizator će trošiti više struje.



Slika 20. U-I karakteristika elektrolizatora za različite temperature [28]

Slika 20. na sličan način prikazuje U-I karakterstiku elektrolizatora, no pokazuje i da se reverzibilni napon članka elektrolizatora smanjuje s povećanjem temperature.



Slika 21. Shema ulaznih i izlaznih veličina za model elektrolizatora

Kao što je rečeno u prošlom poglavlju, U-I karakteristika elektrolizatora uglavnom određuje broj FN modula i njihov način spajanja (serijski i paralelno) i zato se ciljalo da FN polje radi što je bliže moguće (MPP)

3.2.3. Model spremnika vodika

Model spremnika vodika je temeljen na pretpostavci da se vodik ponaša kao idealni plin i sve jednačbe su izvedene iz te pretpostavke.

$$p_{H_2} = \frac{n_{sp} * R * T}{V_{sp}} \quad (27)$$

$$n_{st} = \frac{1}{2F} \int (I_{EL} - I_{FC}) dt \quad (28)$$

Vrijedi zakon očuvanja mase, gdje je:

$$\frac{dm}{dt} \quad - \text{promjena mase vodika u spremniku u vremenu [kg/s]}$$

$$\dot{m}_{ul} \quad - \text{ulazni maseni tok vodika u spremnik [kg/s]}$$

$$\dot{m}_{izl} \quad - \text{izlazni maseni tok vodika iz spremnika [kg/s]}$$

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_{ul} - \dot{m}_{izl} \quad (29)$$

$$\frac{d(V\rho)}{dt} = V \frac{d\rho}{dt} \quad (30)$$

$$\rho = \rho(p, T) \quad / \quad \frac{\partial}{\partial t} \quad (31)$$

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial \rho}{\partial p} * \frac{dp}{dt} + \frac{\partial \rho}{\partial T} * \frac{dT}{dt} \quad (32)$$

Pretpostavka:

$$T = konst. \rightarrow \frac{dT}{dt} = 0 \quad (33)$$

$$V \frac{\partial \rho}{\partial p} * \frac{dp}{dt} = \dot{m}_{ul} - \dot{m}_{izl} \quad (34)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial p} = \frac{1}{Z * R_g * T} \quad (35)$$

$$Z = 0,99704 + 6,4149 * 10^{-9} * p \quad (36)$$

$$\frac{dp}{dt} = \frac{Z(p) * R_g * T}{V} * (\dot{m}_{ul} - \dot{m}_{izl}) \quad (37)$$

Pri čemu su:

p - tlak u spremniku [Pa]

ρ - gustoća vodika u spremniku [kg/m^3]

T - temperatura vodika [K]

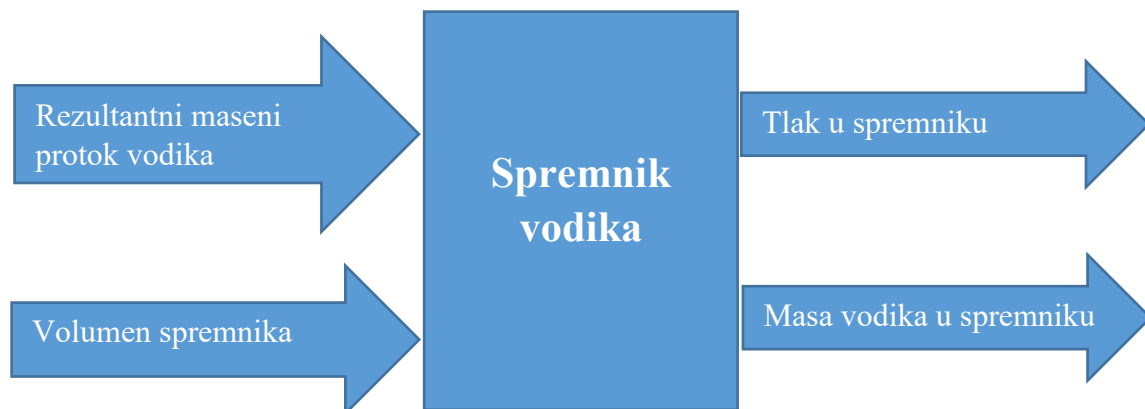
m - masa vodika [kg]

V - volumen spremnika [m^3]

R_g - plinska konstanta za vodik 4124,18 [J/kgK]

$Z(p)$ - faktor stlačivosti za vodik

Na slici 22. prikazana je shema ulaznih i izlaznih veličina za model spremnika vodika. Volumen spremnika je određen i nepromjenjiv kroz vrijeme, rezultatni maseni protok se mijenja tijekom simulacije i on će utjecati na promjenu tlaka u spremniku kroz vrijeme.



Slika 22. Shema ulaznih i izlaznih veličina za model spremnika vodika

Za simulaciju je uzet spremnik vodika od 100 l.

3.2.4. Model kompresora

Kompresor je modeliran tako da kompresiju vrši politropski u 2 stupnja sa međuhlađenjem.

Ukupni rad kompresora iznosi:

$$W_{komp} = n_{ul} * \frac{(W_I + W_{II})}{\eta_{komp}} \quad (38)$$

A specifični radovi za svaki stupanj iznose

$$W_I = \frac{n * R * T_1}{n-1} * \left(1 - \left(\frac{p_x}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right) \quad (39)$$

$$W_{II} = \frac{n * R * T_1}{n-1} * \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_x} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right) \quad (40)$$

Pri čemu su:

W_{komp} - ukupni obavljani rad kompresora [W]

$W_{I,II}$ - specifični radovi kompresora [J/mol]

n_{ul} - ulazni tok vodika u kompresor [mol/s]

n - politropski koeficijent

R - opća plinska konstanta 8314 [J/kmolK]

T_1 - ulazna temperatura vodika u stupanj kompresora [K]

p_i - vrijednosti tlaka (na ulazima i izlazima pojedinih stupnjeva) [bar]

Za simulaciju za mjesec lipanj uzeti su sljedeći podaci:

$n=1,3$

$p_1= 1$ bar

$p_x= 8$ bar

$p_2 = 64$ bar

Odnosno za mjesec prosinac:

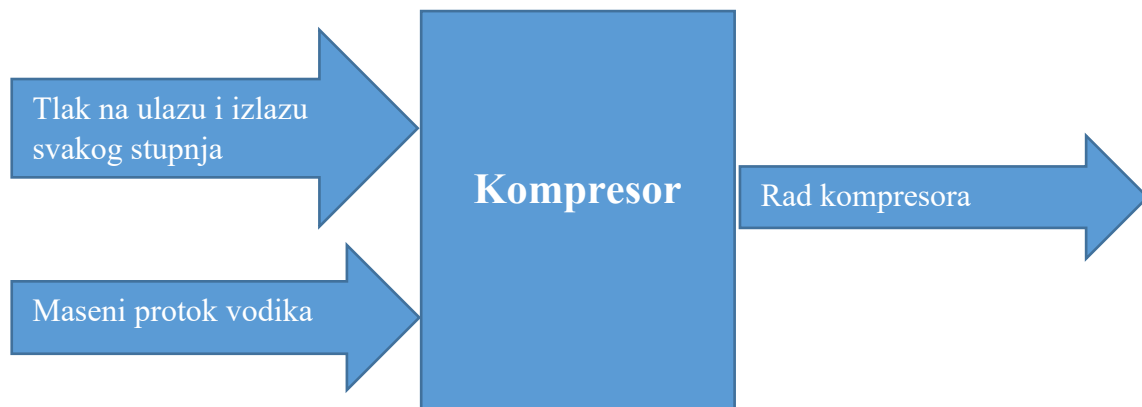
$$n=1,3$$

$$p_1=1 \text{ bar}$$

$$p_x=10 \text{ bar}$$

$$p_2=100 \text{ bar}$$

Iako tlak u spremniku vodika varira uzet je maksimalni tlak koji se pojavljuje u samom spremniku kao tlak na koji kompresor vrši kompresiju, a on u ovom slučaju iznosi 64 bar odnosno 100 bar.



Slika 23. Shema ulaznih i izlaznih podataka za model kompresora

S obzirom da su ulazni i izlazni tlakovi uzeti konstantni, specifični rad kompresora za prvi i drugi stupanj će uvijek biti konstantni po vremenu. Tako da će promjenjivi maseni protok vodika doveden iz elektrolizatora biti čimbenik koji će uzrokovati promjenjivi rad kompresora po vremenu.

3.2.5. Model gorivnog članka i svežnja

$$E_{Nernst} = 1,23 \text{ V}$$

$$V_{FC} = E_{Nernst} - (V_{akt} + V_{ohm} + V_{konc}) \quad (41)$$

Jednadžba gubitaka uslijed aktivacije [29]

$$\Delta V_{akt} = \frac{RT}{\alpha n F} * \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) \quad (42)$$

Pri čemu su:

E_{Nernst} - teorijski maksimalni napon koji jedan gorivni članak može postići [V]

V_{akt} - pad napona uslijed aktivacije [V]

V_{ohm} - pad napona zbog otpora trošila [V]

V_{konc} - pad napona zbog koncentracijskog gubitka [V]

V_{FC} - napon gorivnog članka [V]

R - opća plinska konstanta 8,314 [J/molK]

T - temperatura gorivnih članaka [K]

α - koeficijent prijenosa [$\alpha=1$]

n - broj elektrona [$n=2$]

i - gustoća električne struje [A/cm^2]

i_0 - gustoća električne struje za izmjenu [$i_0=3*10^{-6} A/cm^2$]

Jedandžba ohmskih gubitaka [29]

$$\Delta V_{ohm} = i * R_i \quad (43)$$

Pri čemu su:

R_i - ukupni unutarnji otpor članka [Ωcm^2]

Vrijednost R_i se kreće u rasponu od 0,1 do 0,2 Ωcm^2 , no za potrebe simulacije uzeta je vrijednost $R_i=0,15 \Omega cm^2$

Jednadžba koncentracijskog gubitka [29]

$$\Delta V_{konc} = \frac{RT}{nF} * \ln \left(\frac{i_L}{i_L - 1} \right) \quad (44)$$

Pri čemu su:

i_L - granična vrijednost gustoće električne struje [$i_L = 1,6 \text{ A/cm}^2$]

Rezultantna snaga:

$$W_{FC} = V_{FC} * I_{FC} * A_{FC} \quad (45)$$

Pri čemu su:

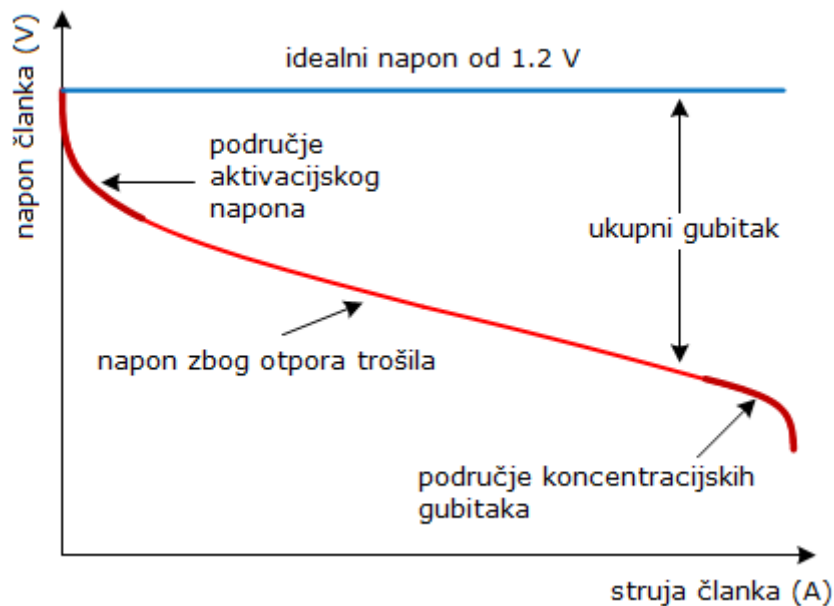
V_{FC} - napon na krajevima gorivnih članaka [V]

I_{FC} - rezultantna struja kroz gorivne članke [A]

A_{FC} - aktivna površina elektroda gorivnih članaka [cm^2]

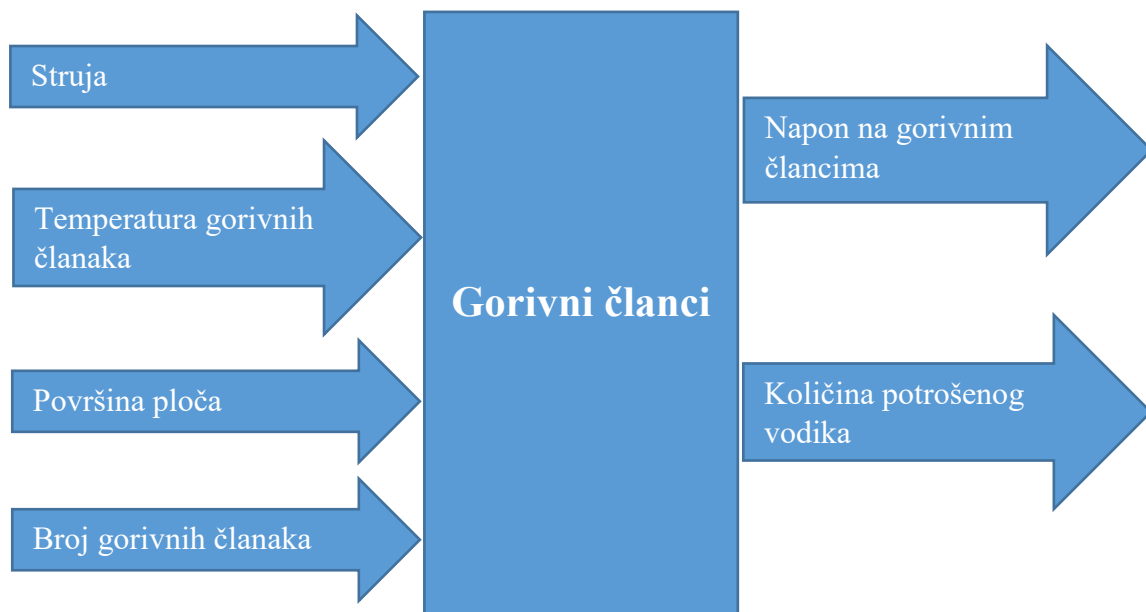
Za potrebe simulacije odabrano je da se svežanj sastoji od 25 gorivna članka površine 46 cm^2 .

Ujedno je uzeta konstantna temperatura gorivnih članaka iznosa $60 \text{ }^\circ\text{C}$.



Slika 24. U-I karakteristika gorivnog članka [30]

U-I karakteristika jednog gorivnog članka pokazuje da napon gorivnog članka može biti samo manji od idealnog napona od 1,2 V. Sa porastom struje članka raste i pad napona zbog određenih gubitaka.



Slika 25. Shema ulaznih i izlaznih veličina za model svežnja gorivnih članaka

Od ulaznih parametara temperatura gorivnih članaka, površina ploča i broj gorivnih članaka su nepromjenjivi u vremenu, no struja koju svežanj gorivnih članaka mora proizvesti će biti promjenjiva u vremenu i u skladu s time će se mijenjati napon na gorivnim člancima. Količina potrošenog vodika će biti prikazana na grafu u sljedećim poglavljima.

3.2.6. Tijek simulacije

Simulacija je modelirana u skladu sa zakonom očuvanja energije:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{e}_{ul} - \dot{e}_{izl} \quad (46)$$

Kako nema akumulacije električne energije u sustavu slijedi:

$$\frac{dE}{dt} = 0 \quad (47)$$

$$\dot{e}_{ul} = \dot{e}_{izl} \quad (48)$$

odnosno izraženo preko snaga pojedinih komponenti:

$$P_{FN} + P_{FC} = P_{trošilo} + P_{EL} + P_{kompresor} \quad (49)$$

Pri čemu su:

\dot{e}_{ul} - tok energije u sustav [W]

\dot{e}_{izl} - tok energije iz sustava [W]

P_{FN} - izlazna snaga iz FN polja [W]

P_{FC} - izlazna snaga iz gorivnih članaka [W]

$P_{trošilo}$ - snaga koju rheostat troši [W]

P_{EL} - ulazna snaga elektrolizatora [W]

P_{komp} - ulazna snaga kompresora [W]

Tijek simulacije se može podijeliti u 3 situacije:

- I. FN polje ne proizvodi nimalo električne energije stoga gorivni članci moraju trošiti vodik iz spremnika kako bi pokrili potrošnju električne energije.

Tada vrijedi:

$$P_{FC} = P_{trošilo} \quad (50)$$

- II. FN polje počinje proizvoditi električnu energiju, ali ona nije dostatna da pokrije potrošnju stoga moraju i gorivni članci isto raditi, ali u sve manjem intenzitetu kako se situacija približava kraju.

Tada vrijedi:

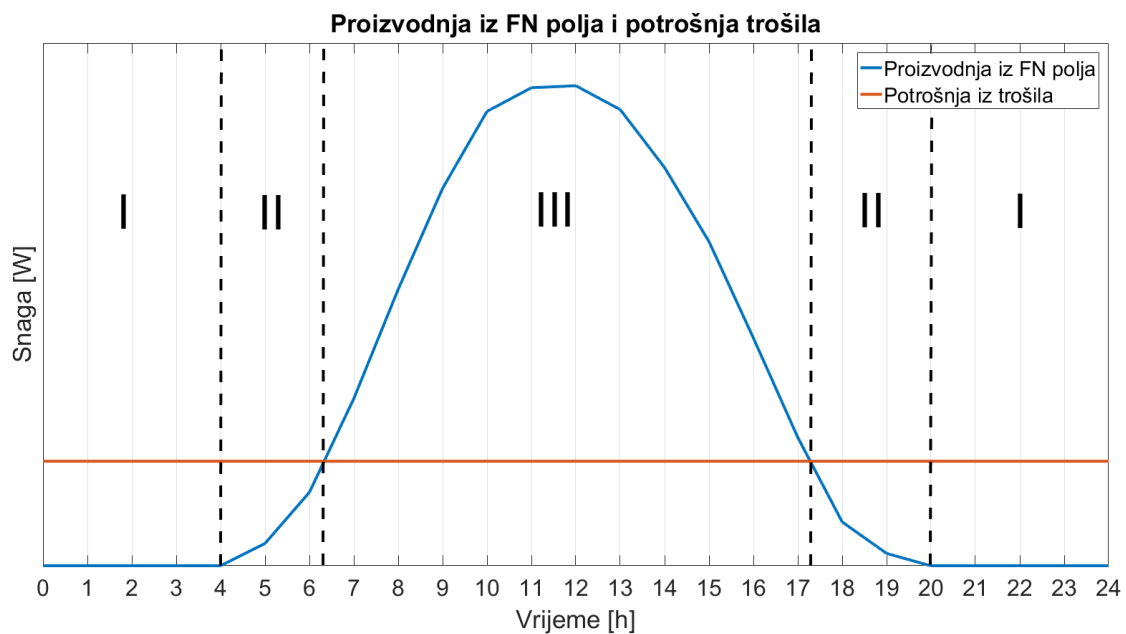
$$P_{FN} + P_{FC} = P_{trošilo} \quad (51)$$

- III. FN polje proizvodi dovoljno električne energije da pokrije potrošnju i ima viška električne energije koja se može trošiti na rad elektrolizatora i kompresora kako bi se proizveo i pohranio vodik.

Tada vrijedi:

$$P_{FN} = P_{trošilo} + P_{EL} + P_{kompresor} \quad (52)$$

Prikaz kako sustav treba funkcionirati je dan na slici 26. Prikazane su i sve tri situacije koje su objašnjene u ovom poglavlju.



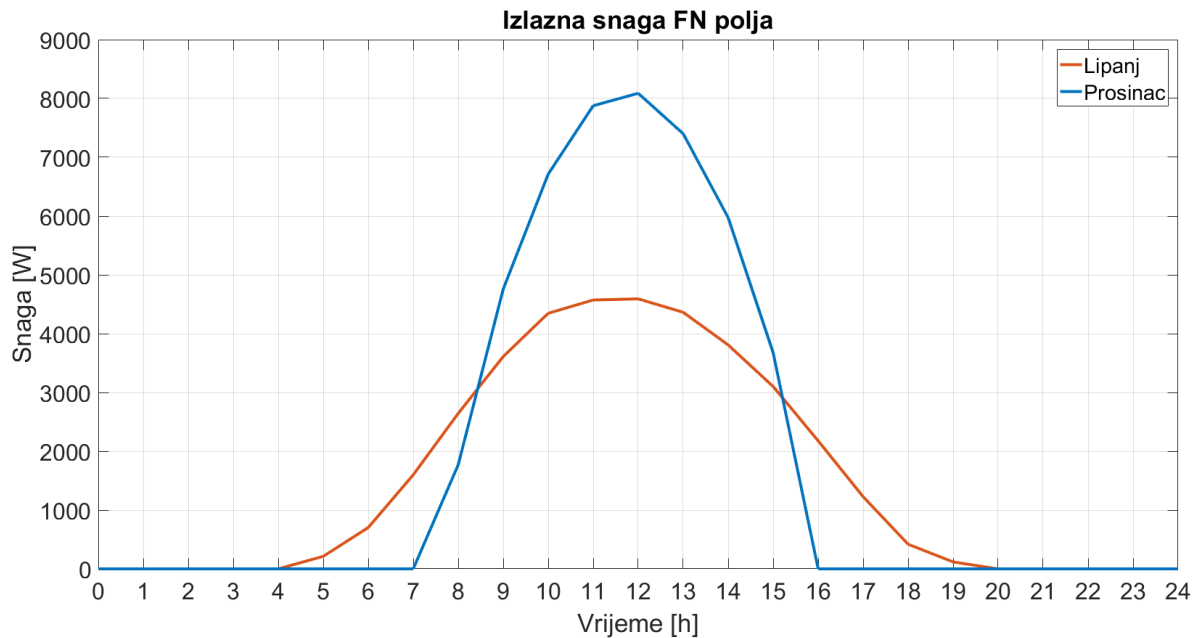
Slika 26. Situacije u simulaciji u odnosu na proizvodnju i potrošnju energije

Iz slike 26. vidljivo je kretanje dviju ključnih veličina sustava: FN polja koje služi kao glavni izvor energije i trošila kao glavnog ponora energije. Njihovo ponašanje će diktirati ponašanje cijelog sustava.

4. Rezultati simulacije

4.1.FN polje

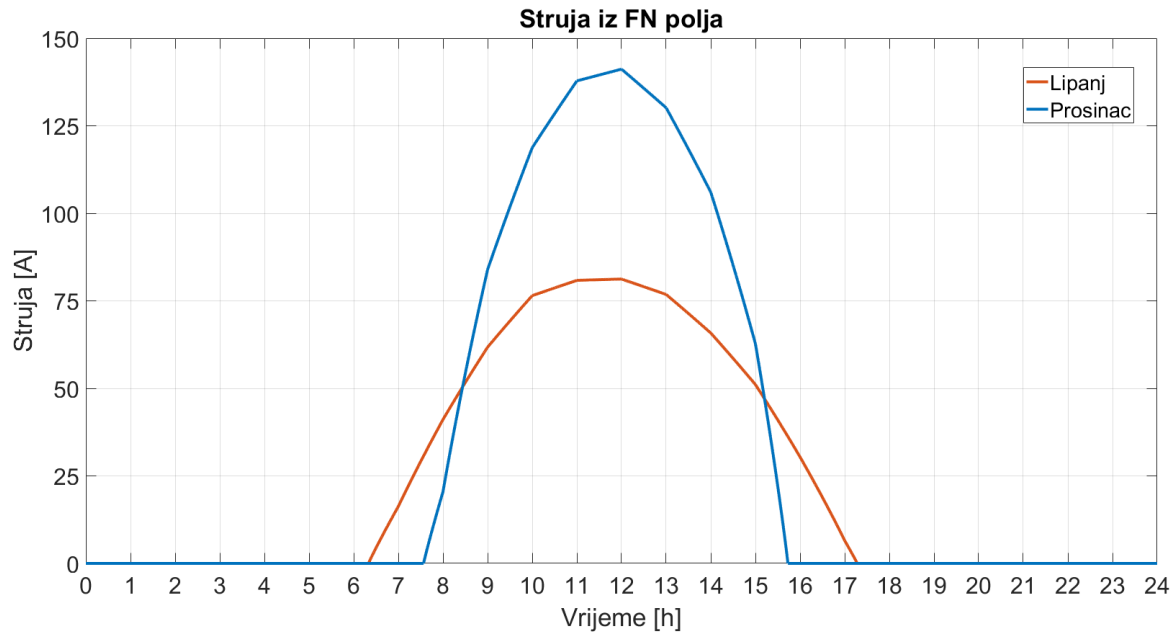
Raspoloživa izlazna snaga dobivena iz FN polja je prikazana na sljedećoj slici:



Slika 27. Izlazna snaga FN polja

Iz slike 27. je vidljivo kako u mjesecu lipnju FN polje može proizvoditi struju kroz duži period dana i stoga ne treba dosezati maksimalnu snagu kao u mjesecu prosincu da bi se mogle pokriti potrebe trošila. FN polje tako može direktno pokrivati potrošnju duže, dok u prosincu mora dosegnuti veću snagu, samim time proizvesti i više energije kako bi se ona mogla pohraniti i koristiti kasnije.

Uz konstantan napon FN polja za očekivati je da će i krivulja struje iz FN biti istog oblika kao i krivulja snage.



Slika 28. Struja dobivena iz FN polja

Iz slika se može vidjeti kako se uz konstantan napon FN polja mijenja struja koju FN polje može proizvesti. Oblik krivulje je identičan krivulji dobivene snage.

U mjesecu lipnju za površinu panela od 110,45 m², postiže se maksimalna izlazna snaga od 4,5 kW. U mjesecu prosincu za površinu panela od 455,6 m², postiže se maksimalna snaga od 8 kW.

Za usporedbu, da smo odabrali konstantnu površinu panela od npr. 100 m², u lipnju bi maksimalna snaga iznosila 4,13 kW, a u prosincu 1,76 kW.

Grubi proračun učinkovitosti FN polja:

Iz podataka dobivenih iz simulacije može se grubo izračunati kolika je bila učinkovitost panela za ovaj konkretan slučaj:

$$\eta_{FN} = \frac{E_{kor}}{E_{ul}} \quad (53)$$

$$E_{kor} = \int P_{FN}(t) dt \quad (54)$$

$$P_{FN} = U_{FN} * I_{FN} \quad (55)$$

$$E_{ul} = \int E(t) * A_{FN} dt \quad (56)$$

Pri čemu su:

E_{kor} – ukupna proizvedena električna energija iz FN polja [J]

P_{FN} – snaga FN polja [W]

E_{ul} – energija sunčevog ozračenja koju primi FN polje [J]

A_{FN} – površina FN polja [m²]

Simulacijom za mjesec lipanj dobiveni su sljedeći podaci:

$$A_{FN} = 110,45 \text{ m}^2$$

$$E_{ul} = 2,387 \cdot 10^9 \text{ J} = 663,06 \text{ kWh}$$

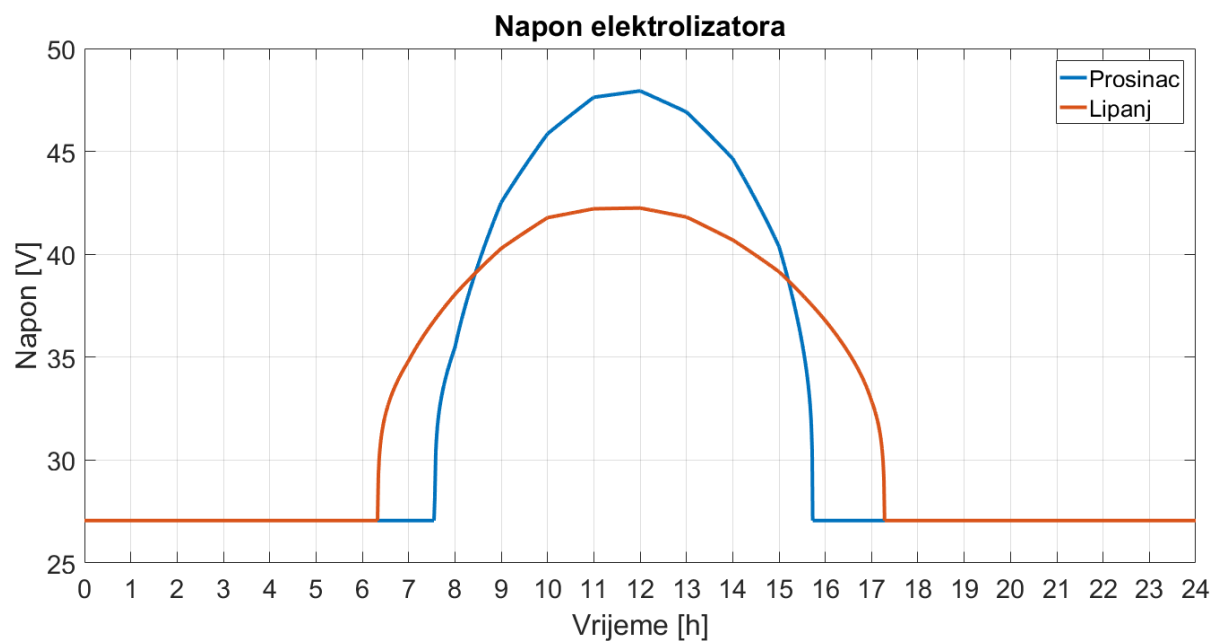
$$E_{kor} = 1,4 \cdot 10^8 \text{ J} = 38,89 \text{ kWh}$$

Iz čega slijedi:

$$\eta_{PV} = 5,87\%$$

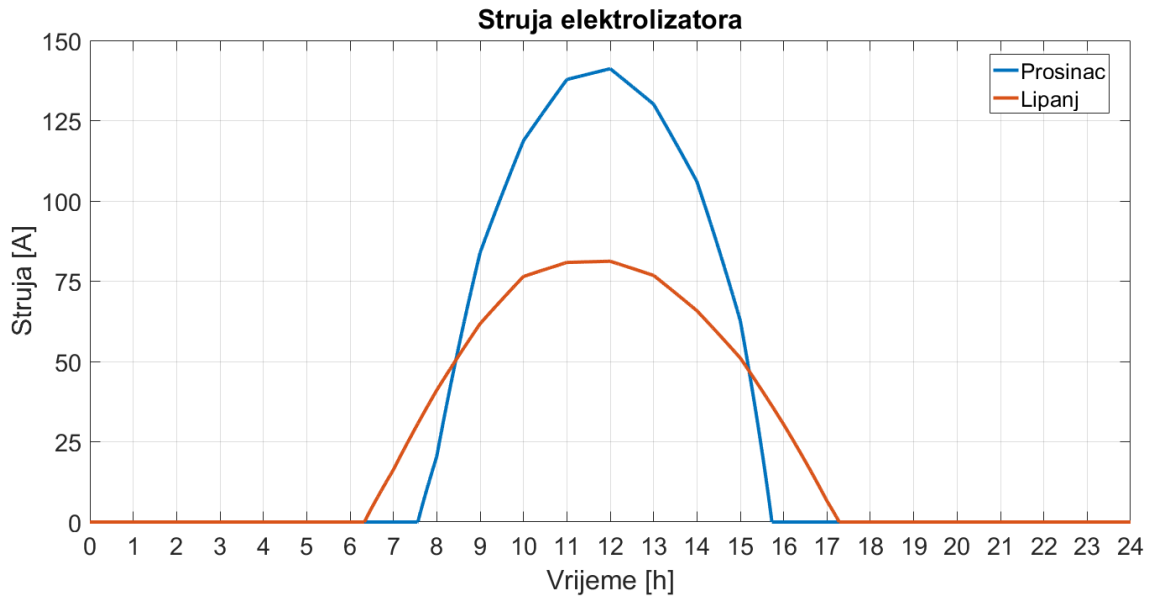
4.2. Elektrolizator

Rad elektrolizatora je prikazan za na slikama 29, 30, 31 i 32.



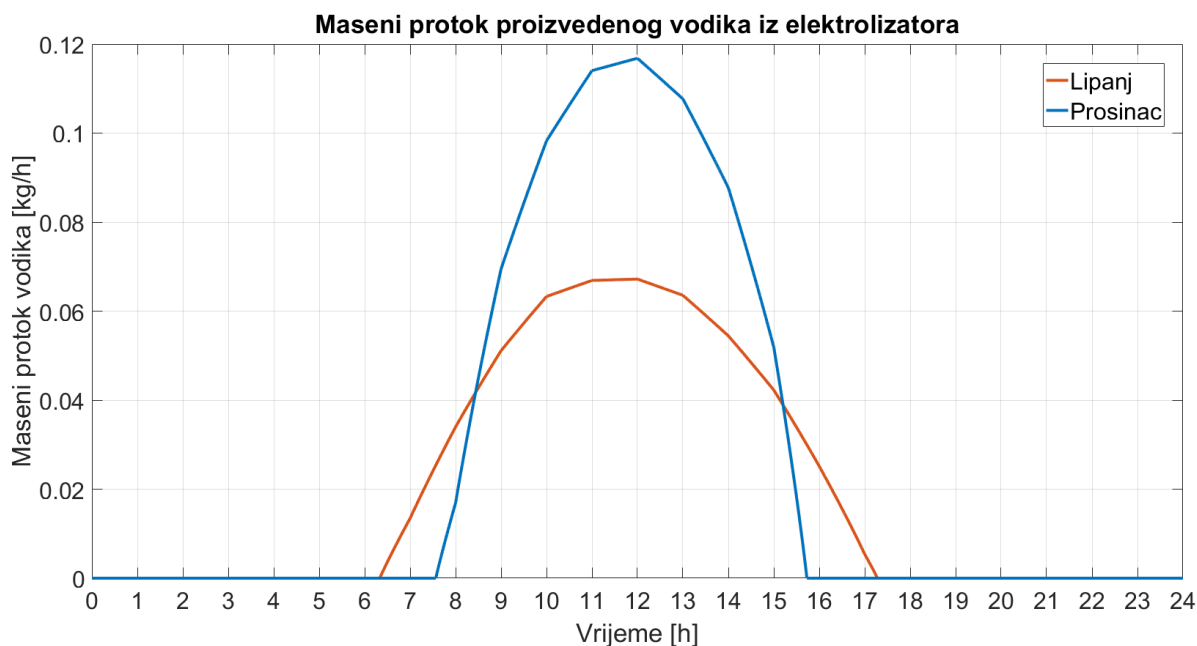
Slika 29. Napon na elektrolizatoru

Napon elektrolizatora je prikazan na slici 29. i pokazuje da elektroliza počinje tek kada postoji višak proizvedene energije iz FN polja. Zbog većeg kapaciteta FN polja za mjesec prosinac i većeg viška snage koju elektrolizator mora iskoristiti slijedi da će napon i struja biti veći nego za mjesec lipanj. Sustav će u tom mjesecu raditi kraće vremenski, ali će morati imati veću promjenu u intenzitetu rada u tom periodu.



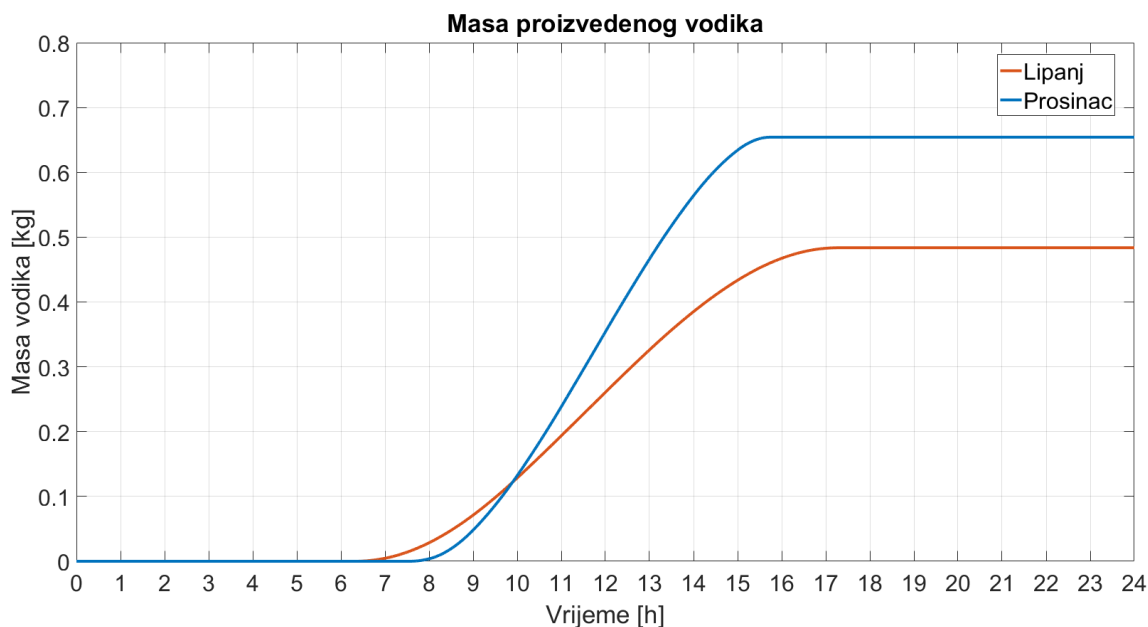
Slika 30. Struja elektrolizatora

Slika 30. prikazuje koliku struju elektrolizator troši tijekom rada. Vidljivo je kako elektrolizator ne radi dok napon na elektrolizatoru ne dostigne vrijednost veću od minimalnog potrebnog koji iznosi 27,06 V. Struja kroz elektrolizator tako doseže maksimum od 81 A za lipanj, odnosno 140 A za prosinac.



Slika 31. Maseni protok proizvedenog vodika na izlazu elektrolizatora

Oblik krivulje masenog protoka je identičan obliku krivulje struje elektrolizatora upravo zbog prvog Faradayevog zakona u kojem je opisana proporcionalna ovisnost masenog protoka vodika i struje kroz elektrolizator.



Slika 32. Masa elektrolizatorom proizvedenog vodika

Slike 31. i 32. pokazuju kako će masa proizvedenog vodika u prosincu biti veća (zbog činjenice što će biti i veća potrošnja vodika u tom mjesecu) i kako će elektrolizator raditi s većim masenim protocima kako bi u kraćem vremenskom periodu proizveo potrebnu količinu vodika.

Grubi proračun učinkovitosti elektrolizatora:

Iz podataka dobivenih iz simulacije može se grubo izračunati kolika je bila učinkovitost elektrolizatora za ovaj konkretan slučaj:

$$\eta_{EL} = \frac{m_{EL(H_2)} * H_g(H_2)}{E_{EL}} \quad (57)$$

$$P_{EL} = U_{EL} * I_{EL} \quad (58)$$

$$E_{ul} = \int P_{EL}(t) dt \quad (59)$$

Pri čemu su:

$m_{EL(H_2)}$ – ukupna masa elektrolizatorom proizvedenog vodika [kg]

$H_g(H_2)$ – gornja ogrjevna vrijednost vodika (141,7 MJ/kg)

P_{EL} – snaga koju troši elektrolizator [W]

E_{EL} – energija koju je potrošio elektrolizator [J]

Simulacijom za mjesec lipanj dobiveni su sljedeći podaci:

$$m_{EL(H_2)} = 0,5334 \text{ kg}$$

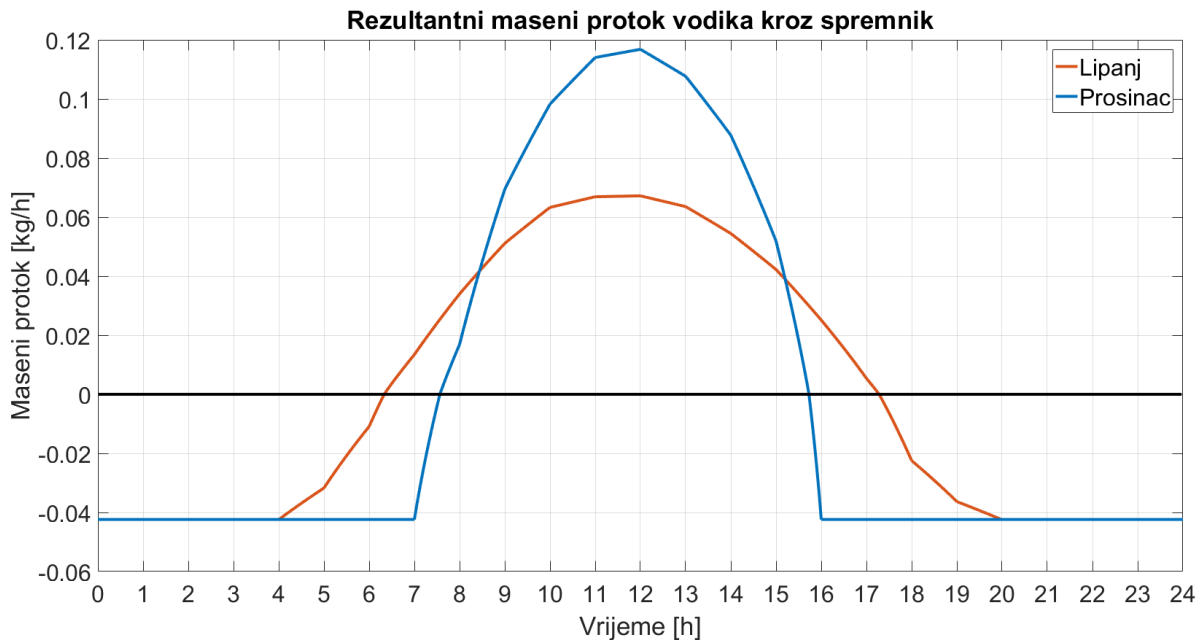
$$E_{EL} = 9,537 * 10^7 \text{ J}$$

Iz čega slijedi:

$$\eta_{EL} = 79,25\%$$

4.3. Spremnik vodika

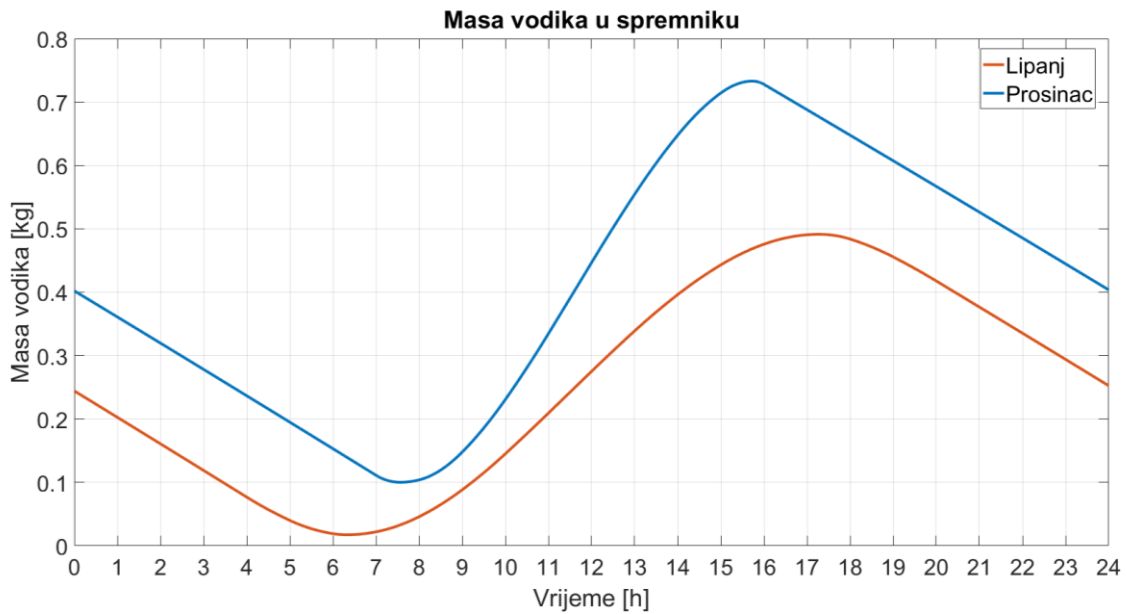
Rezultantni maseni protok vodika kroz spremnik se sastoji od zbroja rezultantnog masenog protoka na izlazu elektrolizatora i rezultantnog masenog protoka na ulazu u svežanj gorivnih članaka. Na slici 33. prikazani su maseni protoci vodika kroz spremnik.



Slika 33. Rezultantni maseni protok vodika kroz spremnik

Iz slike 33. može se očitati da je najveći maseni protok vodika koji će spremnik morati davati otprilike 0,04 kg/h i bit će jednak za oba mjeseca. Najveći protoci koje će spremnik morati primiti su oko 0,12 kg/h i 0,07 kg/h za prosinac odnosno lipanj. Iz slike se može vidjeti kada će se spremnik prazniti ili puniti i kojim intenzitetom.

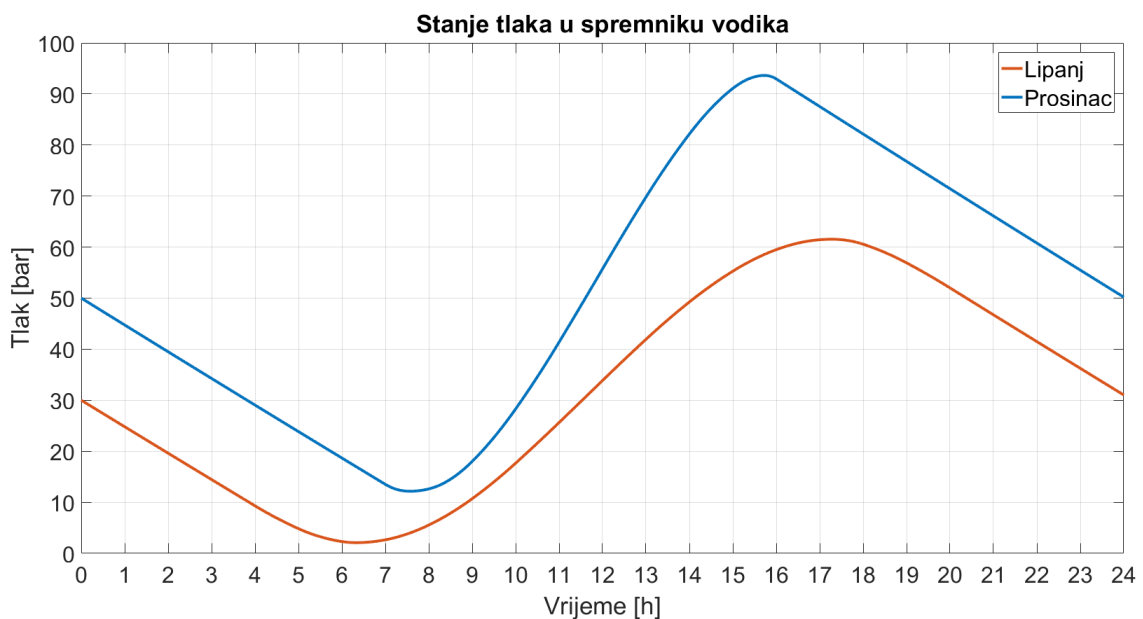
Masa vodika u spremniku prikazana je na slici 34.



Slika 34. Masa vodika u spremniku

Slika 34. u skladu sa slikom 33. pokazuje kako će se spremnik prazniti ili puniti. Brzina pražnjenja spremnika u oba slučaja je ista, no brzine punjenja će se razlikovati za lipanj i prosinac. Kako se spremnik na početku simulacije počinje prazniti, odabrane su se proizvoljne količine vodika u spremniku prvenstveno kako masa vodika u spremniku ne bi pala ispod nule.

Kapacitet sustava je također bio dimenziniran prvenstveno tako da na početku i kraju simulacije stanje vodika u spremniku ostane isto ili barem na kraju simulacije da bude više vodika nego što je bilo na početku. Na slici 35. prikazano je stanje tlaka u spremniku vodika.

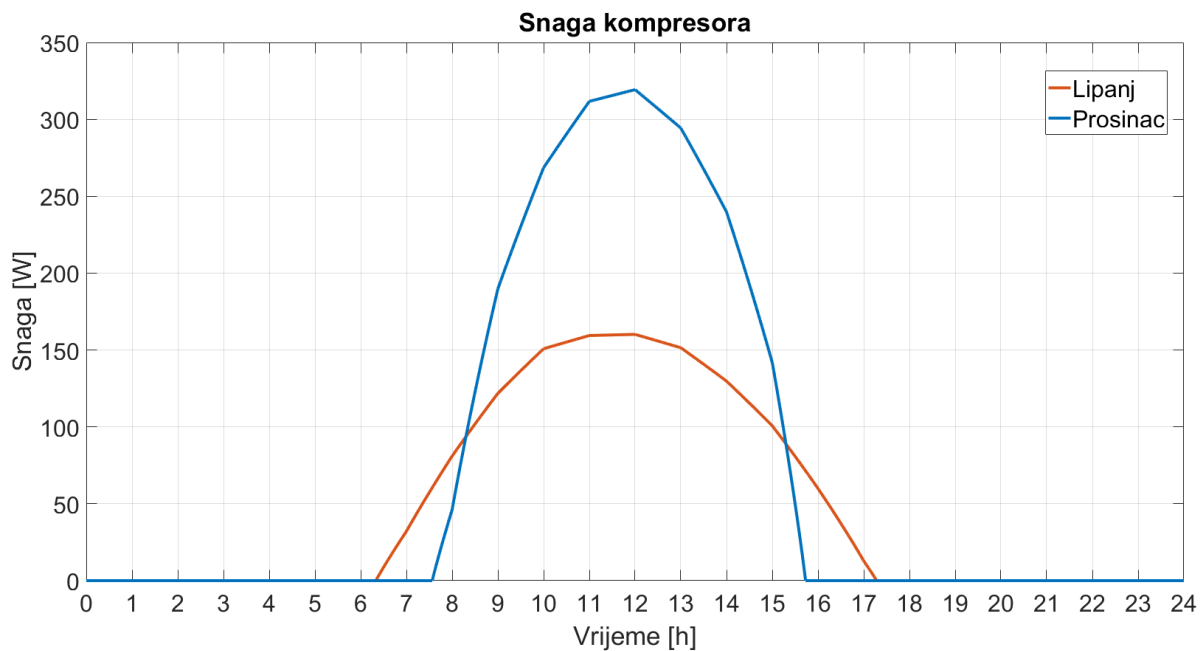


Slika 35. Stanje tlaka u spremniku vodika

Za prosječni dan u mjesecu lipnju dovoljno je da početni tlak vodika u spremniku bude najmanje 30 bar, jer će se tako osigurati dovoljna količina vodika u periodu od 0 do 6 h dok se ne počne proizvoditi energija na FN modulima, kada će se moći opet napuniti spremnik. Za prosječni dan u mjesecu prosincu će pak tlak vodika u spremniku morati biti 50 bar. Ujedno se vidi da će maksimalni tlak za prosinac biti znatno veći od maksimalnog tlaka u lipnju.

4.4. Kompresor

Snaga kompresora prikazana je na slici 36.

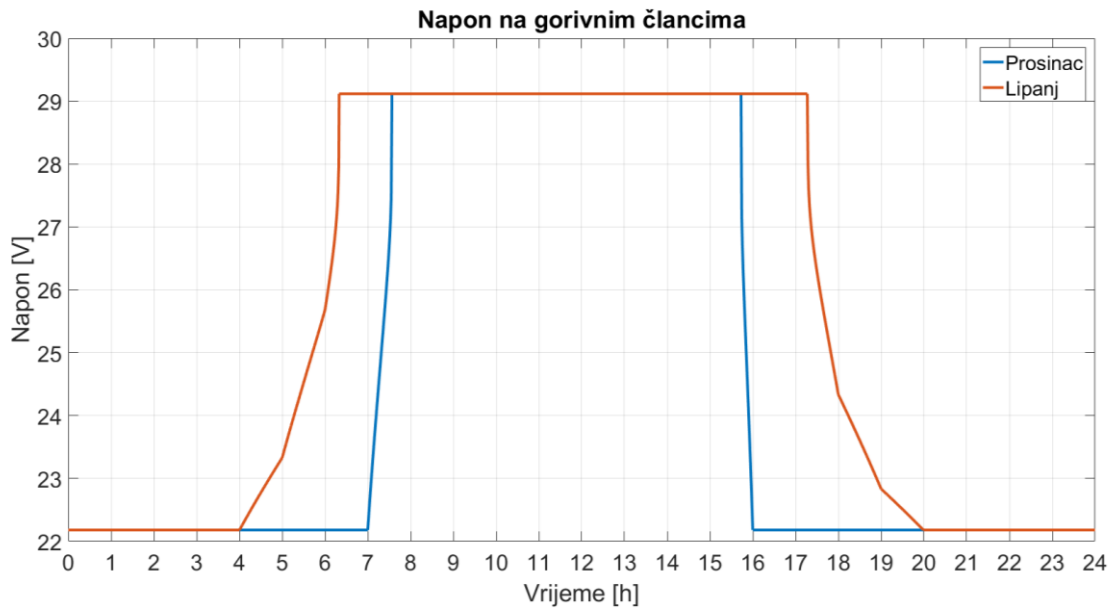


Slika 36. Snaga kompresora

Obzirom da za reprezentativan dan u prosincu treba više vodika proizvesti u ograničenom periodu nego za dan u lipnju, slijedi da će se više energije trošiti za kompresiju istog vodika. Nadalje, zbog većeg ulaznog protoka vodika u spremnik po zimi, slijedi da će biti i veći krajnji tlak u spremniku pa će i to biti uzrok povećanja troška energije za kompresor.

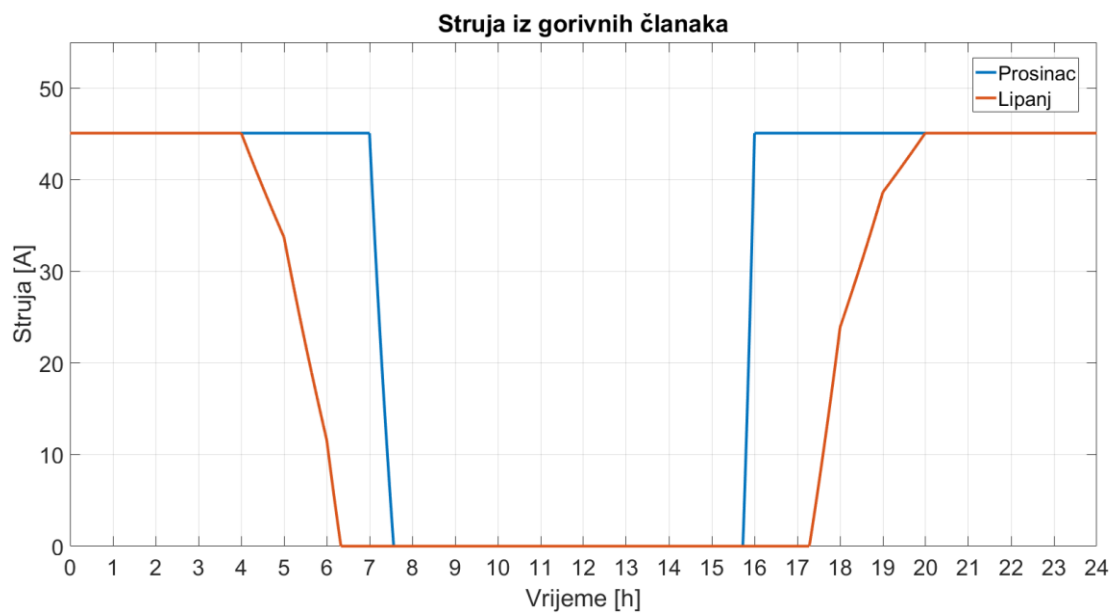
4.5. Svežanj gorivnih članaka

Svežanj gorivnih članaka će većinu vremena raditi sa konstantnom snagom od 1 kW, tako da će napon i struja također biti konstantni većinu vremena. Samo će se u situaciji označenoj brojem II (poglavlje 3.2.6.) mijenjati snaga svežnja, a samim time i pripadajući napon i struja. Promjena napona svežnja gorivnih članaka kroz vrijeme prikazana je na slici 37.



Slika 37. Napon na svežnju gorivnih članaka

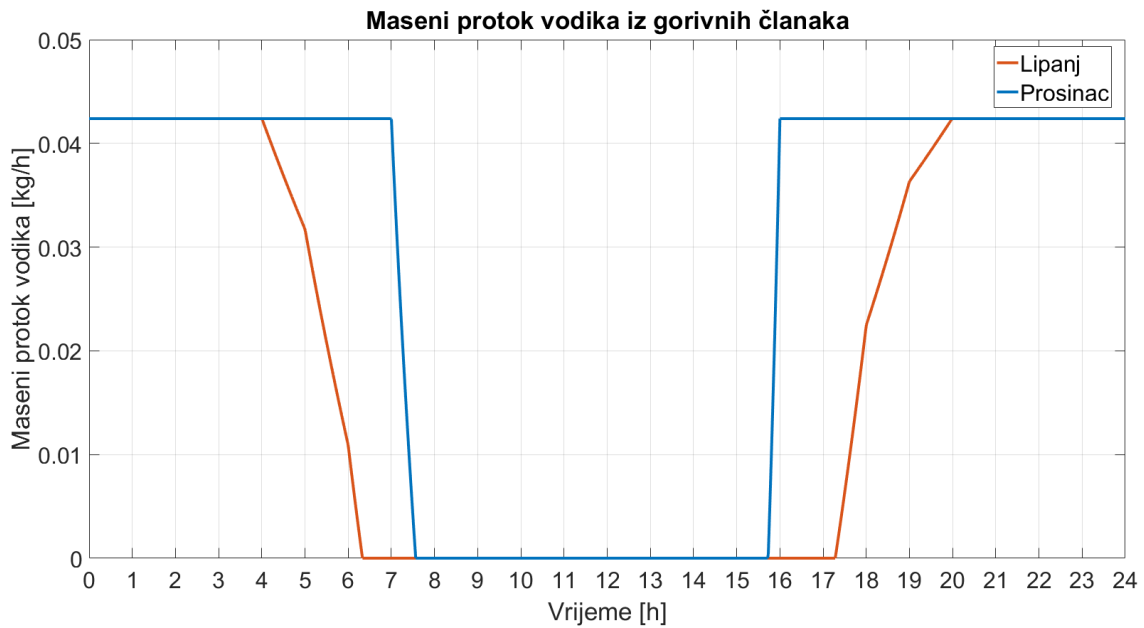
Vremenska promjena struje svežnja gorivnih članaka prikazana je na slici 38.



Slika 38. Struja iz svežnja gorivnih članaka

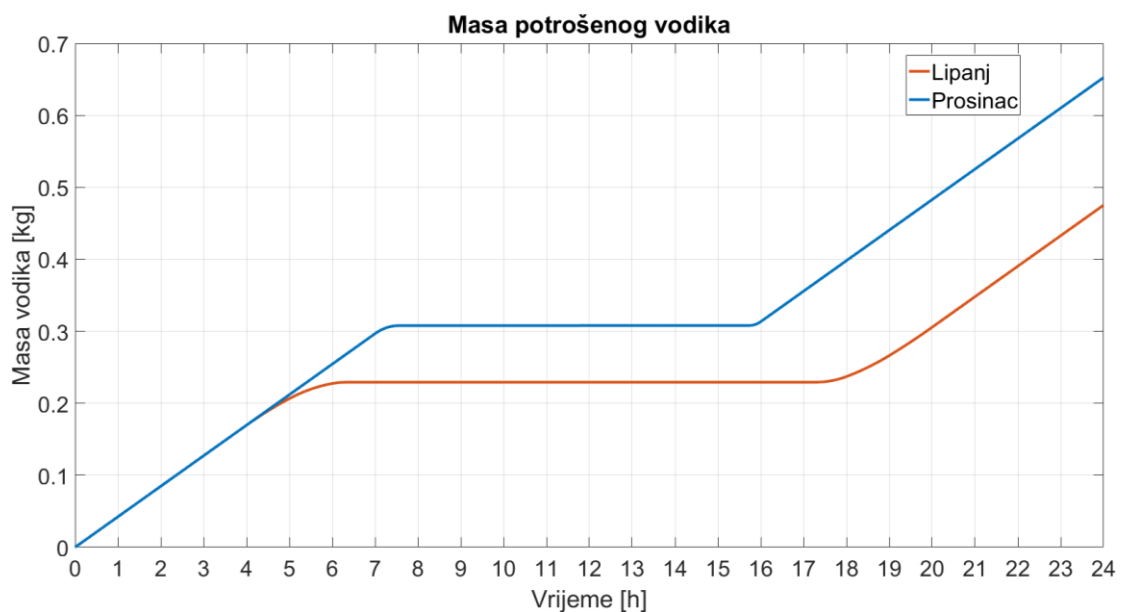
U skladu s U-I karakteristikom iz slika 37. i 38. vidljivo je da se sa povećanjem struje napon mora smanjivati. Kao što je i očekivano, za mjesec prosinac svežanj će morati raditi duže.

Promjena masenog protoka u svežnju gorivnih članaka prikazana je na slici 39.



Slika 39. Maseni protok vodika u svežanj gorivnih članaka

Maseni protok vodika u svežanj je u skladu s prvim Faradayevim zakonom proporcionalno ovisan o struji koju proizvodi tako da je oblik krivulje za maseni protok jednak obliku krivulje za struju svežnja. Maksimalni maseni protok vodika koji će svežanj koristiti će iznositi 0,042 kg/h. Masa potrošenog vodika prikazana je na slici 40.



Slika 40. Masa potrošenog vodika u svežnju gorivnih članaka

Vidljivo je iz grafa da treba osigurati oko 0,5 kg vodika za prosječni dan u lipnju odnosno 0,65 kg vodika za prosječni dan u prosincu kako bi gorivni članci mogli pokriti dio potrošnje za vrijeme odsutnosti sunčevog ozračenja.

Grubi proračun učinkovitosti gorivnih članaka:

Iz podataka dobivenih simulacijom može se grubo izračunati kolika je bila učinkovitost svežnja gorivnih članaka za ovaj konkretan slučaj [31]:

$$\eta_{FC} = \frac{E_{FC}}{m_{FC(H_2)} * H_g(H_2)} \quad (59)$$

$$P_{FC} = U_{FC} * I_{FC} \quad (60)$$

$$E_{FC} = \int P_{FC}(t) dt \quad (61)$$

Pri čemu su:

$m_{FC(H_2)}$ – ukupna masa potrošenog vodika u gorivnim člancima [kg]

$H_g(H_2)$ – gornja ogrjevna vrijednost vodika (141,7 MJ/kg)

P_{FC} – snaga koju proizvode gorivni članci [W]

E_{FC} – električna energija koju su proizveli gorivni članci [J]

Simulacijom za mjesec lipanj dobiveni su sljedeći podaci:

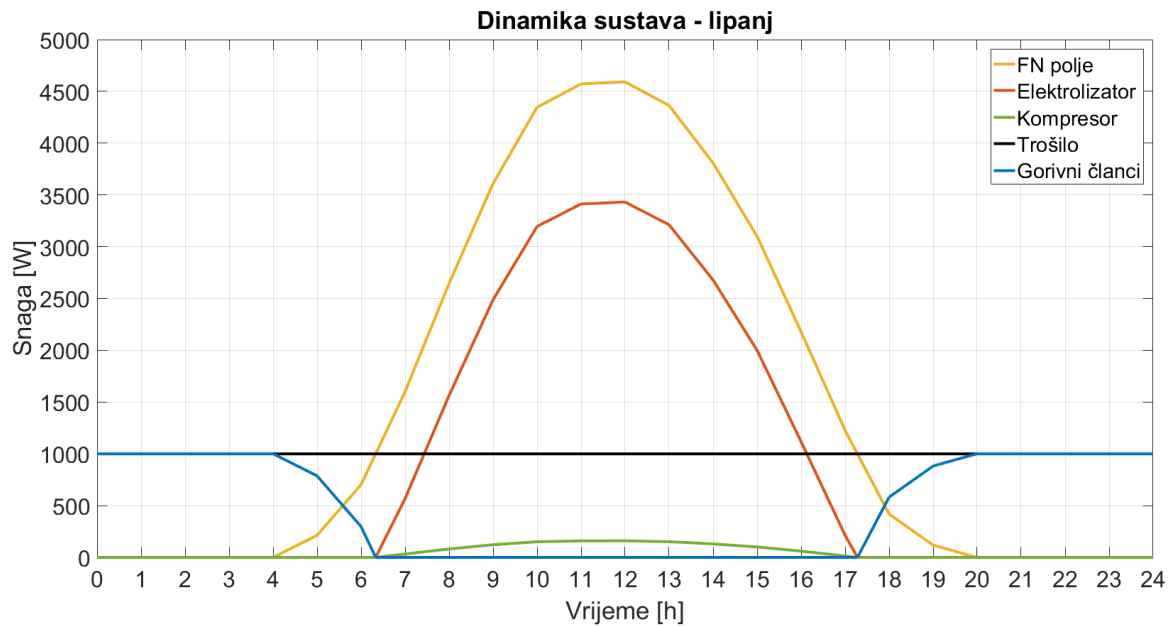
$$M_{FC(H_2)} = 0,47 \text{ kg}$$

$$E_{FC} = 4,047 * 10^7 \text{ J}$$

Iz čega slijedi:

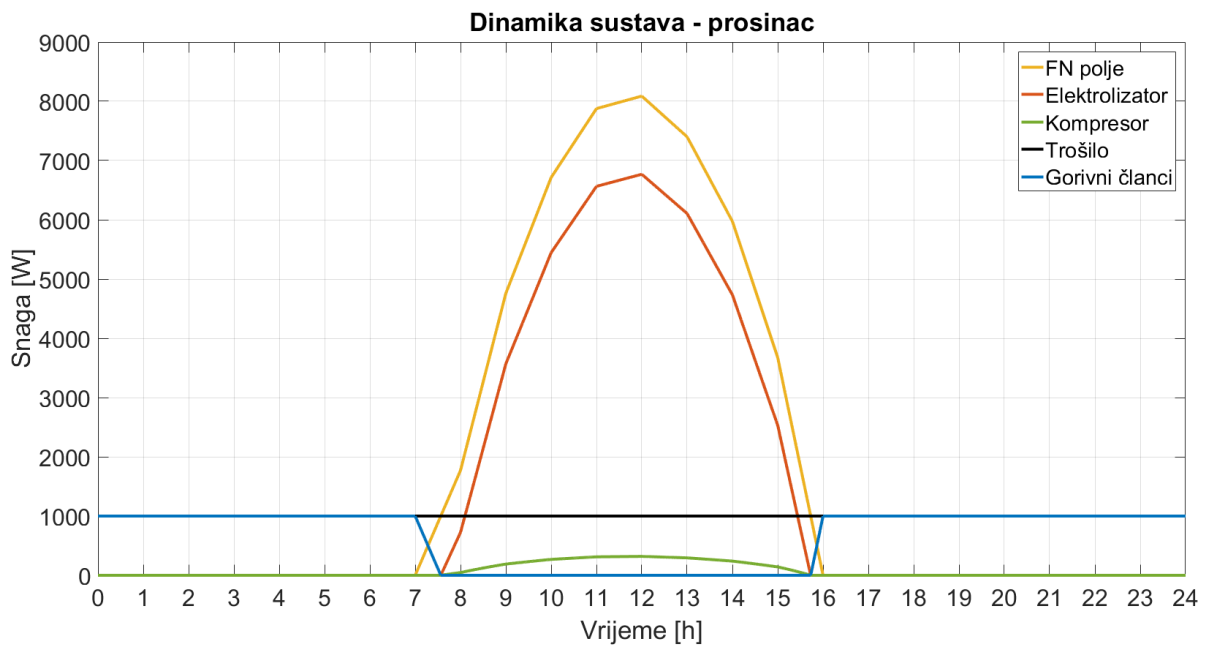
$$\eta_{FC} = 60,76 \%$$

Ponašanje svih komponenti u sustavu vidljivo je iz sljedećih slika:



Slika 41. Ponašanje sustava za jedan dan u lipnju

Slika 41. pokazuje da se uz maksimalnu snagu FN polja od oko 4500 W, nešto manje od 3500 W troši na rad elektrolizatora, 1000 W na trošilo i oko 160 W na rad kompresora. Slika 42. pokazuje da se uz maksimalnu snagu FN polja od oko 8000 W, nešto manje od 6700 W troši na rad elektrolizatora, 1000 W na trošilo i oko 320 W na rad kompresora.



Slika 42. Ponašanje sustava za jedan dan u prosincu

Iz slika 41. i 42. može se vidjeti kako se ponaša sustav s određenim ulaznim parametrima i kakvi su razmjeri potrošnje energije iz različitih komponenti. Ujedno se može primjetiti da treba postojati znatno veća instalirana nominalna snaga FN polja kako bi sustav mogao pokriti sve gubitke koji se javljaju u procesu proizvodnje vodika, komprimiranja i pretvorbe istog natrag u električnu energiju.

Jasno se vidi i da je najveći potrošač energije elektrolizator te da je rad kompresora zanemariv u odnosu na rad elektrolizatora.

Iz slika se može naslutiti da značajno povećanje kapaciteta za pokrivanje potreba u prosincu slijedi iz činjenice da je zimi znatno manja insolacija nego ljeti, štoviše ne samo da je manja po iznosu nego i broj sunčanih sati je manji po zimi. To znači da se u vrlo ograničenom vremenskom periodu moraju pokriti potrebe potrošača energije i osigurati dovoljan višak energije koja bi se mogla pretvoriti u vodik.

4.6. Kapaciteti sustava

U tablici 1 prikazani su kapaciteti sustava FN polja, elektrolizatora, kompresora, spremnika vodika i svežnja gorivnih članaka.

Tablica 1. Kapaciteti sustava

Komponente	Mjerna jedinica	Slučaj lipanj	Slučaj prosinac
FN polje			
Broj modula	-	120	495
Ukupna površina modula	m ²	110,45	455,6
Nominalna snaga modula	kW	0,12	
Ukupna snaga polja	kW	14,4	59,4
Elektrolizator			
Površina elektroda	cm ²	300	300
Broj elektroda	-	22	22
Maksimalna proizvodnja vodika	Nm ³ /h	0,79	1,35
Potrebna snaga elektrolizatora	kW	3,43	6,77
Kompresor			
Maksimalni tlak	bar	64	100
Maksimalna snaga	W	160	320
Spremnik vodika			
Volumen	m ³	0,1	0,1
Svežanj gorivnih članaka			
Broj gorivnih članaka	-	24	
Maksimalna snaga	kW	1	

Iz tablice se mogu vidjeti rasponi u kojima opisani sustav mora biti ako se želi pokriti potrošnju od 1 kW. Ako se sustav dimenzionira kao za slučaj lipanj, onda će sustav moći za taj jedan mjesec raditi kontinuirano. Dimenzije ovakvog sustava prvenstveno predstavljaju neki minimum koji se mora udovoljiti kako bi sustav mogao funkcionirati. Ako se sustav dimenzionira kao za slučaj prosinac, onda će sustav moći raditi kroz cijelu godinu neprekidno jer mjesec prosinac kao mjesec s najmanjim sunčevim ozračenjem predstavlja kritični dio godine za proizvodnju energije iz FN polja.

Jasno je da je potrebna razmjerno velika površina FN polja kako bi se mogla proizvoditi potrebna količina energije i to ne samo za prosinac nego i za lipanj. Razlog tomu je što su FN moduli napravljeni od amorfnog silicija, koji imaju manju učinkovitost od monokristalnih ili polikristalnih modula.

4.7. Analiza troška

U tablici 2 prikazani su troškovi glavnih komponenti sustava.

Tablica 2. Tablica troškova

	Jedinični trošak	Lipanj	Prosinac
FN moduli	0,42 EUR/W	6048 EUR	24948 EUR
Elektrolizator	6,500 EUR/(Nm ³ /h)	5135 EUR	8775 EUR
Kompresor	3 EUR/W [32]	480 EUR	960 EUR
Spremnik vodika	13,74 EUR/kWh [33]	270 EUR	406 EUR
Svežanj gorivnih članaka	458 EUR/kW [34]	458 EUR	458 EUR
Ukupni trošak		12391 EUR	35547 EUR

Iz tablice troškova vidljivo je kako trošak FN modula čini najveći dio ukupnog troška sustava, i to za oba slučaja. Za mjesec lipanj on iznosi 49% ukupnog troška, a za mjesec prosinac 70%. Drugi po redu najveći trošak je trošak elektrolizatora, koji iznosi 41% ukupnog troška za slučaj lipanj odnosno 25% za slučaj prosinac.

Ujedno je vidljivo kako je najveća razlika u trošku između dva slučaja upravo kod FN modula, gdje je za slučaj prosinac trošak čak 4,125 puta veći nego za trošak u slučaju lipnju. Zanimljivo je napomenuti da je za slučaj prosinac maksimalna snaga samo 1,7 puta veća od maksimalne snage nego u slučaju lipnju (što se može vidjeti iz slike 27.)

Ukupni trošak za slučaj prosinac je 2,87 puta veći od ukupnog troška za slučaj lipanj, što pokazuje koliki utjecaj ima sunčevo ozračenje na dimenzije sustava i njegovo ponašanje.

5. Zaključak

U ovom radu razrađen je autonomni sustav za proizvodnju i pohranu električne energije koji nudi rješenje problema intermitentnosti sunčeve energije. Rješenje se vidi u implementaciji tehnologija temeljenih na vodiku kao spremniku energije. Implementacija takvih tehnologija će omogućiti pouzdanu opskrbu energijom bez popratnih štetnih emisija.

Simulacije su vršene za dva dana u godini, jedan dan koji predstavlja prosječni ljetni dan i jedan dan koji predstavlja koji prosječni zimski dan. Na temelju tih simulacija može se odrediti koliki su minimalni kapaciteti potrebni za postojanje autonomnog sustava s ovakvim profilom potrošnje, te koliki su kapaciteti potrebni da sustav može raditi kroz cijelu godinu i zadovolji potrebe potrošača.

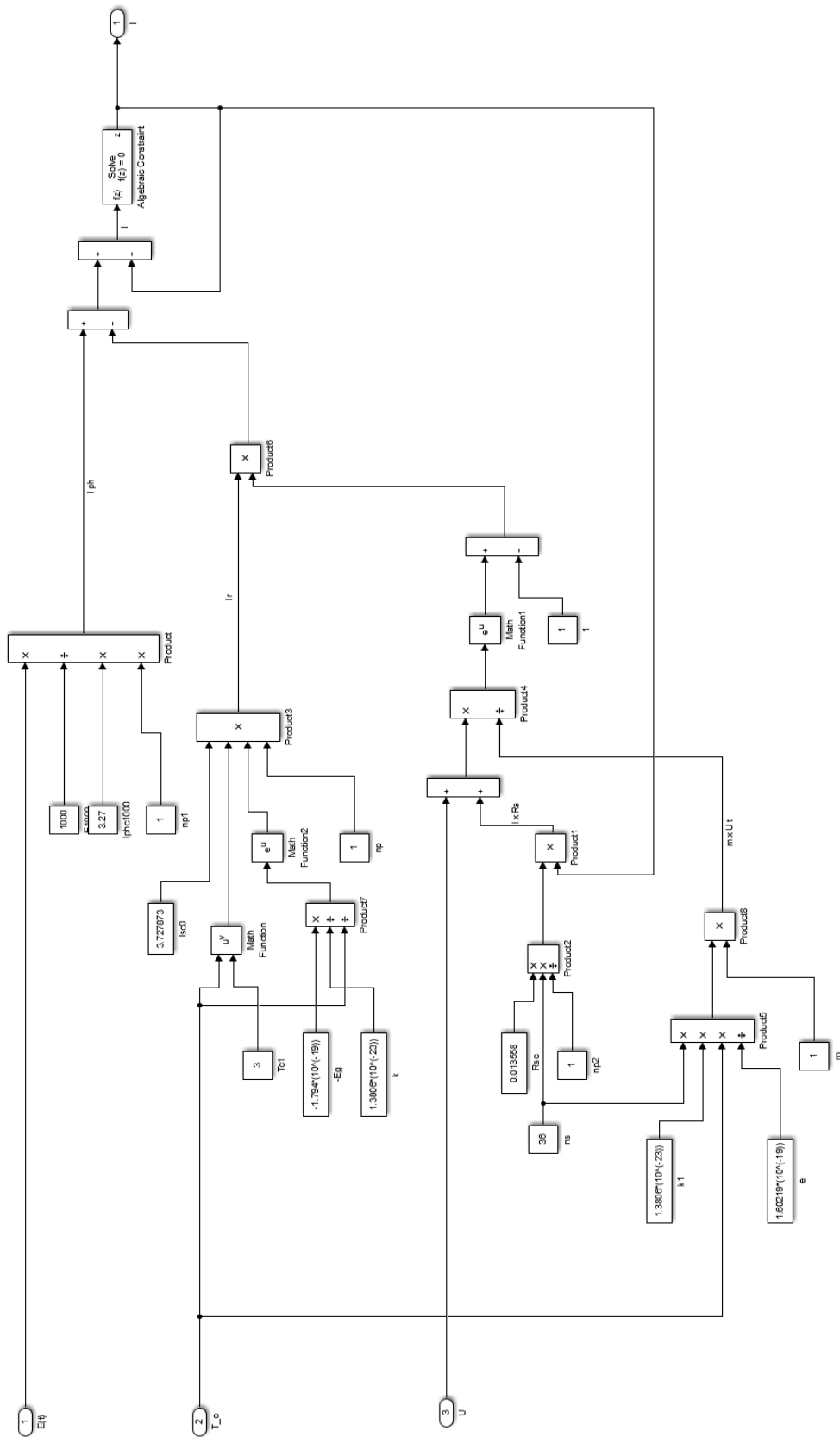
Za slučaj lipanj sustav se sastoji od 120 FN modula od amorfnog sicilija, ukupne površine oko 110 m² i nominalne snage 14,4 kW, elektrolizatora od 3,43 kW, kompresora od 160 W, spremnika vodika od 100 l i svežnja gorivnih članaka od 1 kW. Takav sustav stoji 12 391 EUR. Za slučaj prosinac sustav se sastoji od 495 FN modula od amorfnog sicilija, ukupne površine oko 456 m² i nominalne snage 59,4 kW, elektrolizatora od 6,77 kW, kompresora od 320 W, spremnika vodika od 100 l i svežnja gorivnih članaka od 1 kW. Takav sustav stoji 35 547 EUR. Takav sustav ujedno ima mogućnost cjelogodišnjeg rada. U slučaju da se želi dimenzionirati sustav koji bi radio manje od jedne godine, recimo samo za ljetne mjeseci u godini, možemo s određenom sigurnošću tvrditi da će se cijena takvog sustava kretati u rasponu 12 391 EUR – 35 547 EUR.

Rezultat ovog rada je model koji se može koristiti za dimenzioniranje svih ključnih komponenti za funkcioniranje autonomnog sustava za proizvodnju i pohranu električne energije.

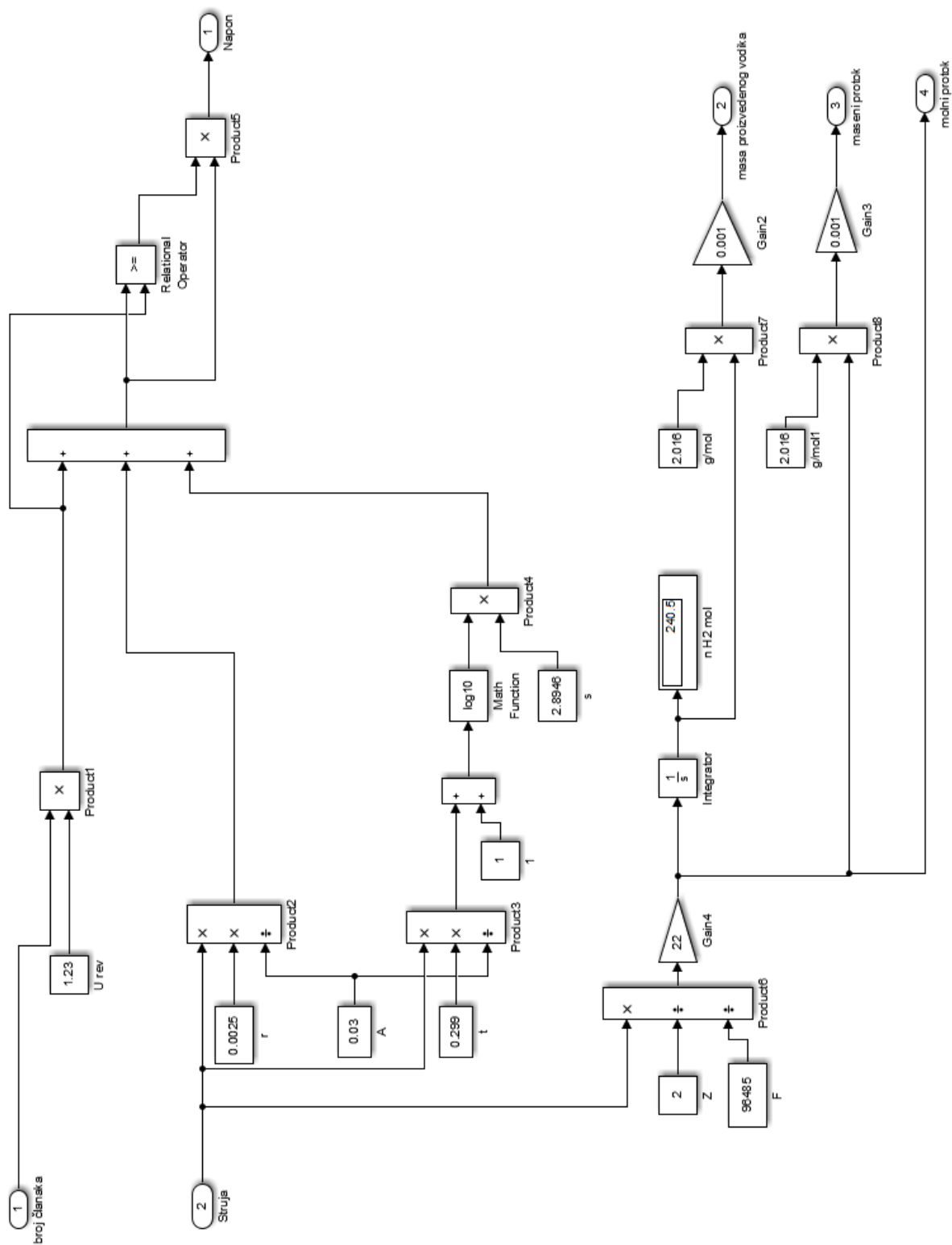
Popis literature

- [1] »EIA,« [Mrežno]. Available: <https://www.eia.gov/energyexplained/solar/photovoltaics-and-electricity.php>.
- [2] »altestore,« [Mrežno]. Available: <https://www.altestore.com/howto/solar-panels-pv-and-voltages-a98/>.
- [3] »energy sage,« [Mrežno]. Available: <https://www.energysage.com/solar/101/monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels/>.
- [4] »pveducation,« [Mrežno]. Available: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/modules-and-arrays/module-circuit-design>.
- [5] »energyinformative,« [Mrežno]. Available: <https://energyinformative.org/amorphous-silicon-solar-panels/>.
- [6] »solarsystem,« [Mrežno]. Available: <http://ba.solarsystem-supplier.com/info/the-advantages-and-disadvantages-of-mono-poly-31676006.html>.
- [7] »energy.gov,« [Mrežno]. Available: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis>.
- [8] »science direct,« [Mrežno]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/alkaline-water-electrolysis>.
- [9] »atlas copco,« [Mrežno]. Available: <https://www.atlascopco.com/en-uk/compressors/products/processairgasequipment/reciprocating-compressors/dmseriescompressors>.
- [10] »eere,« [Mrežno]. Available: https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/liquefaction_comp_pres_praxair.pdf.
- [11] »energy.gov,« [Mrežno]. Available: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/gaseous-hydrogen-compression>.
- [12] »rixindustries,« [Mrežno]. Available: <https://www.rixindustries.com/commercial-compressors/hydrogen-compressors/2tx>.
- [13] »engineeringtoolbox,« [Mrežno]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html.
- [14] »fortressuav,« [Mrežno]. Available: <https://www.fortressuav.com/doosan/hydrogen-tank>.
- [15] »ieahydrogen,« [Mrežno]. Available: http://ieahydrogen.org/pdfs/Special-Reports/HIA_Storage_G-P_Final_with_Rev.aspx.
- [16] »fuelcelltoday,« [Mrežno]. Available: <http://www.fuelcelltoday.com/technologies/pemfc>.

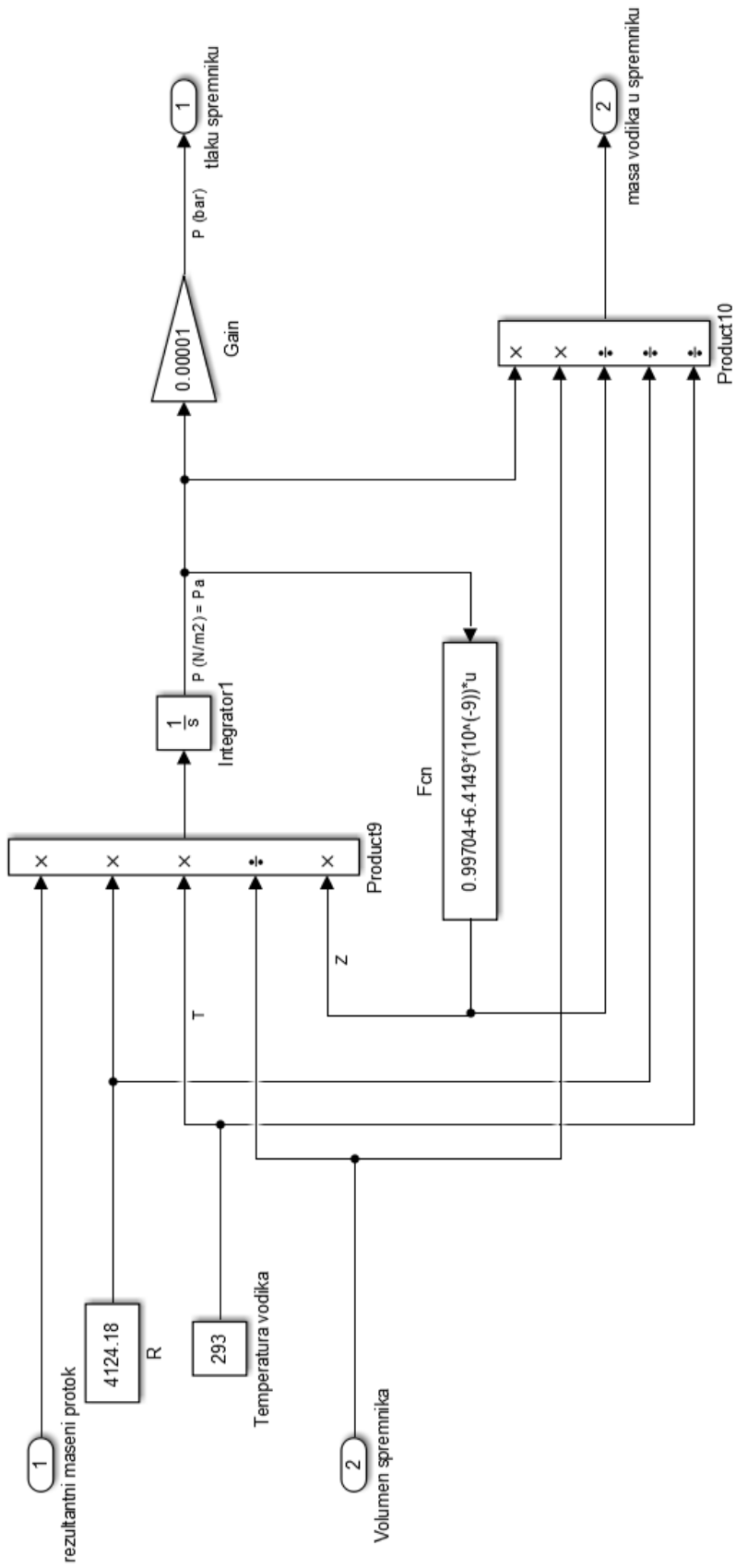
- [17] »antig,« [Mrežno]. Available: http://www.antig.com/technology/technology_fuel_cell_types.htm.
- [18] »italtec,« [Mrežno]. Available: <http://www.italtec.it/iemms03.htm>.
- [19] »scirp,« [Mrežno]. Available: https://www.scirp.org/html/4-1770016_42166.htm.
- [20] M. Miri, »Autonomous solar-hydrogen power system,« 2012.
- [21] »hvdc,« [Mrežno]. Available: https://hvdc.ca/webhelp/Master_Library_Models/Sources/Maximum_Power_Point_Tracker.htm.
- [22] »solarquotes,« [Mrežno]. Available: <https://www.solarquotes.com.au/inverters/mppt/>.
- [23] »PVGIS,« [Mrežno]. Available: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html.
- [24] »timeanddate,« [Mrežno]. Available: <https://www.timeanddate.com/>.
- [25] »pveducation,« [Mrežno]. Available: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/modules-and-arrays/nominal-operating-cell-temperature>.
- [26] Ø. Ulberg, »Stand-alone power systems for the future: optimal design, operation & control of solar-hydrogen energy systems,« 1998.
- [27] »sciencedirect,« [Mrežno]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319908012093>.
- [28] »l2ep,« [Mrežno]. Available: <http://l2ep.univ-lille1.fr/pagesperso/francois/IJHE09.pdf>.
- [29] »iri,« [Mrežno]. Available: <http://www.iri.upc.edu/files/scidoc/1276-Experimental-Characterization-Methodology-for-the-Identification-of-Voltage-Losses-of-PEMFC:-Applied-to-an-Open-Cathode-Stack.pdf>.
- [30] »research gate,« [Mrežno]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Ideal-and-actual-V-I-characteristics-of-the-PEM-fuel-cell-PEMFC_fig2_329366206.
- [31] »sciencedirect,« [Mrežno]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/fuel-cell-efficiency>.
- [32] »chemicalprocessing,« [Mrežno]. Available: <https://www.chemicalprocessing.com/articles/2014/how-much-will-your-compressor-installation-cost/>.
- [33] »ncbi,« [Mrežno]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6630991/>.
- [34] »researchgate,« [Mrežno]. Available: https://www.researchgate.net/publication/223668476_Technical_design_and_economic_evaluation_of_a_PEM_fuel_cell_system.



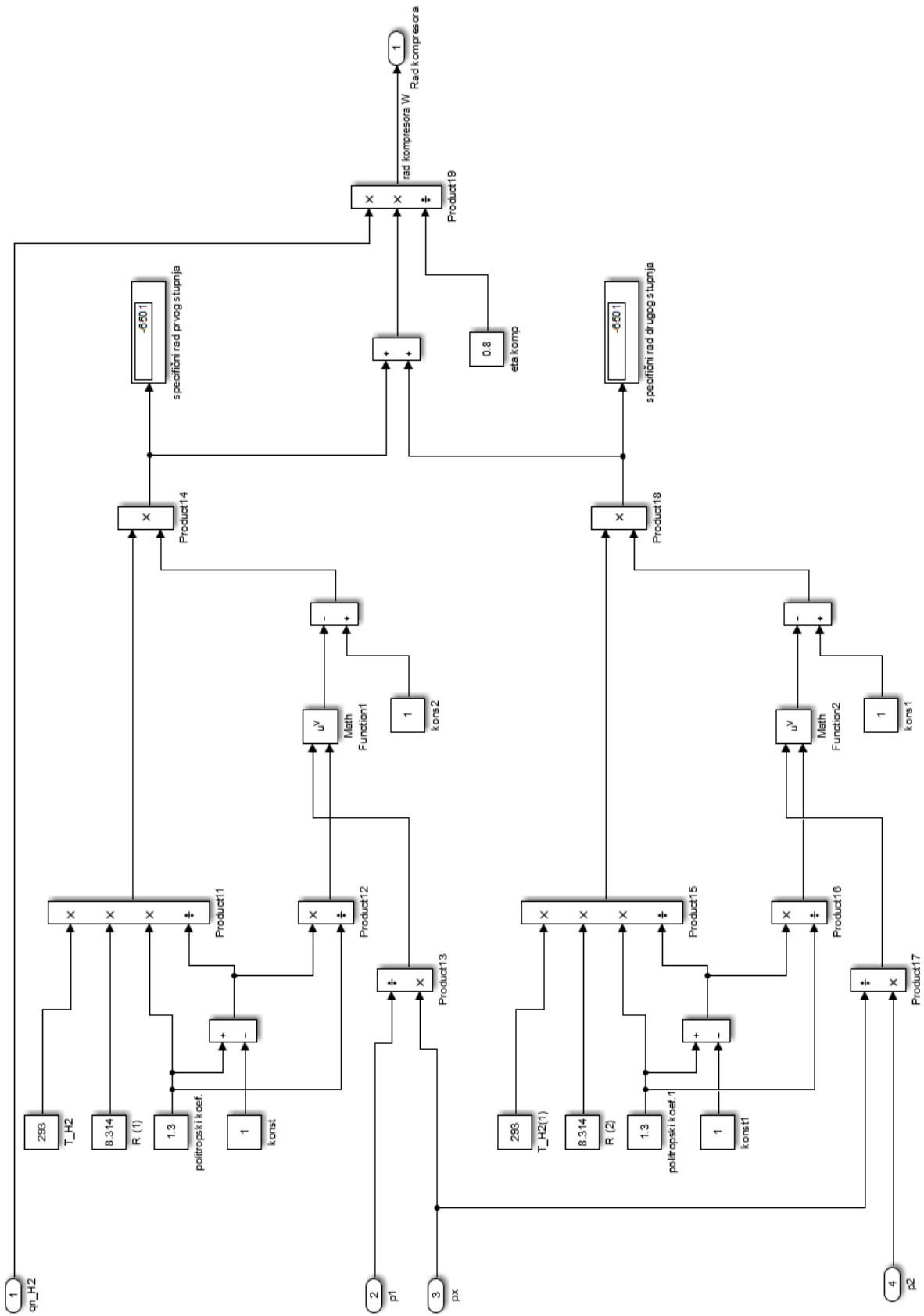
Slika 43. Simulink model FN članka



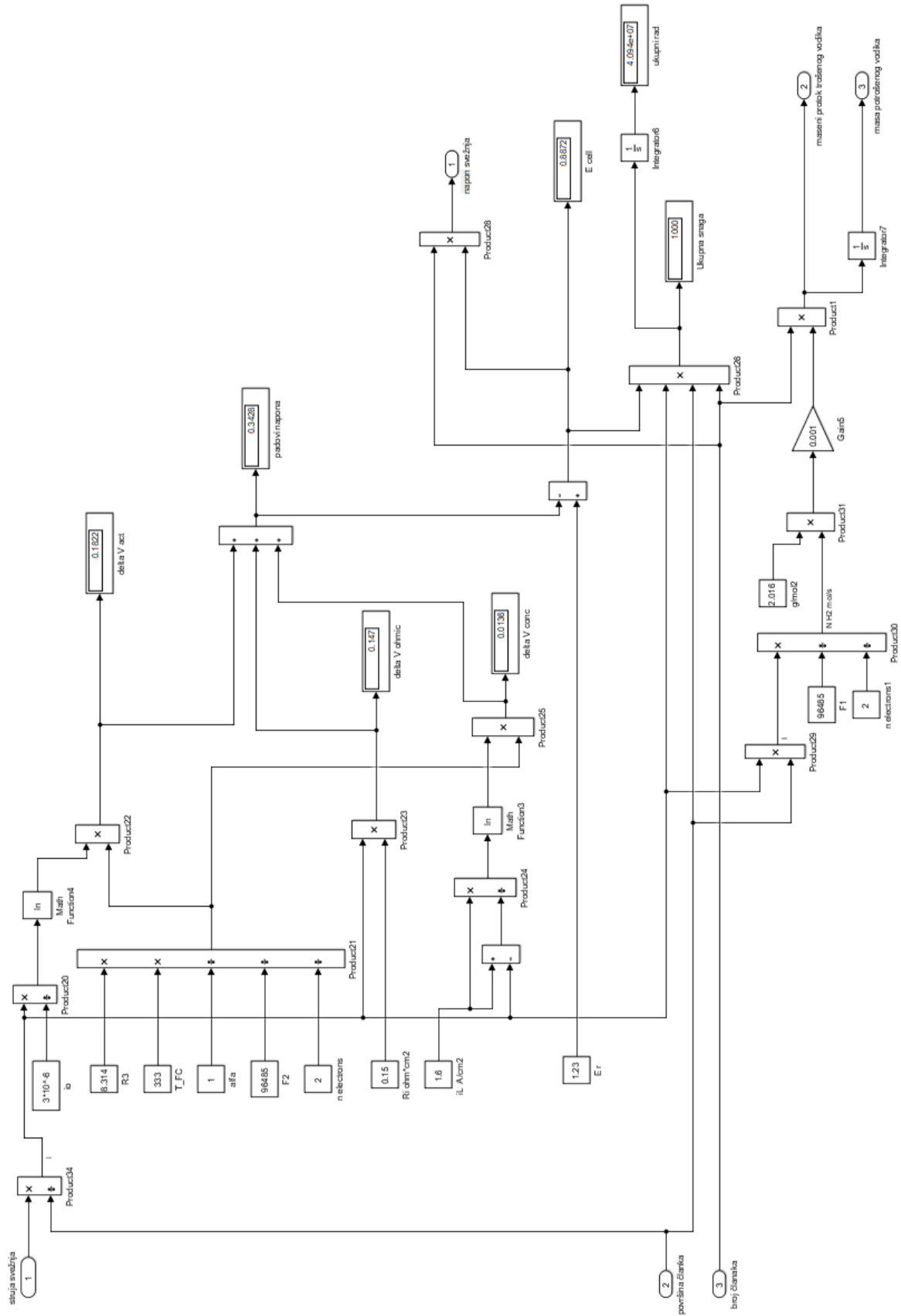
Slika 44. Simulink model elektrolizatora



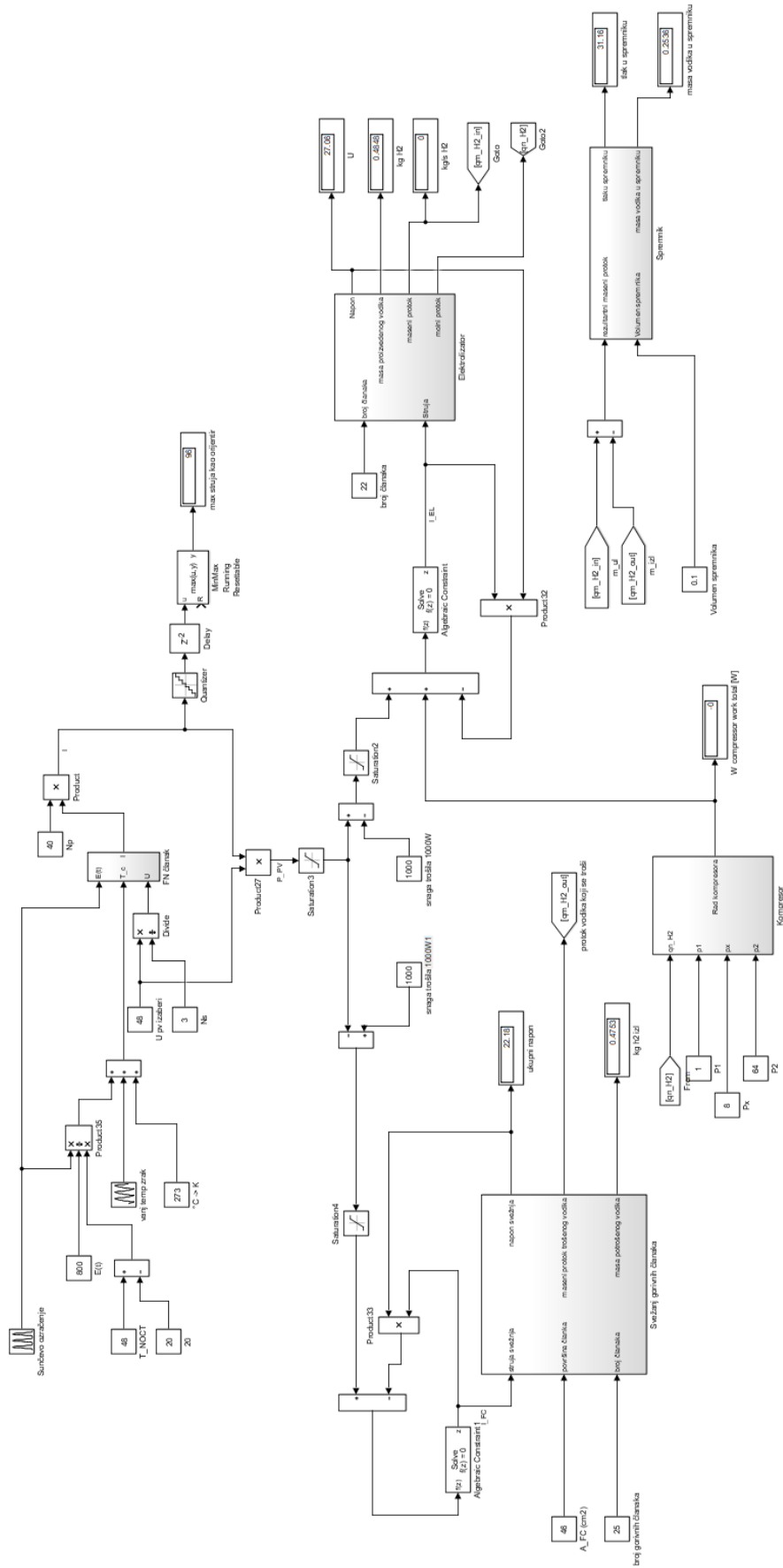
Slika 45. Simulink model spremnika vodika



Slika 46. Simulink model kompresora



Slika 47. Simulink model sveznja gorivnih članaka



Slika 48. Simulink model cijelog sustava