

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet elektrotehnike i računarstva

Ante Brizić, Luka Koščak, Luka Mandić, Karlo Mlakar,
Jurica Papak, Ornela Rodić

**Razvoj sklopovlja i programske podrške
za agregiranje korisnika elektroenergetske
mreže**

Zagreb, 2018

Ovaj rad izrađen je na Zavodu za visoki napon i energetiku pod vodstvom izv.prof.dr.sc. Hrvoja Pandžića i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2017./2018.

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Pokusni hladnjak i opis sustava	5
2.1	Vivax MF45	5
2.2	Sklopovlje modula i način integracije	6
3	Mjerenje potrošnje	8
3.1	Mjerenje struje	8
3.1.1	Digitalni ampermetar ACS712	8
3.1.2	Spajanje u krug hladnjaka	9
3.1.3	Prikupljanje podataka	10
3.2	Mjerenje napona	12
3.3	Estimacija faze	15
3.3.1	Uzorkovanje signala	15
3.3.2	Uklanjanje faznog pomaka uzrokovanog A/D pretvorbom	15
3.3.3	Estimacija faze pomoću FFT-a i <i>Zero Crossing</i> metode	16
3.3.4	Usporedba FFT i <i>Zero Crossing</i> metode	16
3.3.5	Estimacija faznog pomaka realnih signala	21
4	Algoritam modula izvora fleksibilnosti	26
4.1	Povezivanje na WiFi i postupak u slučaju nepravilnosti	27
4.2	Učenje karakteristika hladnjaka i suradnja s agregatorom	28
4.3	Poteškoće u radu modula i potencijalna rješenja	30
5	Agregatorski algoritam	31
5.1	Verzija 1 - Trenutno gašenje uređaja na zahtjev	32
5.2	Verzija 1.5 - Prirodna kompenzacija	33
5.3	Verzija 2 - Ograničenje snage	34
6	Simulacija	36
6.1	Stvaranje uzorka za provedbu simulacija	36
6.2	Determinističke <i>offline</i> simulacije	37

6.2.1	Provedba i rezultati simulacije	37
7	Procjena za razvoj vlastitog elektroničkog modula	42
7.1	Relejni modul	43
7.2	AC/DC pretvarač	44
8	Zaključak	47

Popis slika

1.1	Prirodni ciklus uređaja i upravljanje	3
2.1	Shema električnog kruga hladnjaka	5
2.2	Blokovska shema sustava u hladnjaku	7
3.1	Digitalni ampermetar ACS712	9
3.2	Prikaz tipičnog načina spajanja digitalnog ampermetra ACS712	9
3.3	Blokovsko-shematski prikaz sklopa za mjerenje potrošnje	10
3.4	Arduino kod za prikupljanje podataka s ACS712	11
3.5	Prikaz podataka s ACS712 uređaja na Serial plotteru Arduina	12
3.6	Električka shema sklopa za mjerenje napona	13
3.7	Tiskana pločica za mjerenje napona	14
3.8	Valni oblik napona učitani na mikrokontroleru	14
3.9	Elektronicka shema napajanja pločice za mjerenje napona	15
3.10	Generirani signali za simulaciju	17
3.11	Signali nakon filtriranja	18
3.12	Spektar filtriranih signala	19
3.13	Signali za određivanje faznog pomaka <i>Zero Crossing</i> metodom	19
3.14	Usporedba relativnih pogrešaka estimacije faze FFT i <i>Zero Crossing</i> metode	20
3.15	Relativne pogreške za fazni pomak od $\pi/6$	21
3.16	Uzorci napona i struje nakon A/D pretvorbe	22
3.17	Napon i struja nakon poravnavanja	22
3.18	Napon i struja nakon filtriranja	23
3.19	Spektar napona i struje	24
3.20	Segment signala za <i>zero crossing</i> metodu	25
4.1	Prikaz automata stanja modula	26
5.1	Očekivani odziv sustava na prirodnu kompenzaciju	32
5.2	Upravljanje jednim hladnjakom	33
5.3	Prikaz izračuna trenutka kompenzacije	33
6.1	Grafičko sučelje za provjeru rada pojedinog simuliranog hladnjaka	37
6.2	Slobodni odziv sustava na impuls uz <i>level</i> = 0.5	38
6.3	Slobodni odziv sustava na impuls uz <i>level</i> = 0.5 i <i>percentage</i> = 0.3	39
6.4	Optimalan odziv sustava	40

7.1	Relejni modul	43
7.2	Električna shema relejnog modula	43
7.3	220AC-5DC Silazni pretvarač	44
7.4	Elektronička shema flyback pretvarača	45

Popis tablica

6.1	Definicija stanja uređaja	36
7.1	Sastavnica glavnih komponenti elektroničkog modula	42
7.2	Popis potencijalnih kontrolera flyback pretvarača	46

Popis kratica

DIF - Distribuirani Izvori Fleksibilnosti

GND - Ground (uzemljenje)

IP - Internet Protocol

VCC - Voltage Common Collector (zajednički napon napajanja)

AC/DC - Alternating Current/Direct Current (pretvarač izmjenične u istosmjernu struju)

ADC - Analog-Digital Converter (analogno-digitalni pretvarač)

FFT - Fast Fourier Transform (brza Fourierova transformacija)

DFT - Discrete Fourier Transform (diskretna Fourierova transformacija)

ML - Maximum Likelihood (maksimalna izglednost)

DTFT - Discrete Time Fourier Transform (vremenski diskretna Fourierova transformacija)

EEPROM - Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory

SSID - Service Set Identifier

HTML - Hypertext Markup Language

H - Heaviside step function (Heavisideova funkcija jediničnog skoka)

LED - Light Emitting Diode (svijetleća dioda)

TEE - Tržište Električne Energije

PNP - Vrsta bipolarnog tranzistora, sa slojevima redom dopiranim pozitivno-negativno-pozitivno

Popis oznaka

t, τ - vrijeme [s]

T - temperatura [$^{\circ}\text{C}$]

U - napon [V]

I - struja [A]

R - električni otpor [Ω]

C - električni kapacitet [F]

f - frekvencija [Hz]

φ - kut [$^{\circ}$]

T_s - vrijeme otipkavanja [s]

P - snaga [W]

δ - devijacija [%]

1. Uvod

Osnovni preduvjet pogona elektroenergetskog sustava je jednakost proizvodnje i potrošnje. Budući da su kupci električne energije slobodni trošiti električnu energiju prema vlastitim željama i potrebama, regulaciju, odnosno uravnoteženje proizvodnje i potrošnje električne energije, pružaju konvencionalne elektrane (hidroelektrane, termoelektrane). Međutim, integracijom obnovljivih izvora energije, čija je proizvodnja električne energije slabo predvidiva i promjenjiva u vremenu, sve je teže korištenjem elektrana uravnoteživati elektroenergetski sustav [1]. Naime, neupravljivi obnovljivi izvori energije, poput vjetroelektrana i solarnih elektrana, ne samo da povećavaju zahtjeve za resursima koji uravnotežuju sustav, već i smanjuju snagu konvencionalnih elektrana u pogonu. Stoga se zahtjev za uravnoteženje sustava seli s proizvodne strane na potrošnju. Kako bi potrošači sudjelovali u uravnoteženju elektroenergetskog sustava, potrebno je "aktivirati" fleksibilnost koja kod njih postoji [2]. **Fleksibilnost** se definira kao sposobnost sustava da dovoljno brzo i na odgovarajući način odgovori na nagle promjene u proizvodnji i potrošnji u elektroenergetskom sustavu.

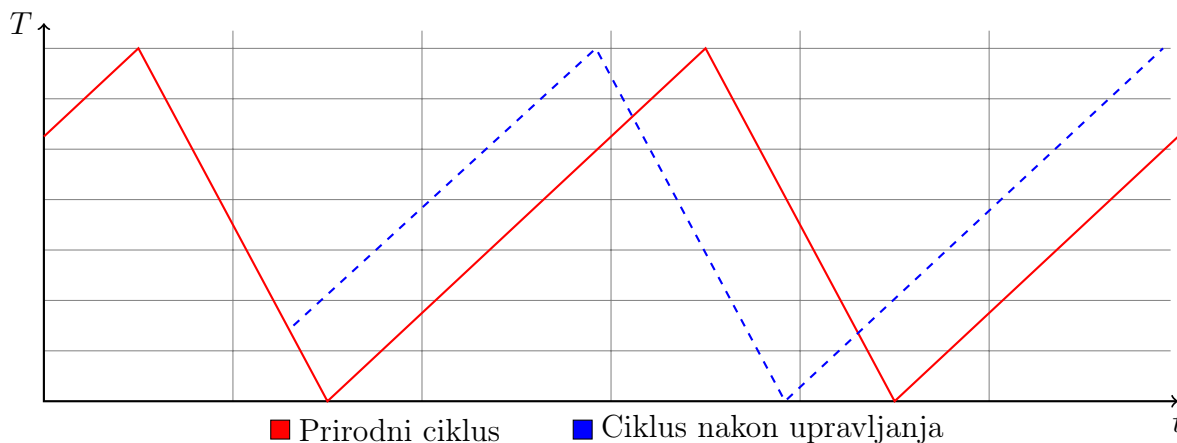
Aktivni potrošači energije središnji su dio zakonodavnog paketa „Čista energija za sve Europljane“ kojeg je Europska Komisija donijela krajem 2016. godine. U predmetnom se paketu definiraju načela koja traže da se osigura formiranje cijena električne energije na temelju potražnje, omogućiti kupcima da se koriste tržišnim mogućnostima te potakne tržišno sudjelovanje potrošača i malih poduzeća. Novi model tržišta električne energije jača položaj kupaca s fleksibilnom potrošnjom u svrhu bolje integracije obnovljivih izvora energije [3].

Do sada su krajnji kupci uglavnom bili nefleksibilni, tj. nisu imali mogućnost mijenjati potrošnju ovisno o signalima s tržišta. Uvođenjem novog modela tržišta javlja se nova skupina fleksibilnih kupaca. Najjednostavniji primjer takvih kupaca su distribuirani izvori fleksibilnosti (DIF) koji na zahtjev mogu mijenjati vlastiti obrazac potrošnje električne energije. Takvu uslugu mogu pružati uređaji i sustavi poput pametne bijele tehnike, električnih vozila, grijalica, bojlera, klimatizacijskih sustava i toplinskih crpki. Aktivacija fleksibilnih resursa krajnjih kupaca, osim ostvarivanja nove fleksibilnosti u elektroenergetskom sustavu, rezultirat će dodatnim приходima, odnosno uštedama za krajnje kupce [4]. Gotovo svako kućanstvo može postati DIF uspostavljanjem sustava upravljanja i komunikacija u potencijalno fleksibilna trošila. Međutim, ta su trošila u pravilu premalih snaga da bi mogla sudjelovati izravno na tržištu električne energije ili pomoćnih usluga. Stoga je potrebno okrupniti takve male pružatelje fleksibilnosti.

Agregator, kao novi subjekt na tržištu koji djeluje u ime udruženih DIF-ova, trguje njihovim agregiranim nalogima kako bi ostvario profit članovima koje agregira [5].

Ovaj rad opisuje prototip upravljačko-komunikacijskog uređaja koji se može ugraditi u agregirani uređaj korisnika elektroenergetske mreže, čime bi on postao DIF. Idealni uređaji prisutni u većini kućanstava koji se mogu koristiti u svrhu agregacije su **hladnjaci i grijači**. Odlikuju ih relativno velike snage, velika brzina uključivanja/isključivanja te pouzdanost. Osim kućanskih hladnjaka i bojlera, uređaj je moguće ugraditi i u klimatizacijske uređaje ili veće hladnjače u trgovinama, mesnicama, slastičarnama, itd. Svi navedeni sustavi rade na vrlo sličan način te se njima jednako upravlja. Ovaj rad je usmjeren na agregaciju hladnjaka zbog niske cijene i jednostavnosti rastavljanja, ali isti se princip može primijeniti na bilo koje druge uređaje.

Princip rada opisanih uređaja dan je na slici 1.1, gdje je prikazan ciklus stacionarnog stanja hladnjaka (crvenom bojom). Ciklus je pojednostavljen i služi isključivo za vizualizaciju. Stvarni ciklus ovisi o vrsti hladnjaka i načinu korištenja, prvenstveno broju i trajanju otvaranja vrata. Period oscilacija u praksi varira od 15 minuta do nekoliko sati, ovisno o snazi i zapremnini hladnjaka. Kompresor ugrađen u hladnjake pokušava održati konstantnu vrijednost temperature u hladnjaku, no zbog prirode procesa to ne uspijeva. Iz tog se razloga temperatura kreće između donje, T_{min} , i gornje, T_{max} . Važno je uočiti da hlađenje hladnjaka traje kraće od zagrijavanja.



Slika 1.1: Prirodni ciklus uređaja i upravljanje

Agregirano pružanje usluge rezerve operatoru sustava sastoji se od upravljanja većim brojem hladnjaka. Ukoliko se radi o potrebi za gašenjem uređaja, ugasiće se oni koji rade u ciklusu hlađenja u nekom nasumičnom trenutku τ . Važno je uočiti da se pritom **prosječna snaga nije promijenila** jer se, osim što se uređaj isključio ranije, smanjilo i trenutno vrijeme grijanja. Iz tog se razloga ovim načinom agregacije nije zaista smanjila potrošnja, već je samo odgođena u vremenu.

Razvijeni uređaj, osim upravljanja hladnjakom, komunicira s centralnom aplikacijom agregatora koji je u mogućnosti upravljati tisućama takvih uređaja kako bi iskoristio njihovu fleksibilnost i njima optimalno upravljao. Naravno, pritom je iznimno bitno da se ne naruše ograničenja hladnjaka. To su prvenstveno ograničenja temperature koja uvijek mora biti unutar zadanih granica. Također, osnovno svojstvo razvijenog uređaja je da samostalno komunicira

s aplikacijom agregatora i upravlja uređajem kako se ne bi narušio komfor niti opterećivalo korisnika.

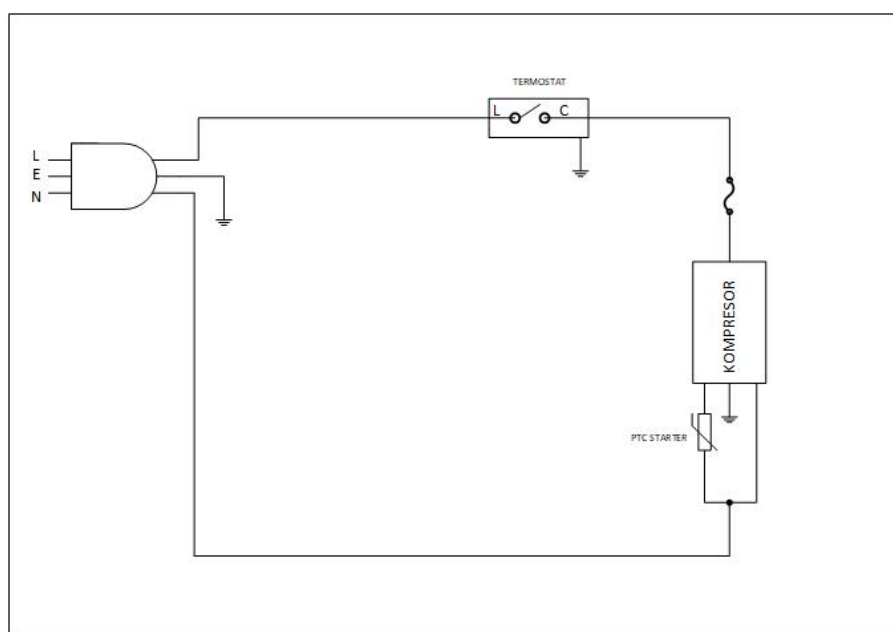
2. Pokusni hladnjak i opis sustava

2.1 Vivax MF45

Kao probna platforma korišten je hladnjak Vivax MF45, zapremnine 45 l i snage kompresora 55 W. Hladnjak je relativno jednostavan, bez ugrađenog digitalnog prikaznika, elektronike ni svjetla. Komponente od interesa su termostat i kompresor.

Kompresor ima dva funkcionalna stanja, upaljen i ugašen. Sadrži internu zaštitu od pregrijavanja i prečestog paljenja/gašenja. Zbog inercije rashladnog sredstva, učinak hlađenja zadržava se određen period nakon gašenja kompresora, kao i učinak zagrijavanja, iako je potonji puno kraći.

Termostat je mehanički binarni element koji na temelju temperature koju osjeća kratko spaja ili otvara svoje kontakte. Kratko spojeni kontakti zatvaraju krug kompresora i pritom ga uključuju, a otvoreni kontakti isključuju. Termostatom se može namještati željena referenca. Zbog ove uloge, u početnoj izvedbi koristi se termostat za potrebu praćenja reference. Shema električnog kruga hladnjaka prikazana je na slici 2.1.



Slika 2.1: Shema električnog kruga hladnjaka

Bez dodatnih preinaka, u hladnjaku su dostupna samo tri izvoda napajanja, L, N i E, odnosno faza, nula i uzemljenje. Na ove izvode standardno je spojen termostat. Budući da je termostat spojen u seriju s kompresorom, kao što je vidljivo na slici 2.1, izvode nije moguće iskoristiti za potrebe napajanja modula. Ovo u praksi ne predstavlja problem jer u većini hladnjaka postoji interno svjetlo koje je uvijek spojeno paralelno kompresoru, izvodima faze i nule (L, N). To znači da se i modul može paralelno napajati iz tih izvoda, pri tome ne ometajući normalan rad hladnjaka. Mogući problemi koji iz ovoga proizlaze su teško dostupno ugrađeno svjetlo ili nedostatak prostora u kućištu hladnjaka za dimenzije modula.

2.2 Sklopovlje modula i način integracije

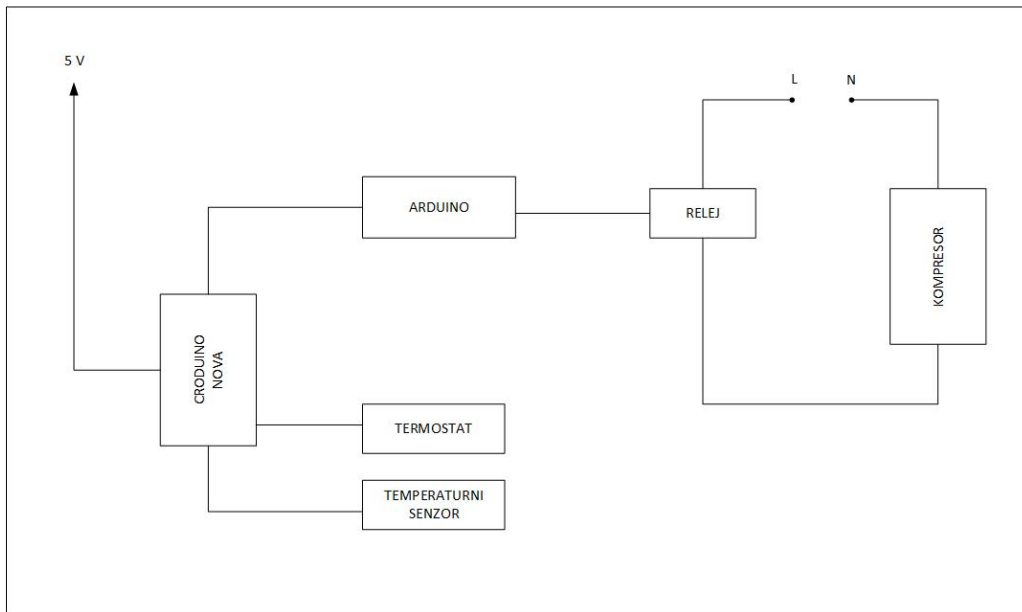
Sustav je izveden na način da je termostat premošten upravljivim relejem (kompresor je u potpunosti pod kontrolom modula) dok je sam termostat i dalje spojen na modul koji provjerava je li termostat u stanju vođenja ili ne. Ovo se koristi kako bi se zadržala informacija o referenci, odnosno da modul može naučiti granice rada hladnjaka, i kako bi korisnik mogao i dalje mijenjati referencu. Više o ovome i o nadogradnji nalazi se u poglavlju 4.3.

Sustav prikazan na slici 2.2 sastoji se od WiFi modula i mikrokontrolera Croduino Nova¹, na kojeg su povezani termometar, termostat te relej, koji uklapa i isklapa kompresor preko Arduina. Arduino ovdje služi isključivo kao pretvarač logike, iz 3.3 V u 5 V potrebnih releju. Sustav je napajan AC/DC konverterom koji daje 5 V na izlazu. Tih 5 V regulatori napona na samom Croduinu Nova spuštaju na 3.3 V. Valja napomenuti da je ovo moguće izvesti puno jednostavnije, bez Arduina kao pretvarača logike i bez čitave pločice Croduino Nova. Za kontrolu i bežičnu povezanost dovoljan je samo ESP modul, koji bi preko dodatnog tranzistora mogao upravljati relejem, a posredno i hladnjakom. Napajanje s potrebnih 3.3 V te 5 V bilo bi tada izvedeno kao diskretna komponenta.

Termostat ima dvije stezaljke za napajanje koje uklapa i isklapa te uzemljenje. Jedna stezaljka napajanja spojena je na 3.3 V a druga na ulaz Croduino Nove te preko *pull-down* otpornika na uzemljenje. Ovime je osigurano da ulaz u mikrokontroler nikad nije u stanju visoke impedancije (kad termostat nije uklopljen).

Trenutno korišteni digitalni termometar je DS18B20, koji ima žicu napajanja (5 V), uzemljenja te podatkovnu žicu kojom komunicira koristeći *One-wire interface*. Podatkovna žica mora biti preko *pullup* otpornika spojena na napajanje.

¹Mikrokontroler i popratno integrirano sklopovlje na tiskanoj pločici, zasnovano na Arduino platformi; <https://www.arduino.cc/>



Slika 2.2: Blokovska shema sustava u hladnjaku

3. Mjerenje potrošnje

Kako bi se mogao izraditi vjerodostojan model isplativosti sustava za upravljanje hladnjakom kao distribuiranim izvorom fleksibilnosti, potrebno je znati potrošnju hladnjaka. Korišteni uređaj za mjerenje potrošnje, EDIMAX SP-2101W, za faktor snage pretpostavlja vrijednost 1, što ga čini nepreciznim za naše potrebe. Iz tog razloga javlja se potreba za vlastitom implementacijom mjerenja potrošnje. Uređaj se sastoji od digitalnog ampermetra (ACS712) i pločice za mjerenje napona. Prikupljajući podatke s tih uređaja i njihovom daljnom analizom proračunat je faktor snage VIVAX MF-45 hladnjaka koji se koristi u daljnjem postupku izrade modela.

Postupak mjerenja potrošnje i sve komponente tog sustava se vrlo vjerojatno ne bi ugrađivale u konačan proizvod s obzirom da je potrošnja svih uređaja u prosjeku jednaka, a ugrađivanje ovakvog sustava je preskupo i ekonomski neisplativo. Naime, sam sklop za mjerenjenje faznog oblika napona puno je skuplji od ostalih komponenti konačnog proizvoda.

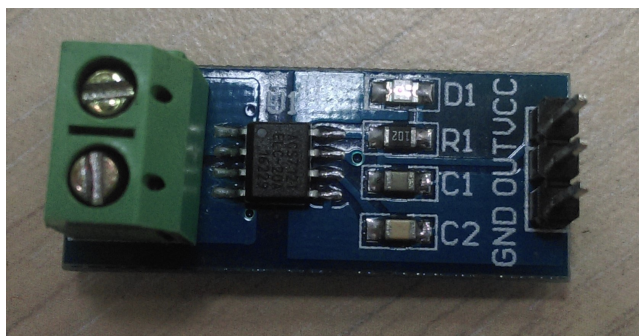
3.1 Mjerenje struje

3.1.1 Digitalni ampermetar ACS712

Digitalni ampermetar ACS712 jednostavan je elektronički uređaj s integriranim, preciznim linearnim Hallovim senzorom. Struja teče kroz bakreni vodič i na elektrone koji se gibaju djeluje magnetska sila. Zbog djelovanja magnetske sile dolazi do razdvajanja naboja na površini te nastaje Hallovo električno polje. Proces razdvajanja naboja traje tako dugo dok Hallovo polje ne počne djelovati na elektrone istom silom kao i magnetsko polje. Nakon postignute ravnoteže dviju sila, struja i dalje teče u izvornom smjeru, a sa strana vodiča sada mjerimo Hallov napon koji je proporcionalan struji.

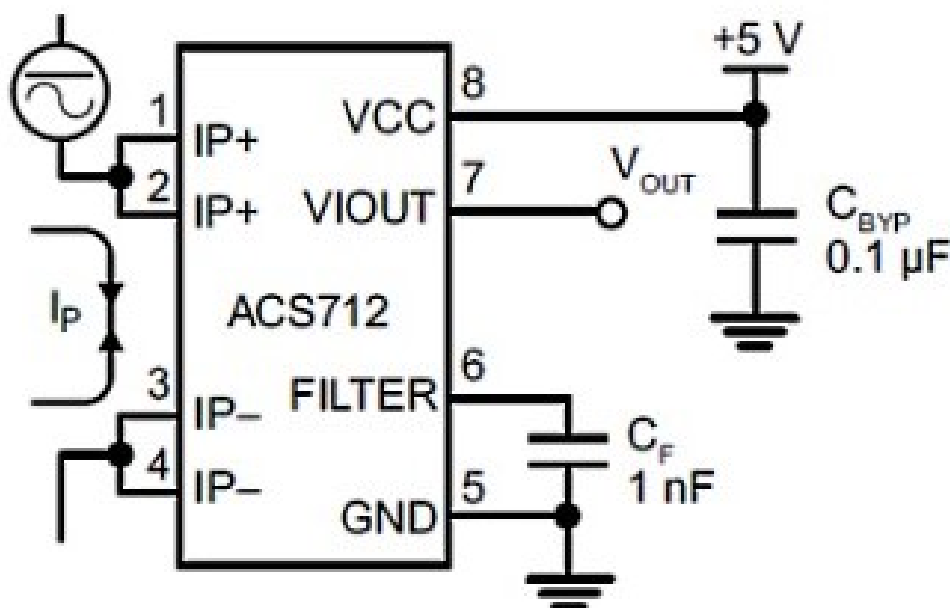
$$U_H \sim I \quad (3.1)$$

Optimalna točnost uređaja postiže se blizinom magnetskog signala Hallovom senzoru. Tipičan unutarnji otpor vodljivog puta iznosi 1.2 mΩ, što uzrokuje minimalan gubitak snage na njemu. Na slici 3.1 prikazan je ACS712 uređaj kojim je mjerena struja.



Slika 3.1: Digitalni ampermetar ACS712

Raspon rada uređaja je od -20 A do 20 A, a njegova izlazna karakteristika iznosi 100 mV/A. Ta je relacija korištena prilikom programiranja Arduina koji prikuplja podatke o struji, odnosno čita trenutne vrijednosti napona s uređaja u kratkim vremenskim razmacima koji su proporcionalni vrijednosti struje. Ti naponi prosljeđeni su programskom paketu Matlab gdje se korištenjem poznate izlazne karakteristike 100 mV/A računaju stvarne vrijednosti struje [6]. Način spajanja ACS712 uređaja prikazan je na slici 3.2



Slika 3.2: Prikaz tipičnog načina spajanja digitalnog ampermetra ACS712

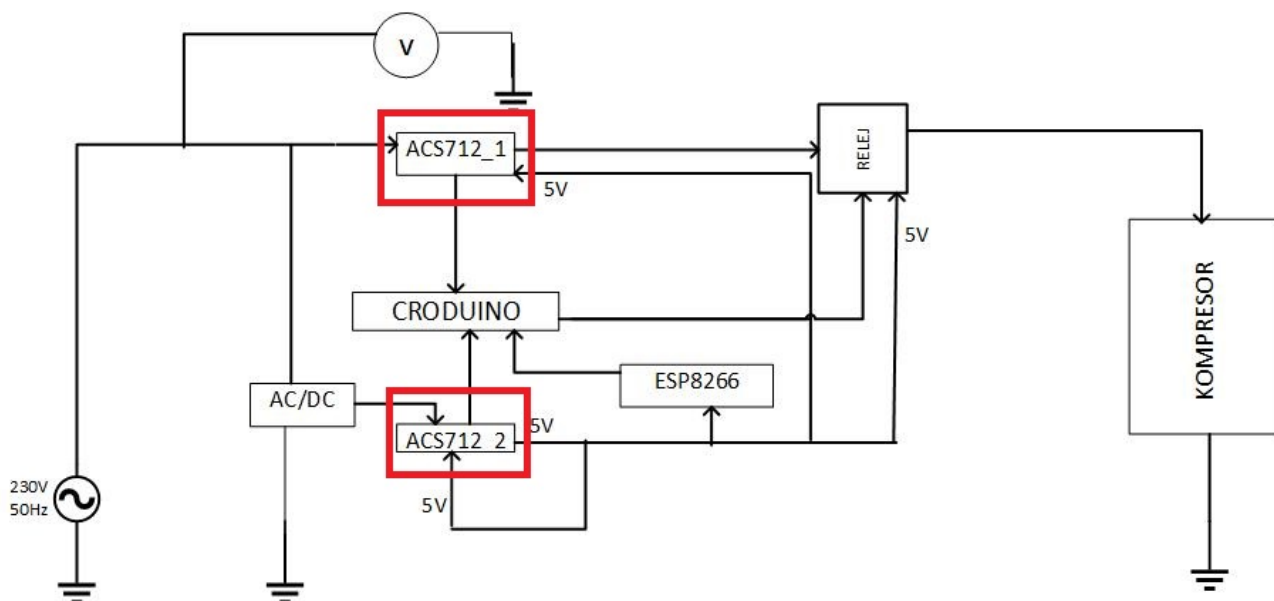
3.1.2 Spajanje u krug hladnjaka

Digitalni ampermetar ACS712 spaja se u krug hladnjaka serijski. Vodiči, kroz koje teče struja, koju se želi izmjeriti, spoje se na priključnice IP+ i IP-, pazeći pritom u slučaju DC struje da se pozitivna i negativna stezaljka spoje na odgovarajuće priključnice. Napajanje za ACS712 uređaj spaja se na VCC pin (napajanje), GND ide na GND (uzemljenje) Arduina, a OUT na

analogni pin Arduina s kojeg se čitaju vrijednosti napona. Uređaj je napajan s 5 V. Budući da u našem krugu imamo dva takva uređaja, jedan se napaja izravno s vanjske mreže, pomoću AC/DC pretvarača, a drugi pomoću Arduina.

U krugu hladnjaka korištena su dva ACS712 uređaja. Prvi se koristi za mjerenje struje samog hladnjaka koja je potrebna za izračun faktora snage i potrošnje, dok se drugi strujni senzor koristi za mjerenje struje, odnosno potrošnje elektronike koju dodatno unosimo u sustav. Bitno je naglasiti da je mjerenje potrošnje na ovaj način samo za eksperimentalne i prototipne svrhe jer unose nepotreban trošak u projektiranju finalnog proizvoda.

Na slici 3.3 prikazana je shema cijelog sklopa za upravljanje hladnjakom te su označeni ACS712 uređaji - (1) mjeri struju hladnjaka, a (2) mjeri struju elektronike. Voltmetar na slici zapravo predstavlja vlastito proizvedenu pločicu koja prikazuje faznu razliku signala koja je ključna za ukupni faktor snage. Naime, budući da je hladnjak spojen na mrežno napajanje 230 V, nema smisla mjeriti napon voltmetrom, već je potreban vektorski analizator koji će nam dati informaciju o amplitudi i fazi napona.



Slika 3.3: Blokovo-shematski prikaz sklopa za mjerenje potrošnje

3.1.3 Prikupljanje podataka

Na slici 3.4 prikazan je kod za Arduino pomoću kojeg se čitaju podaci s ACS712 uređaja, te se ti podaci prikazuju u Serial Plotteru (slika 3.5) gdje se vidi sinusni valni oblik struje.

U prvoj petlji čitaju se vrijednosti s oba ACS712 uređaja te vrijednost napona s pločice za mjerenje napona. Strujni senzori spojeni su na pinove A1 (DC struja kroz elektroniku) i A3 (AC struja hladnjaka). Za period sinusnog valnog oblika struje eksperimentalno je dobivena

```

int napon[160];
int hall_v1[160];
int hall_v2[160];

void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {

  for (int i=0; i <= 159; i++){

    napon[i] = analogRead(A0);
    hall_v1[i] = analogRead(A3);
    hall_v2[i] = analogRead(A1);
    delayMicroseconds(812);

  }

  for(int i=0; i <= 159; i++){
    // Serial.print("1: ");
    Serial.println(hall_v1[i]*5.0/1023);
    // Serial.print("2: ");
    // Serial.println(hall_v2[i]*5.0/1023);
    // Serial.print("3: ");
    // Serial.println((napon[i]*5.0)/1023);

  }
}

```

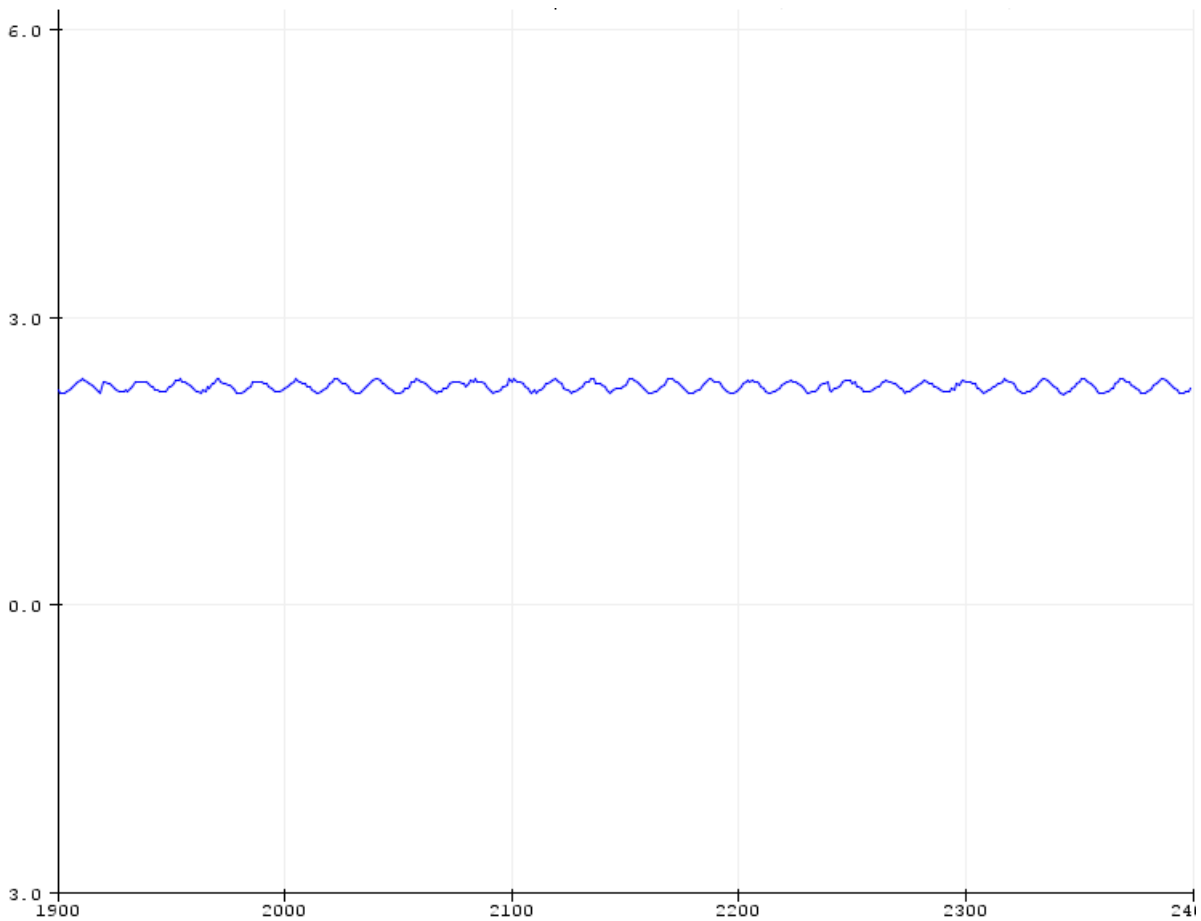
Slika 3.4: Arduino kod za prikupljanje podataka s ACS712

brojka od oko 80 uzoraka. Kako Arduino ima ograničenu memoriju i nije bilo moguće spremati više od 200 uzoraka sva tri senzora u polje, koristimo polja od 160 elemenata tipa *integer*, te su time obuhvaćena dva perioda struje, što olakšava daljnju obradu signala.

Naredba *analogRead* traje u prosjeku 116 μ s, što znači da su vrijednosti sa sva tri senzora čitane u tom razmaku. Kako bi se kasnije jednostavno mogla napraviti interpolacija signala, proizvoljno odabiremo period uzorkovanja 1160 μ s. S obzirom da u petlji postoje 3 takve naredbe, one traju 348 μ s te, da bi se dobio period uzorkovanja od 1160 μ s, dodana je naredba *delayMicroseconds*(812).

Zbog ograničenosti memorije Arduina koristimo polje integera umjesto floatova te u polja upisujemo vrijednosti koje senzori čitaju. Senzori čitaju vrijednosti napona koje se kreću od 0 do 5 V i pomoću 10-bitnog A/D pretvarača pretvaraju ih u integere u rasponu od 0 do 1023. Pri ispisu preračunavamo te vrijednosti u napon. S obzirom da se vrijednosti kreću od 0 do 5 V, formula za pretvorbu glasi:

$$5 \cdot \frac{\text{Vrijednost_sa_senzora}}{1023} \quad (3.2)$$

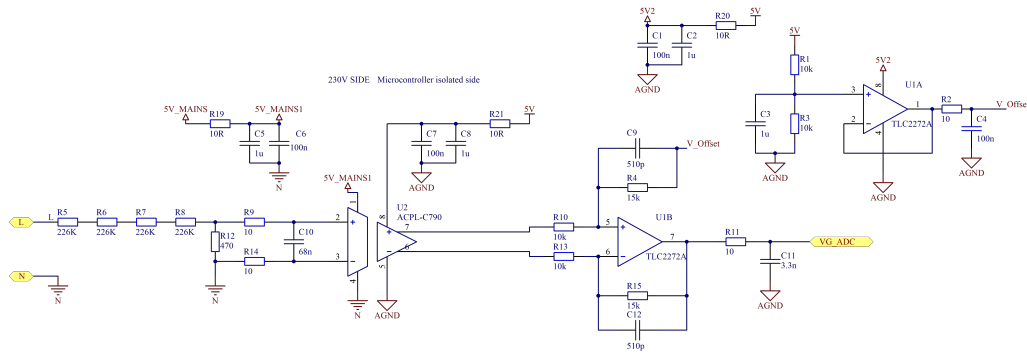


Slika 3.5: Prikaz podataka s ACS712 uređaja na Serial plotteru Arduina

Druga petlja šalje vrijednosti preko serijskog porta, a serial plotter ih interpretira i ispisuju se vrijednosti napona na Serial Monitor, odnosno Serial Plotter. Podaci s digitalnog ampermetra preračunavaju se u napon prilikom ispisa i ti podaci se šalju pomoću Python skripte u datoteku koja se kasnije poziva u Matlab kodu. U Matlab kodu se izvršava i pretvorba napona s digitalnog ampermetra u ekvivalentnu struju pomoću izlazne karakteristike acs712 uređaja (100 mV/A).

3.2 Mjerenje napona

Uz već gotovi sklop za mjerenje struje ACS712 napravljena je tiskana pločica pomoću koje je moguće prikazati valni oblik napona s mreže na ADC-u jednostavnih mikrokontrolera poput Arduino/Croduino Una [7] [8].

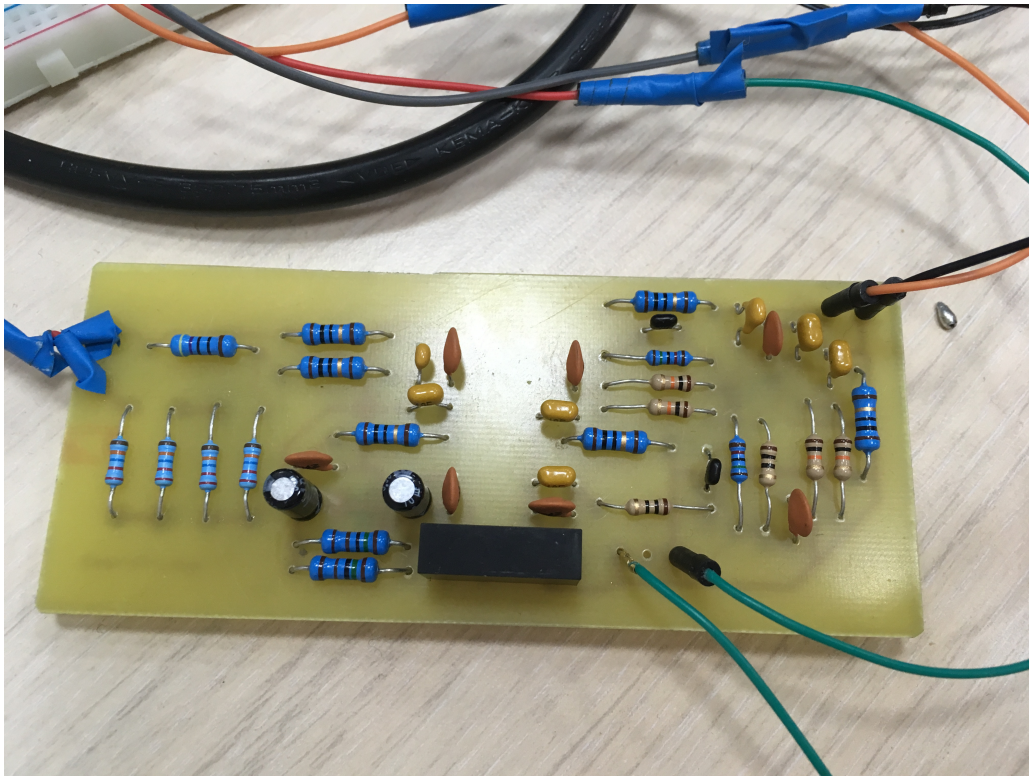


Slika 3.6: Električna shema sklopa za mjerenje napona

Na ulazu su 4 otpornika iznosa $226 \text{ k}\Omega$ čija je glavna funkcija atenuacija mrežnog, odnosno visokonaponskog signala. Glavna funkcija kondenzatora C10 iznosa 68 nF je filtracija ulaznog napona [9] [10]. Razlika napona na priključnicama optoizolacijskog operacijskog pojačala pojačala ACPL-C790 prenosi se na niskonaponsku stranu tiskane pločice koja se potom dovodi na operacijsko pojačalo pojačanja 1,5 s otpornicima R13 i R15 iznosa $10 \text{ k}\Omega$ i $15 \text{ k}\Omega$. Također, postavljena je i gornja granična frekvencija koja služi za filtraciju visokofrekvencijskih komponenti signala pomoću kondenzatora 470 pF (510 pF nisu bili dostupni u nabavi). Gornja granična frekvencija računa se na sljedeći način:

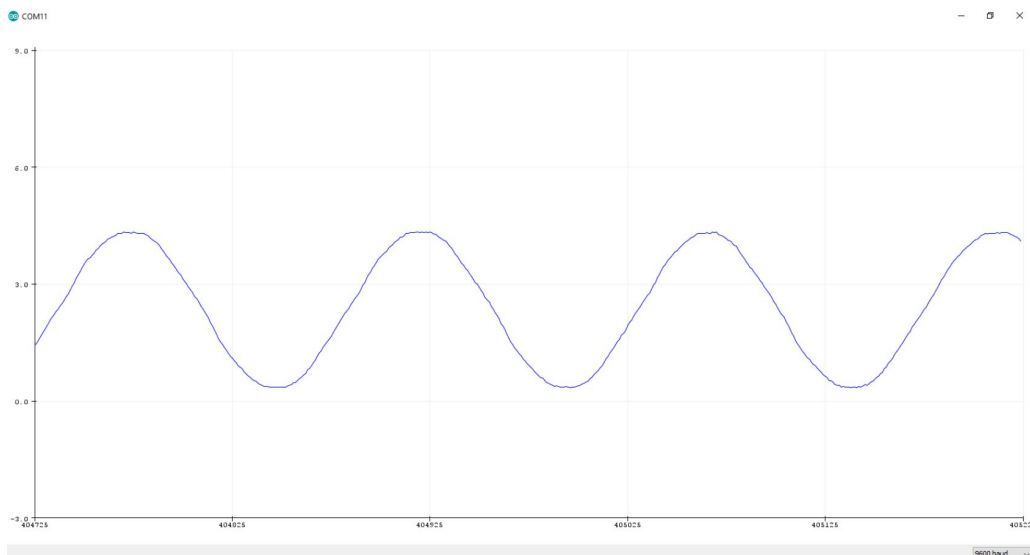
$$\begin{aligned}
 f_g &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \\
 &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 15 \text{ k}\Omega \cdot 470 \text{ pF}} \\
 &= 22,575 \text{ kHz}
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

Naponski izlaz skaliran je u rasponu od 0 do 5 V, sa srednjom vrijednošću 2.5 V, što je izvedeno operacijskim pojačalima i jednostavnim djelilom s dva otpornika iznosa $10 \text{ k}\Omega$, nazivnog napona 5 V. Konačni se signal prenosi na ADC mikrokontroler koji uzorkovanjem može rekonstruirati realni sinusni signal s ulaza s informacijom o fazi koja nam je upravo presudna za izračun faktora snage. Tiskana pločica vidljiva je na slici 3.7.

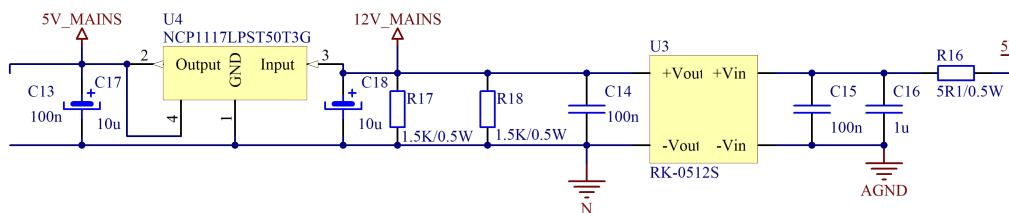


Slika 3.7: Tiskana pločica za mjerenje napona

Realni parametri očekivano odstupaju od idealnih. Iznos DC komponente umjesto 2.5 V iznosi 2.47 V, a iznos RMS vrijednosti AC komponente na izlazu iznosi 1.47 V (izmjereno multimetrom). Frekvencija je ostala nepromijenjena (50 Hz), a sam sinusni signal rekonstruiran pomoću ADC prikazan je na slici 3.8.



Slika 3.8: Valni oblik napona učitani na mikrokontroleru



Slika 3.9: Elektronicka shema napajanja pločice za mjerenje napona

Električna shema napajanja pločice prikazana je na slici 3.9 i sadrži sljedeće bitne komponente: izolirani DC/DC pretvarač RK-0512S te linearni regulator NCP1117LPST50T3G. Svi kondenzatori na shemi su blokadni, dva elektrolitska kondenzatora iznosa $10\ \mu\text{F}$, a ostali keramički iznosa $100\ \text{nF}$. [7]

3.3 Estimacija faze

Kako bi se mogla odrediti potrošnja električnog uređaja, potrebno je poznavati razliku u fazi između napona i struje. Razlika u fazi φ određuje faktor snage koji iznosi $\cos(\varphi)$. U ovom projektu faza se estimira nad uzorcima otipkanim pomoću A/D pretvornika integriranog na Arduino. Za analizu podataka korišten je programski paket Matlab. Faza je estimirana korištenjem FFT-a te *zero crossing* metode [11] [12]

3.3.1 Uzorkovanje signala

Bilo je potrebno uzorkovati tri signala. Trajanje A/D pretvorbe Arduina iznosi $116\ \mu\text{s}$, što uzrokuje dodatni fazni pomak između uzoraka signala kojeg je potrebno uzeti u obzir prilikom estimacije. Signali su otipkani periodom $T_s = 1160\ \mu\text{s}$. Uzorkovanje je izvedeno tako da Arduino prvo čeka da mu se pošalje znak preko serijske veze. Nakon što detektira znak, ciklički se uzima 160 uzoraka od svakog signala periodom uzorkovanja $T_s = 1160\ \mu\text{s}$. Nakon što prikupi uzorke, Arduino ponovo čeka da mu se pošalje znak kako bi mogao početi slati uzorke signala na serijsko sučelje. Za spremanje uzoraka u zasebne datoteke napravljena je *Python* skripta `arduinoCommunication.py`. Skripta `dataForMatlab.py` priprema podatke za njihovo učitavanje u programskom paketu Matlab.

3.3.2 Uklanjanje faznog pomaka uzrokovanog A/D pretvorbom

Nakon učitavanja uzoraka signala u Matlab, nad njima se vrši interpolacija s faktorom 10 kako bi novi period uzorkovanja iznosio $T_s = 116\ \mu\text{s}$. Novi period uzorkovanja jednak je trajanju A/D pretvorbe Arduina. Uklanjanje faznog pomaka uzrokovanog A/D pretvorbom izvedeno je tako da se signalu koji je prvi uzorkovan maknu prva dva uzorka, signalu koji je drugi uzorkovan se maknu prvi i zadnji uzorak, dok se signalu koji je posljednji uzorkovan uklanjaju posljednja dva uzorka. U konačnici svi signali kreću od iste točke u vremenu te su jednakog trajanja.

3.3.3 Estimacija faze pomoću FFT-a i *Zero Crossing* metode

FFT (*engl. Fast Fourier Transform*) je naziv za skupinu algoritama koji omogućuju brzi izračun DFT (*engl. Discrete Fourier Transform*) transformacije [13] [14]. DFT razlaže signal na frekvencijske komponente, od kojih svaka ima određenu amplitudu i fazu pa se mogu uspoređivati fazni odnosi pojedinih frekvencijskih komponenata signala. Za određivanje faze pomoću FFT-a, potrebno je prvo pronaći frekvenciju u kojoj Fourierova transformacija postiže maksimum. Na taj način je dobiven ML (*engl. Maximum Likelihood*) estimator frekvencije. ML estimacija je metoda estimacije parametara statističkog modela na način da se maksimizira funkcija izglednosti [15]. Kako su mjereni signali napon i struja elektroenergetske mreže, maksimum Fourierove transformacije očekuje se u točki koja odgovara frekvenciji 50 Hz. FFT je izračunat pomoću *fft* funkcije u Matlab-u koja računa dvostrani spektar signala u intervalu od 0 do 2π . Na signal se još primijeni funkcija *fftshift* kako bi spektar išao od $-\pi$ do π . FFT predstavlja otipkani spektar DTFT-a (*engl. Discrete Time Fourier Transform*) razlučivošću frekvencije f_s/N , gdje f_s odgovara frekvenciji uzorkovanja, a N broju točaka za koje se računa FFT [14]. Provedena transformacija za svaku harmonijsku komponentu signala daje maksimum za pozitivne i negativne frekvencije. Stoga je uzet samo indeks posljednjeg maksimuma koji odgovara pozitivnoj frekvenciji.

Nakon određivanja indeksa maksimuma, faza signala računa se kao:

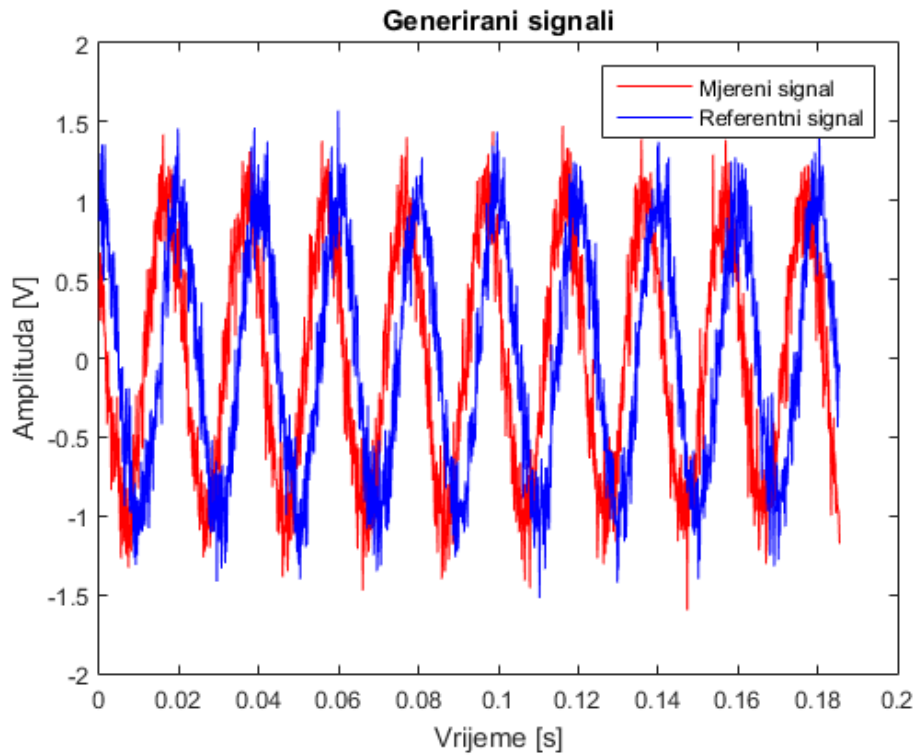
$$\phi = \arctan \frac{Q}{I} \quad (3.4)$$

U točki maksimuma. Q predstavlja imaginarnu komponentu Fourierovog transformata, a I predstavlja realnu komponentu.

Osim pomoću FFT-a, razlika u fazi između dva signala može se odrediti pomoću *zero crossing* metode. Kod *zero crossing* metode se sinusni signali pretvaraju u pravokutne impulse čija amplituda poprima vrijednosti 0 ili 1. Prolazak sinusnog signala kroz nulu u uzlaznoj putanji označava početak pravokutnog impulsa, dok prolazak kroz nulu u silaznoj putanji označava kraj. Zatim se pomoću dobivenih pravokutnih impulsa generira treći pravokutni impuls čije trajanje počinje kad započne prvi pravokutni impuls, a završava na početku drugog pravokutnog impulsa. Dobiveni su impulsi čije je trajanje proporcionalno faznom pomaku dva signala [16].

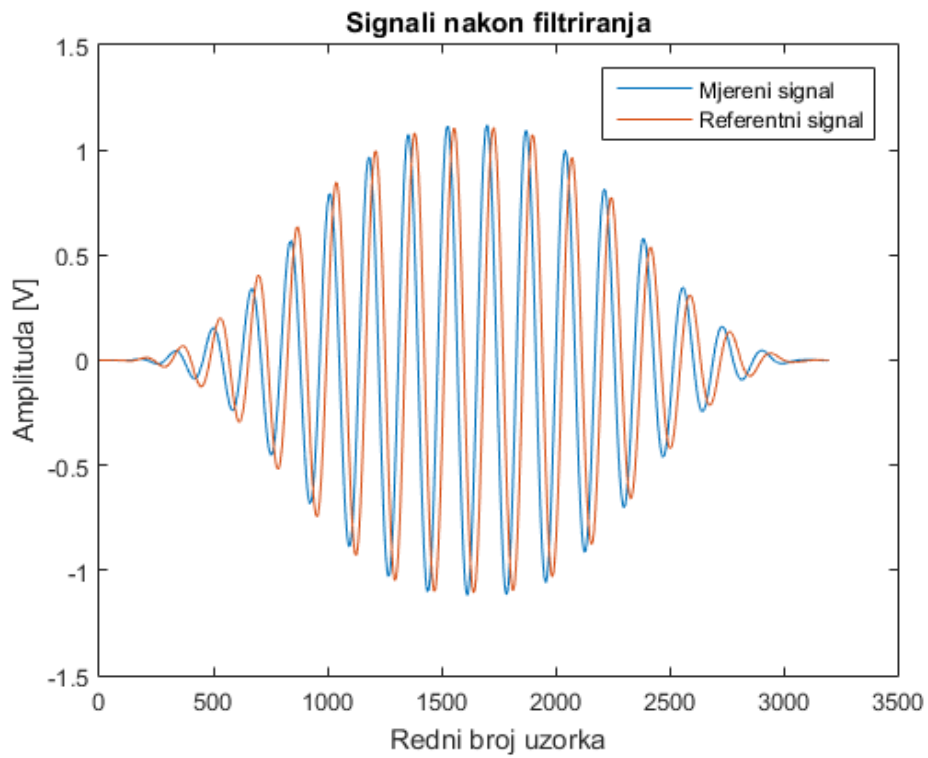
3.3.4 Usporedba FFT i *Zero Crossing* metode

Za usporedbu FFT i *zero crossing* metode napravljena je skripta za programski paket Matlab. Generirana su dva sinusna signala pomaknuta za proizvoljno zadani fazni pomak sa superponiranim bijelim šumom tako da SNR (*engl. Signal to Noise Ratio*) iznosi 32 dB. Izgled signala vidljiv je na slici 3.10.



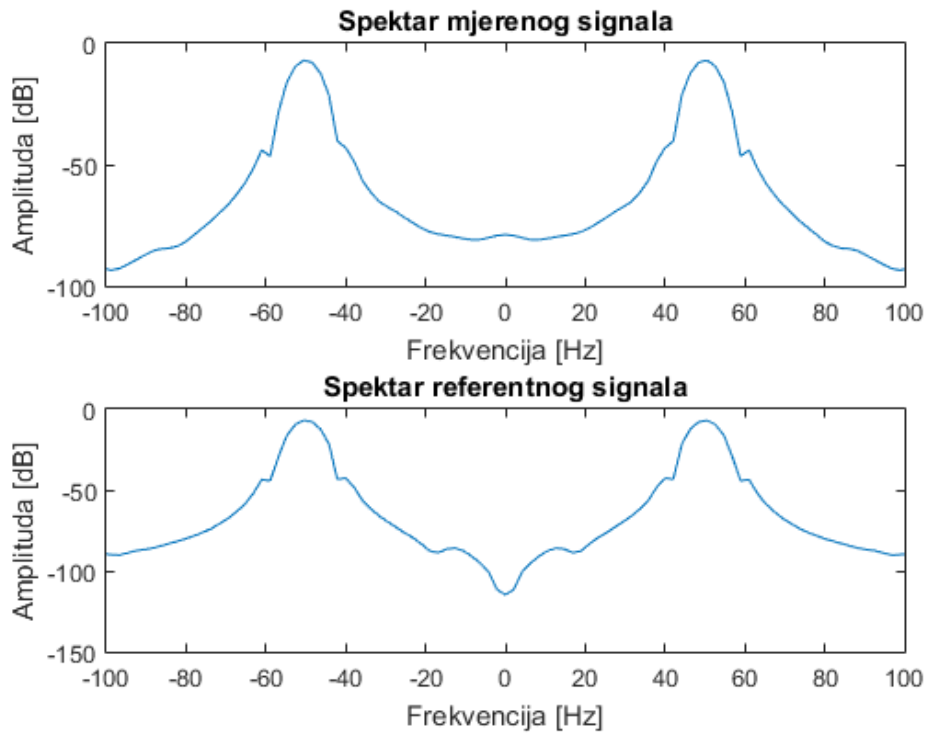
Slika 3.10: Generirani signali za simulaciju

Zbog superponiranog šuma signali učestalo prolaze kroz nulu te je *zero crossing* metoda na ovakvim signalima neprimjenjiva [16]. Za uklanjanje šuma signali se filtriraju pojasno propusnim Butterworthovim filtrom graničnih frekvencija 45 Hz i 55 Hz. [11] Izgled signala nakon filtriranja vidljiv je na slici 3.11.

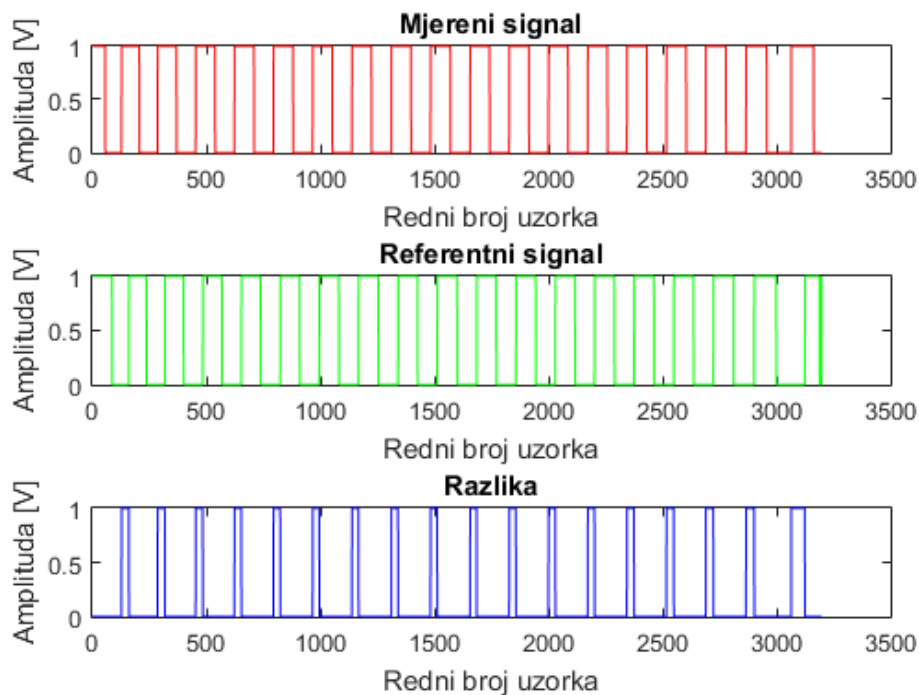


Slika 3.11: Signali nakon filtriranja

Nakon filtriranja šum je uklonjen. Modulacija amplitude ne utječe na mjerenje jer su frekvencija signala i fazni pomak ostali očuvani [13]. Izgled spektra vidljiv je na slici 3.12, dok su na slici 3.13 prikazani signali generirani za *zero crossing* metodu.



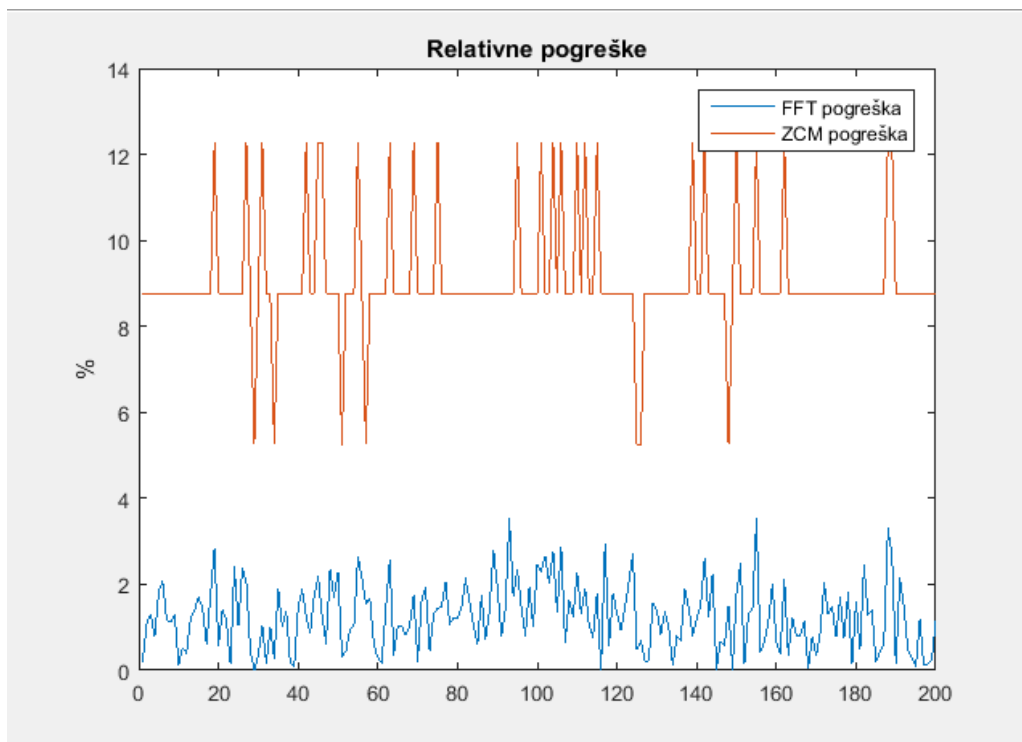
Slika 3.12: Spektar filtriranih signala



Slika 3.13: Signali za određivanje faznog pomaka *Zero Crossing* metodom

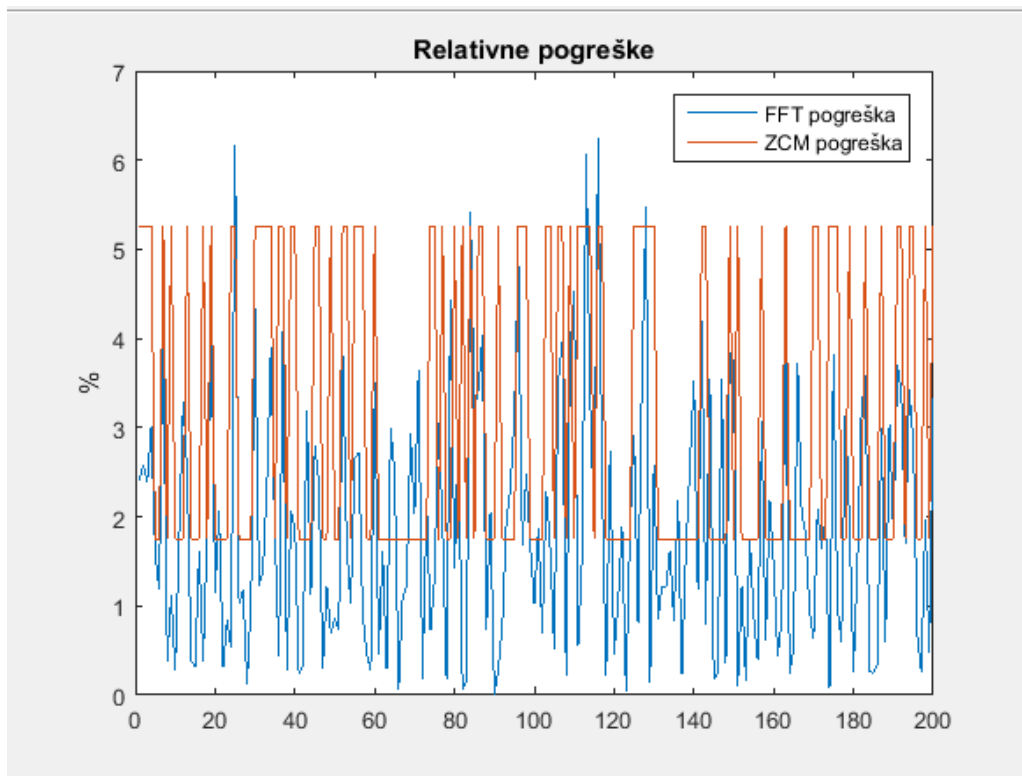
Za usporedbu dviju metoda generirano je 200 slučajnih procesa. Fazni pomak između dva generirana signala iznosi $\pi/3$. U svakom slučajnom procesu se na generirane signale superponira bijeli šum. Za svaki proces izračunata je relativna pogreška. Prikaz relativnih pogrešaka

vidljiv je na slici 3.14.



Slika 3.14: Usporedba relativnih pogrešaka estimacije faze FFT i *Zero Crossing* metode

Za fazni pomak $\pi/3$, metoda pomoću FFT-a daje manju relativnu pogrešku. Iz grafa je vidljivo da *zero crossing* metoda daje relativnu pogrešku čiji iznos uglavnom varira između dvije vrijednosti. Kada se mjere manji kutovi, situacija se mijenja. Za signale pomaknute za fazni pomak od $\pi/6$ proveden je isti postupak. Prikaz relativnih pogrešaka nalazi se na slici 3.15.

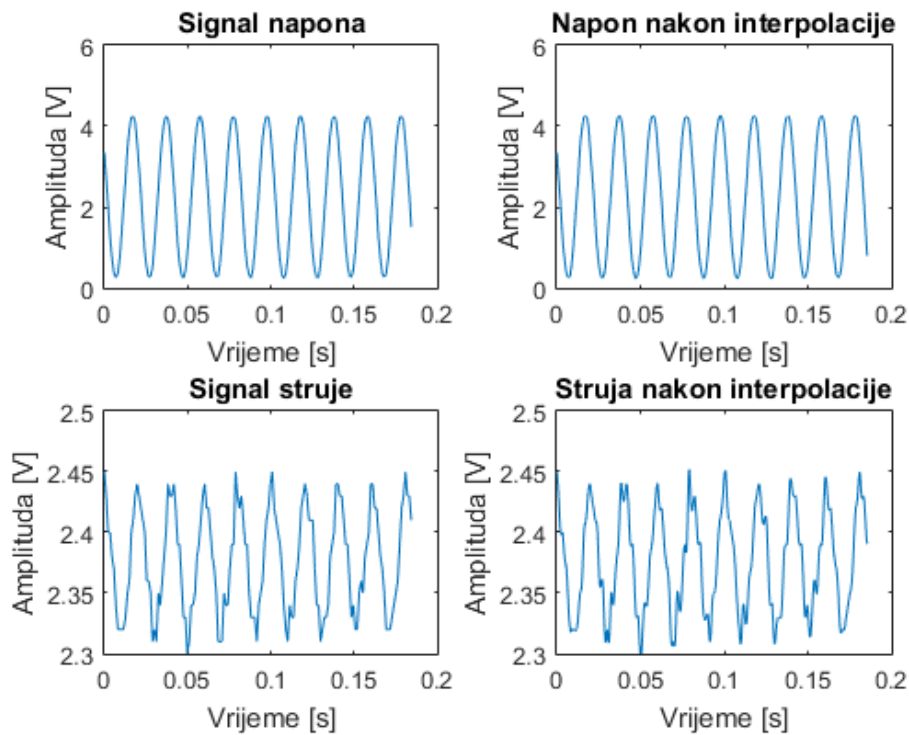


Slika 3.15: Relativne pogreške za fazni pomak od $\pi/6$

Iako je srednja vrijednost relativne pogreške FFT metode manja od srednje vrijednosti relativne pogreške *zero crossing* metode, apsolutni iznos pogreške FFT metode za pojedine slučajne procese premašuje apsolutni iznos pogreške *zero crossing* metode. Stoga će za estimaciju faznog pomaka napona i struje biti korištene obje metode.

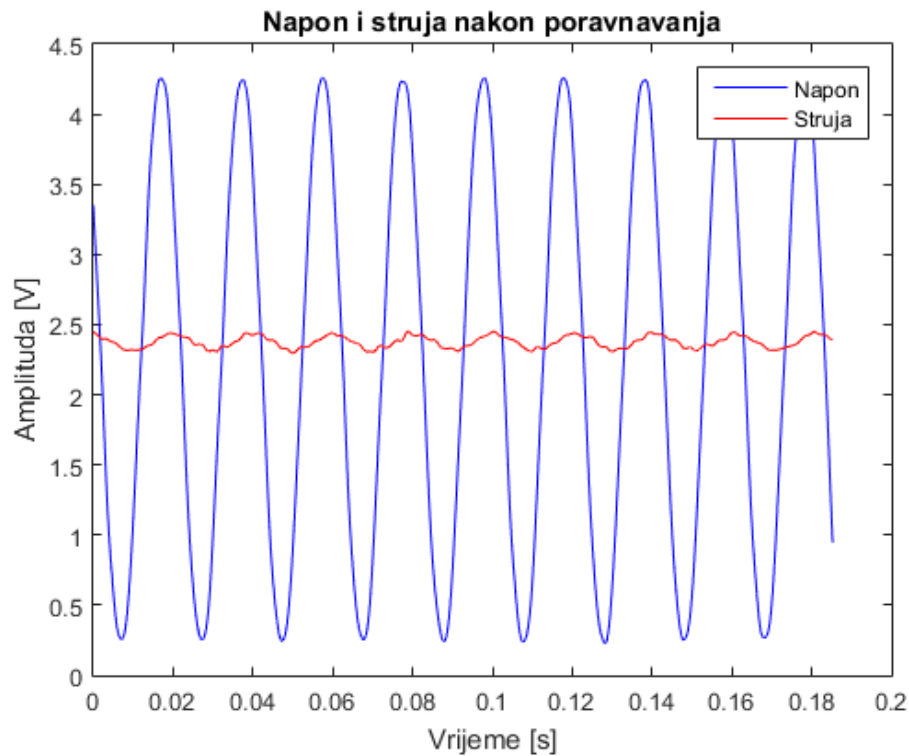
3.3.5 Estimacija faznog pomaka realnih signala

Uzorci napona i struje prikupljeni su pomoću A/D pretvornika na Arduinu. Na slici 3.16 prikazani su uzorci signala napona i struje te njihove interpolirane verzije. Signal struje je zapravo naponski signal proporcionalan jakosti struje prikupljen s Hallovog senzora. Iznos struje u amperima može se dobiti množenjem s određenim faktorom [6]. Kako je za mjerenje bitan samo fazni pomak, nije rađena ta transformacija.



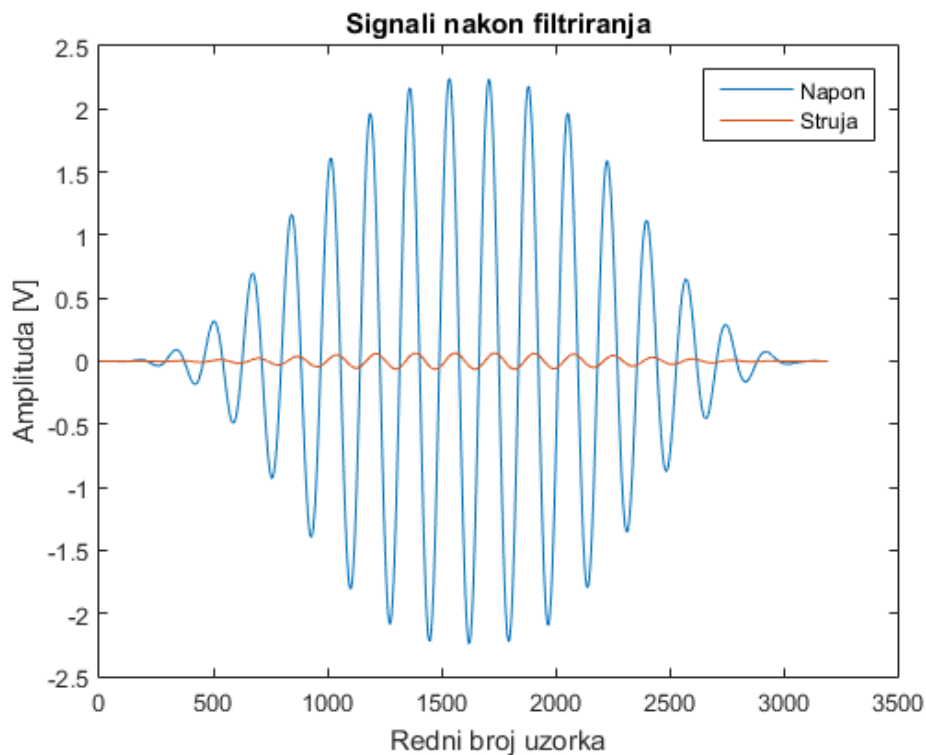
Slika 3.16: Uzorci napona i struje nakon A/D pretvorbe

Nakon interpolacije potrebno je poravnati signale kako bi se uklonio fazni pomak uzrokovan vremenom A/D pretvorbe Arduina. Izgled signala nakon poravnavanja vidljiv je na slici 3.17.



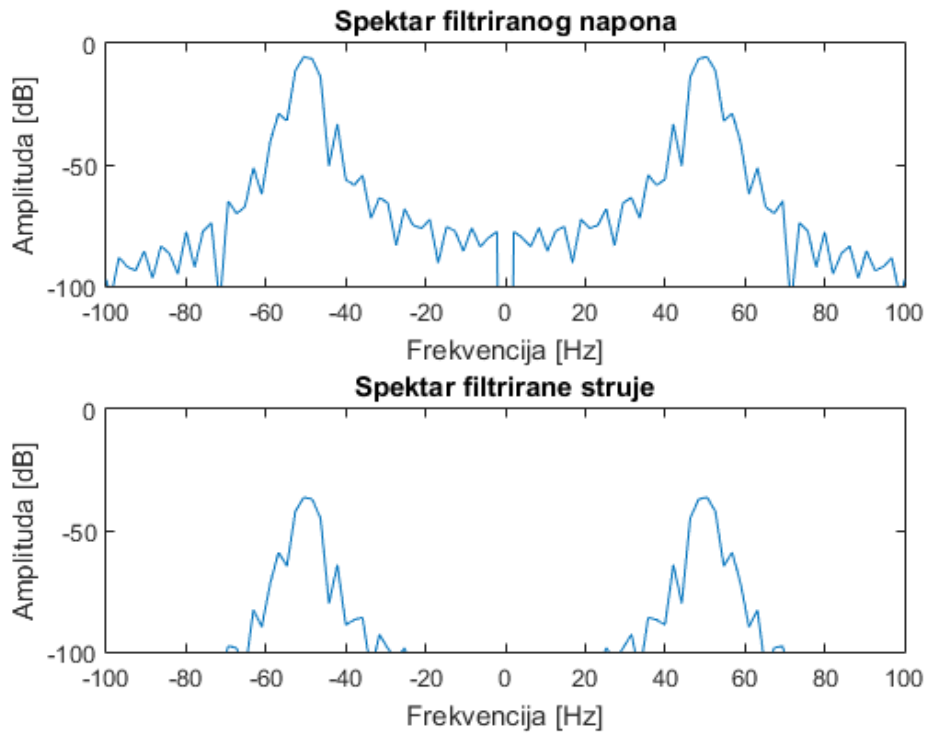
Slika 3.17: Napon i struja nakon poravnavanja

Kako bi se uklonile smetnje sadržane izvan očekivanog frekvencijskog pojasa signala, signali su filtrirani Butterworthovim pojasnopropusnim filtrom četvrtog reda. Izgled filtriranih signala prikazan je na slici 3.18.



Slika 3.18: Napon i struja nakon filtriranja

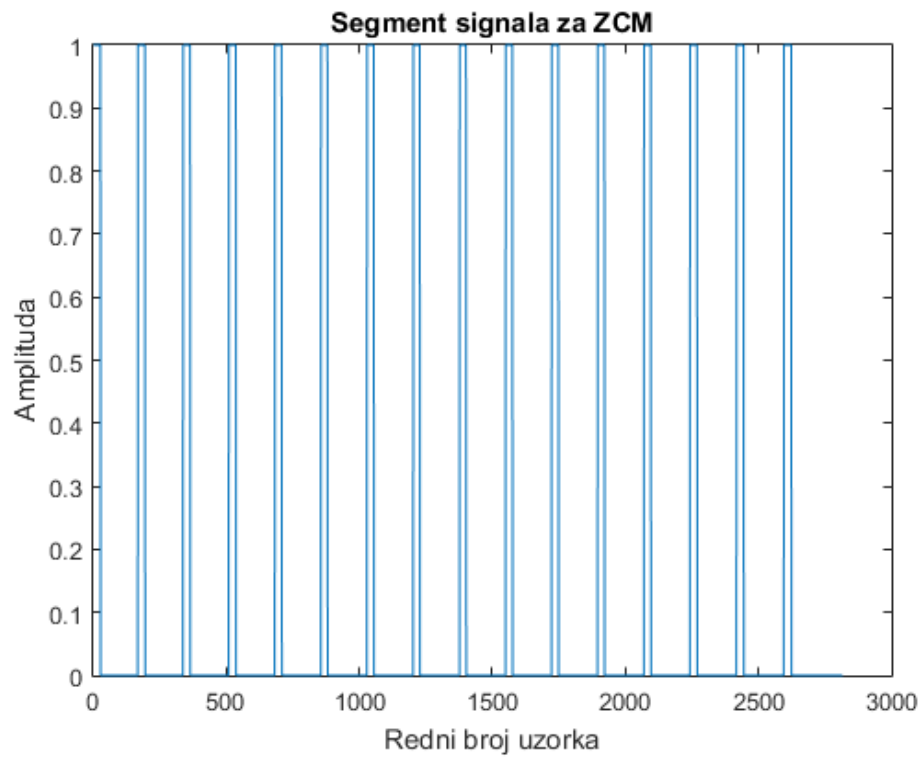
Fazni pomak je prvo estimiran pomoću FFT-a. Izgled spektra signala vidljiv je na slici 3.19.



Slika 3.19: Spektar napona i struje

Fourierova transformacija signala očekivano ima maksimum oko 50 Hz. Fazni pomak dobi-
ven ovom metodom iznosi $\varphi = 0.9394$ rad.

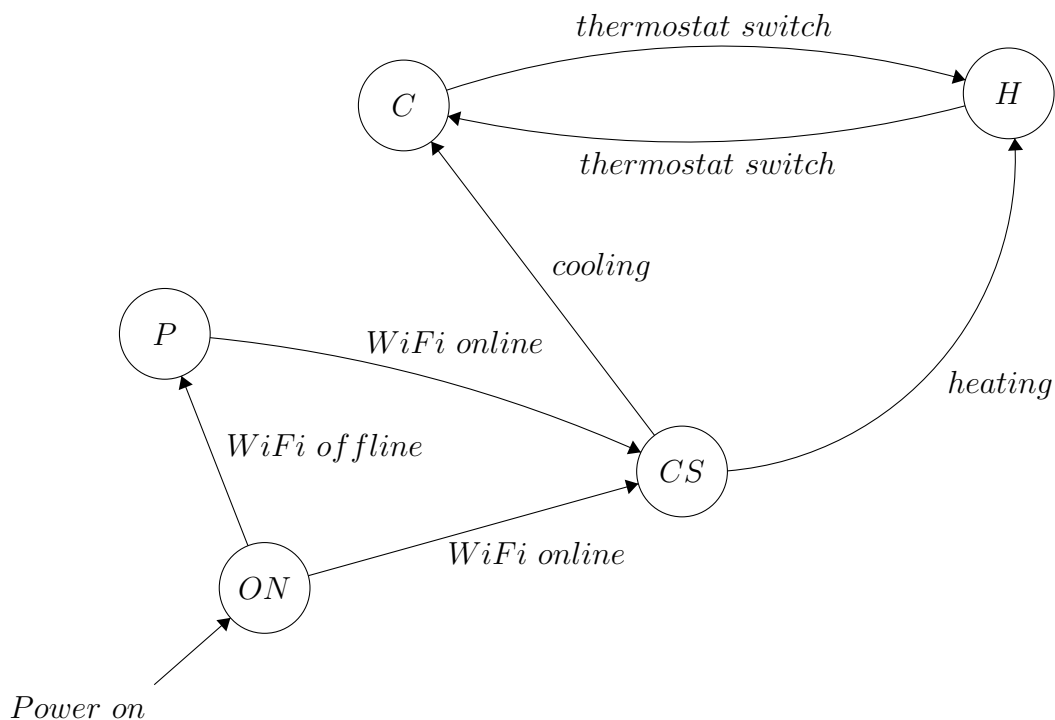
Nakon estimacije pomoću FFT-a, provedena je kontrolna estimacija pomoću *zero crossing*
metode. Na slici 3.20 prikazan je segment signala konstruiran za estimaciju faznog pomaka
pomoću *zero crossing* metode. Estimirani fazni pomak iznosi $\varphi = 0.9553$ rad.



Slika 3.20: Segment signala za *zero crossing* metodu

4. Algoritam modula izvora fleksibilnosti

Algoritam koji se izvršava na modulima unutar samih hladnjaka dizajniran je na način da obavještava agregatorski server o trenutnom stanju hladnjaka te naučenim karakteristikama hladnjaka, u intervalima koje server može narediti. Također, upravlja hladnjakom prema naredbi agregatora, pri tome poštujući reference koje je zadao korisnik. Programski, modul je konačni automat stanja (opisan u [17]), gdje su stanja definirana globalnim varijablama. Grubi prikaz ovog automata vidljiv je na slici 4.1.



Slika 4.1: Prikaz automata stanja modula

Stanja su definirana kao:

- ON - paljenje modula
- P - uspostavljanje pristupne točke
- CS - provjera trenutnog stanja hladnjaka (hlađenje ili grijanje)
- C - hladnjak u stanju hlađenja

- H - hladnjak u stanju zagrijavanja (kompresor isključen)

Pri paljenju modula, vrši se pokušaj spajanja na WiFi mrežu, koji ovisno o uspješnosti rezultira uspostavljanjem pristupne točke ili nastavkom u provjeru stanja hladnjaka. U svakom slučaju, automat završava u provjeri stanja hladnjaka te konačno u petlji hlađenja i zagrijavanja hladnjaka u kojoj i provodi većinu radnog vremena. Detaljni opisi ovih stanja i tranzicija nalaze se u poglavljima koja slijede. Bitno je napomenuti da u slučaju gubitka WiFi veze ili napajanja modul ponovno odlazi u stanje *ON*.

4.1 Povezivanje na WiFi i postupak u slučaju nepravilnosti

Za normalan rad sustava bitno je omogućiti povezanost senzorskog čvora s WiFi mrežom te odrediti korake koji će, ukoliko dođe do prekida veze, vratiti sustav u normalno stanje. Algoritam predviđa situacije poput kratkotrajnog gubitka WiFi mreže te promjene lozinke ili imena WiFi mreže.

Nakon paljenja modula, iz EEPROM-a (*engl. Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*) se čitaju SSID (*engl. Service Set Identifier*) i lozinka WiFi mreže. SSID je jedinstveni identifikator kojime se identificira pojedina WiFi mreža. EEPROM je vrsta pohrane podataka u elektroničkim uređajima koji te podatke čuva i nakon prestanka napajanja. Za operacije čitanja i pisanja SSID-a i lozinke iz EEPROM-a razvijena je klasa *Memory* koja se sastoji od metoda *memory_read* i *memory_write*. Metoda *memory_read* vraća strukturu tipa *Parameters* koja se sastoji od dvije varijable tipa *String* - SSID i *password*. Metoda *memory_write* kao argument prima dvije varijable tipa *String* koje zatim upisuje u EEPROM.

Nakon čitanja SSID-a i lozinke iz EEPROM-a, kreće pokušaj spajanja na mrežu. Ako su SSID i lozinka ispravni, WiFi modul bi se trebao spojiti kroz nekoliko sekundi te krenuti s izvršavanjem algoritma opisanim u daljnjim točkama. Ako se modul ne uspije spojiti na WiFi mrežu, razlog može biti nepostojanje mreže, krivi SSID ili lozinka mreže ili prvo paljenje modula.

Kada WiFi modul izgubi vezu, prvo se provjerava postoji li mreža čiji je SSID je zapisan u EEPROM-u. Ako postoji modul, još jednom pokušava uspostaviti WiFi vezu. Ako se veza uspostavi, modul kreće s izvršavanjem algoritma opisanim u daljnjim točkama. Ako se veza nije uspostavila, pretpostavlja se da je korisnik promijenio lozinku te modul pali vlastiti access point (pristupnu točku za spajanje bežičnom mrežom) i pokreće server kako bi se korisniku omogućilo da preko bilo kakvog uređaja koji podržava WiFi komunikaciju unese novu lozinku koja se sprema u EEPROM modula. Kada WiFi modul izgubi vezu, a prilikom provjere mreža se ustanovi da mreža sa SSID-om zapisanim u EEPROM ne postoji, čeka se 20 minuta da se mreža pojavi. Tijekom tih 20 minuta se svaku minutu provjerava je li se mreža pojavila. Ako

se ni nakon 20 minuta mreža ne pojavi, WiFi modul pali *access point* te pokreće server kako bi korisnik jednostavno mogao unijeti parametre svoje WiFi mreže. Stoga je prilikom prvog puštanja u rad WiFi modula potrebno pričekati 20 minuta kako bi se unijeli SSID i lozinka WiFi mreže na koju se modul spaja.

Izmjena parametara WiFi mreže vrši se tako da WiFi modul uđe u tzv. *soft access point* način rada. Korisnik se zatim spaja na WiFi mrežu modula. Nakon spajanja potrebno je otvoriti internetski pretraživač te unijeti IP (*engl. Internet Protocol*) adresu WiFi modula koja glasi 192.168.4.1. Kada internetski pretraživač pošalje zahtjev za tom stranicom, modul odgovara s HTML (*engl. HyperText Markup Language*) stranicom na kojoj se nalazi forma za unos parametara mreže. Kada korisnik upiše SSID i lozinku u zadana polja, potrebno je odabrati *Submit* za spremanje parametara. Nakon što se odabere *Submit*, pretraživač šalje novi zahtjev (GET request²) kojeg modul izdvoji SSID i lozinku te odgovori s novom HTML stranicom kako bi korisnik znao da su promjene pohranjene. Izdvojeni SSID i lozinka se upisuju u EEPROM kako bi bili dostupni i nakon gašenja modula. Nakon upisa parametara u EEPROM, kreće čitanje istih iz EEPROM-a te pokušaj spajanja. Time se zaokružuje cijeli algoritam.

Radi preglednosti koda, napravljene su još dvije klase. Klasa *Connect* ima metode *connectWPA2*, koja spaja modul na WiFi mrežu, te *giveSoftAP*, koja stavlja modul u *soft access point* način rada. Klasa *WebPage* ima četiri metode. Metoda *prepareHtmlPage* odgovara na GET zahtjev s HTML stranicom za unos SSID-a i lozinke. Metoda *prepareHtmlConfirm* odgovara na GET zahtjev s HTML stranicom koja obavještava korisnika o pohrani parametara mreže. Metoda *page* određuje koju stranicu treba poslati na GET zahtjev. Posljednja metoda *urlToAscii* transformira znakove iz UTF-8 zapisa u Ascii zapis.

4.2 Učenje karakteristika hladnjaka i suradnja s agregatorom

Algoritam je izveden na način da se pri gubitku WiFi veze ili resetiranjem modula prvi ciklus hladnjaka (hlađenja ili grijanja) preskače. Ovo je nužno jer nije poznato kada je ciklus započeo, pa ga ne možemo koristiti u mjerenjima.

Nakon prvog ciklusa, ako je modul prvi put instaliran u hladnjak, vrše se početna mjerenja. Početna mjerenja čini 3 do 6 mjerenja punih ciklusa (hlađenje i grijanje) tokom kojih modul bilježi granične temperature - one na kojima se termostat uklapa ili isklapa - te duljine ciklusa. Ovdje je bitno napomenuti da postoji nadvišenje u odzivu temperature u hladnjaku zbog kojega je iskoristivi ciklus smanjen. Ova pojava nije toliko izražena na hladnjacima većih dimenzija i

²GET zahtjevi u HTTP-u su zahtjevi za podacima od strane sugovornika u komunikaciji (npr. servera)

punijih namirnicama.

Kako naučene karakteristike ne bi bile izgubljene prestankom napajanja ili sličnim problemima, modul pohranjuje ključne varijable u EEPROM (stabilnu memoriju) u pravilnim intervalima. Pri paljenju se te varijable učitavaju u radnu memoriju i modul nesmetano nastavlja operaciju.

Završetkom početnih mjerenja modul se prvi put javlja agregatorskom serveru s podacima (opis agregatorskog algoritma i navedenih podataka nalazi se u poglavlju 4.3):

- *currentlyRunning*,
- *timeAvailable*,
- *averageCooling*,
- *averageHeating*,

koji redom indiciraju: trenutno stanje kompresora (upaljen ili ugašen), procjenu vremena dostupnosti u slučaju da hladnjak trenutno postane izvor fleksibilnosti, prosječno vrijeme hlađenja te prosječno vrijeme grijanja.

Prosječna vremena hlađenja i grijanja modul uči principom pomičnog prosjeka (*rolling average*) u kojemu nakon svakog ciklusa pohranjuje djelomično staru vrijednost prosjeka, a djelomično onu tek izračunatu. Faktor učenja može se mijenjati, s time da je unaprijed zadano 30% nove vrijednosti.

Procjena vremena dostupnosti vrši se na temelju trenutne točke u ciklusu te dotadašnjeg zabilježenog prosječnog vremena hlađenja, odnosno grijanja, uz mali faktor umanjenja zbog mogućeg otvaranja vrata tijekom rada i sl. Ako je hladnjak u dijelu ciklusa u kojem temperatura nadilazi granične vrijednosti, postaviti će dostupno vrijeme na 0 kako bi ga agregator ignorirao.

U standardnom ciklusu hladnjaka modul čeka promjenu stanja termostata te potom bilježi prekretnu temperaturu i duljinu iskoristivog ciklusa. Ova ovisnost o termostatu ključna je kako bi korisnici i nakon ugradnje modula imali kontrolu nad intenzitetom hlađenja uređaja.

Modul se u intervalima javlja agregatorskom serveru s već navedenim podacima i očekuje odgovor. U slučaju da spajanje na server nije moguće, čeka se do sljedećeg vremena javljanja te se provjerava stanje WiFi veze. U odgovoru od servera modul dobiva informaciju koliko često da se javlja ubuduće te koje stanje kompresora agregator zahtijeva. Iako agregator ne bi

smio zahtijevati da hladnjaci s premalnim vremenom dostupnosti rade kao izvori fleksibilnosti, u slučaju da se to i dogodi modul će takvu naredbu ignorirati. Samo u slučaju opravdane i smislene naredbe će modul uporabiti hladnjak kao izvor fleksibilnosti.

4.3 Poteškoće u radu modula i potencijalna rješenja

Cilj modula je agregatoru pružiti maksimalnu kontrolu i fleksibilnost pri upravljanju, ali u isto vrijeme ne opterećivati korisnika niti ni na koji način ne ugrožavati primarnu funkciju uređaja - da drži namirnice u temperaturnom rasponu kojeg korisnik zadaje.

Najveća mana trenutne izvedbe jest korištenje termostata koji dolazi s hladnjakom. Ovo je nužno kako bi korisnik mogao zadavati referencu, ali zbog svoje histereze stvara problem pri ulasku i izlasku iz fleksibilnog načina rada. Razlog je taj što se u fleksibilnom načinu rada ne 'sluša' termostat, te ikakva promjena reference neće biti zabilježena do sljedećeg punog ciklusa. Ideja je da se termostat izbací - za mjerenje temperature modul već ima termometar - i zamijeni potenciometrom pomoću kojeg bi se zadavala referenca. Za razliku od termostata, čiju referencu možemo očitati jedino pri izmjeni ciklusa, potenciometar se može očitati bilo kad, što praktično eliminira probleme s tranzicijom u ili iz fleksibilnog načina rada.

Tu je i problem nadvišenja temperature pri izmjeni ciklusa. Kada se kompresor pali, nadvišenje je maleno jer rashladno sredstvo počinje cirkulirati gotovo odmah, ali kad se kompresor gasi, rashladno sredstvo koje je tada puno hladnije od unutrašnjosti hladnjaka nastavlja preuzimati toplinu i temperatura padne za dodatnih 1.5 stupnjeva što značajno produžuje ciklus grijanja. Vrijeme u nadvišenju je za sad mrtvo vrijeme, tj., neiskoristivo za agregatora.

5. Agregatorski algoritam

Kako bi se omogućilo upravljanje energijom potrebno je razviti algoritam paljenja i gašenja pojedinih hladnjaka. Također je potrebno poznavati trenutnu količinu električne energije koju hladnjaci troše. Agregator ima mogućnost zatražiti promjenu potrošnje električne energije bilo da traži povećanje ili smanjenje njene potrošnje. Kako bi se ova funkcionalnost omogućila, potrebno je razviti algoritam koji će pojedinim uređajima javljati je li potrebno pojedini hladnjak ugaziti, upaliti ili ostaviti u trenutnom stanju kako bi se ispunili zahtjevi za energijom. Kaotična, nelinearna priroda ovog procesa, diskretizirano primanje podataka i utjecaj ljudskog faktora (npr. otvaranje vrata hladnjaka) čine optimalno upravljanje ovim procesom praktično nemogućim. Zbog toga je razvijeno nekoliko potencijalnih algoritama za upravljanje opisanih u ovom poglavlju. Navedeni algoritmi su testirani u poglavlju 5.3.

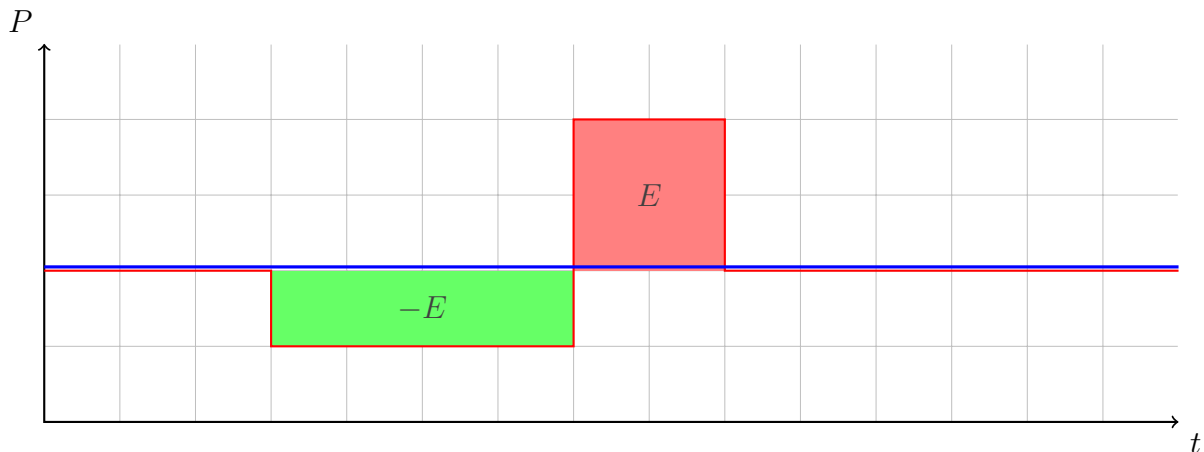
Prije izrade algoritama definirani su parametri koji određuju stanje svakog pojedinog hladnjaka:

- *currentlyRunning*,
- *timeAvailable*,
- *averageCooling*,
- *averageHeating*.

Parametar *currentlyRunning* može poprimiti vrijednosti 0 ili 1, ovisno o tome radi li hladnjak trenutno ili ne. Umjesto upravljanja temperaturom, koja se ne može isčitati iz termostata, te uz aproksimaciju sustava prema slici 5.2 moguće je estimirati maksimalnu, odnosno, minimalnu temperaturu. Parametri *averageCooling* i *averageHeating* određuju se mjerenjem u svakom hladnjaku. Njiovi iznosi mogu značajno varirati od hladnjaka do hladnjaka, ovisno o snazi i zapremnini hladnjaka. Parametar *timeAvailable* predstavlja vrijeme koje hladnjaku preostaje u suprotnom dijelu ciklusa ukoliko bi se ugasio u tom trenutku, npr., ako hladnjak trenutno hladi, *timeAvailable* bi bilo vrijeme potrebno da hladnjak ponovno počne hladiti, ukoliko bi se u tom trenutku hladnjak isključio. Uz navedene parametre, dostupni su i snaga hladnjaka te njegova zapremnina.

5.1 Verzija 1 - Trenutno gašenje uređaja na zahtjev

Kao što je u uvodu opisano, algoritam će, prema zahtjevu agregatora, ugasiti veći dio uređaja, čime će se gotovo trenutno promjeniti potrošnja u elektroenergetskom sustavu. Najveći je problem pri ovoj implementaciji upravo činjenica da se prosječna potrošnja svakog pojedinog hladnjaka **ne smanjuje**, već se potrošnja električne energije odgađa. Iz tog slijedi da je ukupna električna energija koja se u sustavu potroši **konstantna** te je manjak potrošnje potrebno kasnije nadoknaditi (slika 5.1).

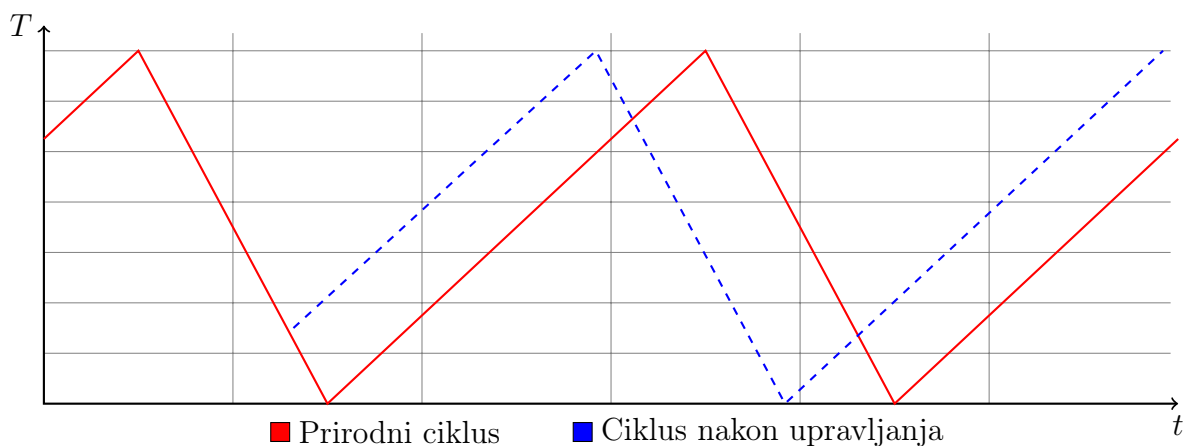


Slika 5.1: Očekivani odziv sustava na prirodnu kompenzaciju

Kako je sustav moguće opisati stohastički, može se pretpostaviti da je razdioba upaljenih, odnosno, ugašenih hladnjaka uniformna. To znači da je omjer upaljenih i ugašenih hladnjaka upravo omjer prosječnih *averageHeating* i *averageCooling* svih hladnjaka. Odluka koji se hladnjaci gase/pale određuje se tako da se zada fiksna razina ispod koje svi hladnjaci mijenjaju stanje. Povećavanjem te razine, trenutno se gasi/pali veći broj hladnjaka.

U ekstremnim slučajevima, kada je spomenuta razina preniska, gotovo da i nema agregacije, jer se ciklus hladnjaka premalo promjeni. U slučaju previsoke razine, gotovo trenutno će se svi hladnjaci ugasiti, a ciklus će im postati prekratak, što će dovesti do učestalog paljenja/gašenja hladnjaka, što pak nije poželjno zbog potencijalnih kvarova. Također, prekratak ciklus će podići prosječnu temperaturu hladnjaka što je nedopustivo. Parametar razine detaljnije je objašnjen u simulaciji (6.2.1).

Trenutnim paljenjem/gašenjem većeg dijela raspoloživih uređaja dolazi do oscilacija u elektroenergetskom sustavu (vidi potpoglavlje 6.2.1, slika 6.2). Uz veći broj dostupnih uređaja za upravljanje, moguće je određeni postotak uređaja koristiti za agregaciju, a ostatak za kompenzaciju opisanih oscilacija.

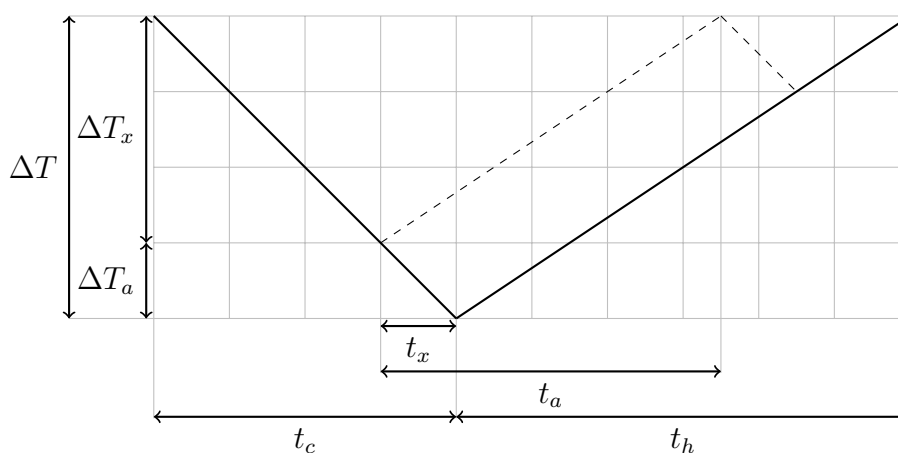


Slika 5.2: Upravljanje jednim hladnjakom

5.2 Verzija 1.5 - Prirodna kompenzacija

Jednostavna aproksimacija ciklusa hlađenja i grijanja prikazana je na slici 5.3. Puna linija prikazuje prirodan ciklus bez agregatorovog utjecaja, dok je isprekidana linija ciklus nakon iznenadne promjene iz hlađenja u grijanje.

Ideja iza prirodne kompenzacije je da se nakon djelovanja agregatora odredi trenutak u kojem je potrebno ponovno promijeniti stanje kompresora kako bi se ciklus vratio u svoj prirodni tok. Izračun trenutka u kojem se mjenja stanje kompresora vrši svaki uređaj zasebno, a temelji se na slici 5.3.



Slika 5.3: Prikaz izračuna trenutka kompenzacije

Iz sličnosti trokuta slijede jednadžbe:

$$\frac{t_x}{\Delta T_x} = \frac{t_c}{\Delta T} \quad (5.1)$$

$$\frac{t_a}{\Delta T_a} = \frac{t_h}{\Delta T} \quad (5.2)$$

Djeljenjem jednadžbe 5.1 jednadžbom 5.2 dobivena je jednadžba:

$$\frac{\Delta T_a t_x}{\Delta T_x t_a} = \frac{t_c}{t_h} \quad (5.3)$$

Sređivanjem izraza 5.3 dobiva se:

$$t_x = \frac{\Delta T_x t_c}{\Delta T_a t_h} t_a \quad (5.4)$$

Naposlijetku slijedi izraz za izračun vremena povratka u prirodni ciklus

$$t_c = t_a + t_x = \left(1 + \frac{\Delta T_x t_c}{\Delta T_a t_h}\right) t_a \quad (5.5)$$

Za prirodnu kompenzaciju očekuje se da će imati nadvišenje u upravljanju koje je posljedica činjenice da je srednja snaga sustava konstantna te se zbog toga sva snaga uzeta sustavu u nekom trenutku mora vratiti u sustav.

Očekivani odziv sustava prikazan je slikom 5.1. Plava linija prikazuje stacionarno stanje sustava dok crvena linija prikazuje odziv sustava na agregaciju i uz prirodnu kompenzaciju. Zeleni pravokutnik prikazuje energiju koju sustav predaje, a crveni pravokutnik prikazuje energiju koja je vraćena u sustav. Integral ispod plave linije i crvene linije ima jednaku vrijednost i ona iznosi P_{avg} .

5.3 Verzija 2 - Ograničenje snage

Prve verzije algoritama podrazumijevale su jedno gašenje i paljenje određenog postotka uređaja dostupnih agregatorskom sustavu upravljanja, ovisno o potražnji. Sa strane korisnika, ti su algoritmi idealni jer korisnik nikako nije u mogućnosti znati je li došlo do agregacije. Ukoliko su agregatoru na raspolaganju veće količine uređaja većih snaga, moguće je postići traženi odziv elektroenergetskog sustava.

Međutim, koristeći veći broj uređaja nije moguće postići svako željeno ponašanje elektroenergetskog sustava zbog ograničenog broja raspoloživih uređaja, odnosno, ograničene potrošnje raspoloživih uređaja. Iz tog se razloga omogućava gašenje/paljenje uređaja po potrebi, kada postaju dostupni agregatorskom sustavu. Uvodi se parametar nedostupnosti uređaja, t_{rec} , koje predstavlja koliko je vremena uređaj nedostupan za ponovno upravljanje, odnosno, koliko vremena ima na raspolaganju za oporavljanje. Poželjno je omogućiti da to vrijeme bude što je veće moguće kako korisnik ne bi primijetio da je došlo do agregacije.

Simulacije su pokazale (vidi potpoglavlje 6.2.1, slika 6.2) da se jednim trenutnim gašenjem/paljenjem većeg broja uređaja javljaju značajne oscilacije u elektroenergetskom sustavu. Umjesto odvajanja postotka uređaja za agregaciju i korištenja ostalih za kompenzaciju oscilacija, sada se svakom uređaju dodjeljuje opisano vrijeme oporavka, t_{rec} , te se nakon tog vremena

uređajem može ponovno upravljati kako bi se oscilacije kompenzirale.

U potpoglavlju 5.1 opisano je da je ukupna energija potrošena za rad svih uređaja konstantna. Iz tog razloga nije moguće pružiti agregaciju bez nadoknade energije. Problem nadoknade rješava se tako da se nakon faze agregacije ulazi u fazu kompenzacije, gdje se ne dopušta snazi da prijeđe unaprijed određeni nivo, što je ostvarivo ponovnim korištenjem uređaja nakon vremena t_{rec} . Ideja, kreacija i simulacija opisanog algoritma opisane su u potpoglavlju 6.2.1

6. Simulacija

Agregatorov algoritam upravljanja u svrhu uravnoteženja elektroenergetskog sustava testiran je na računalno generiranim testnim podacima budući da nije moguće dohvaćati podatke sa stvarnih uređaja jer ih nema dovoljno u pogonu. Iz istog razloga se provodi i računalna simulacija algoritama. U ovom poglavlju je opisano proces generiranja uzorka te rezultati provedbe simulacije. Sve simulacije izvedene su u programskom jeziku Java [18] u okruženju Spring [19]

6.1 Stvaranje uzorka za provedbu simulacija

Provedena je deterministička *offline* simulacija upravljanja na uzorku od 5000 uređaja. Uređaji se generiraju s određenim početnim stanjem te se kroz simulaciju to stanje deterministički mijenja. Stanje je definirano Tablicom 6.1.

Tablica 6.1: Definicija stanja uređaja

Vrijednost	Vrsta	Upravljivo	Promjenjivo
Stanje kompresora	Binarna vrijednost	Da	Da
Iskoristivo vrijeme	Prirodni broj	Ne	Da
Prosječno vrijeme grijanja	Prirodni broj	Ne	Ne
Prosječno vrijeme hlađenja	Prirodni broj	Ne	Ne

Stanje kompresora je dio stanja uređaja kojim je moguće upravljati, dok su ostali parametri stohastički određeni i fiksni za vrijeme cijele simulacije (predviđeno vrijeme se mijenja kako teče vrijeme simulacije, ali njime nije moguće upravljati).

U praksi se pokazalo da su trajanje hlađenja i grijanja hladnjaka u prosjeku u omjeru 2:3. Za potrebe ove simulacije korištena je diskretna jednolika razdioba, s korakom od 30 sekundi iz intervala navedenih u izrazima 6.1 - 6.2.

$$\text{Prosječno vrijeme hlađenja} \in [35, 45] \text{ min} \quad (6.1)$$

$$\text{Prosječno vrijeme grijanja} \in [55, 75] \text{ min} \quad (6.2)$$

Stanje kompresora određuje se prema izrazu 6.3 i to tako da interval unutar Heavisideove step

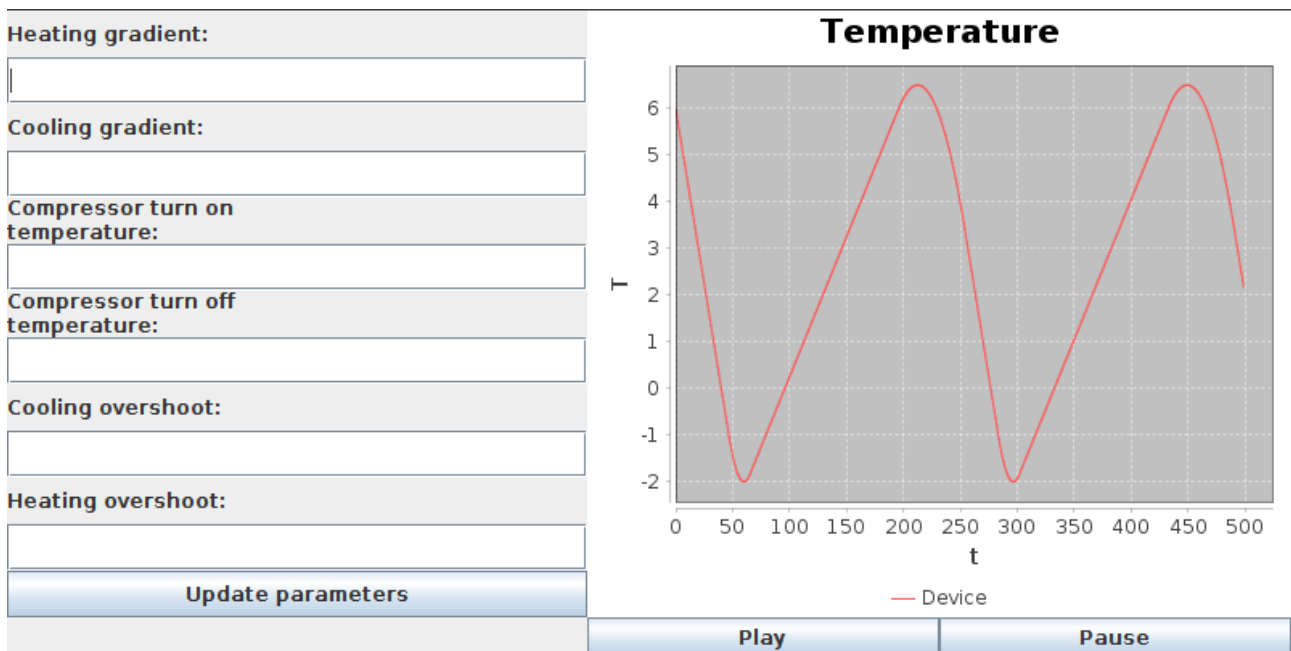
funkcije H predstavlja nasumično odabran broj u jednolikoj razdiobi unutar granica intervala.

$$\text{Stanje kompresora} = H([- \text{prosječno vrijeme grijanja}, \text{prosječno vrijeme hlađenja}]) \quad (6.3)$$

Kada su svi parametri određeni, određuje se početna vrijednost iskoristivog vremena. Iskoristivo vrijeme je parametar koji govori koliko dugo uređaj može pružiti snagu ako se kompresor isključi kada je uključen tj. koliko dugo može trošiti snagu ako se kompresor uključi kada je isključen. Početna vrijednost iskoristivog vremena određuje se prema izrazu 6.4 i to tako da se faktor za množenje prosječnog vremena bira iz intervala s diskretnom uniformnom razdiobom s korakom od 0.1.

$$\text{Iskoristivo vrijeme} = \begin{cases} \text{Prosječno vrijeme hlađenja} * [0, 1], & \text{Stanje kompresora} = 0 \\ \text{Prosječno vrijeme grijanja} * [0, 1], & \text{Stanje kompresora} = 1 \end{cases} \quad (6.4)$$

Ovakav način odabira parametara omogućuje stvaranje skupa podataka koji dobro prikazuju stvarno stanje, bez mnogo varijacija. U praksi se pokazalo da postoje hladnjaci koji imaju proječno vrijeme hlađenja i grijanja manje od desetak minuta, a također i oni kojima su ta vremena veća od sat vremena. Zbog jednostavnosti prve verzije algoritma (poglavlje 5.1) takve varijacije nisu uzete u obzir.



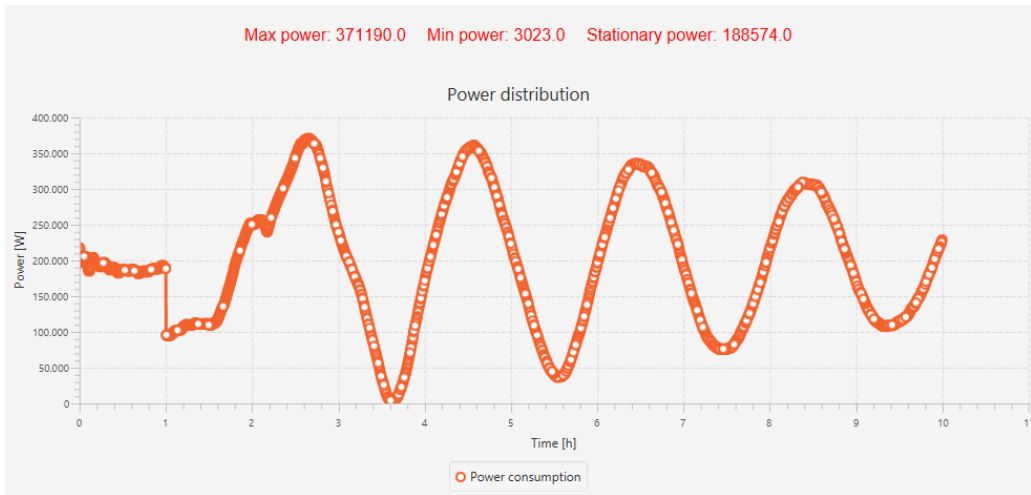
Slika 6.1: Grafičko sučelje za provjeru rada pojedinog simuliranog hladnjaka

6.2 Determinističke *offline* simulacije

6.2.1 Provedba i rezultati simulacije

Prva je simulacija provedena uz isključivanje svih uređaja koji se nalaze ispod zadane razine u trenutnom ciklusu s ciljem da se uoče mane slobodnog odziva sustava na impuls izazvan

trenutnim gašenjem većeg broja uređaja (slika 6.2). Parametare željene razine ciklusa $level$ i vremena početka agregacije t_{start} moguće je proizvoljno unijeti u simulaciju.



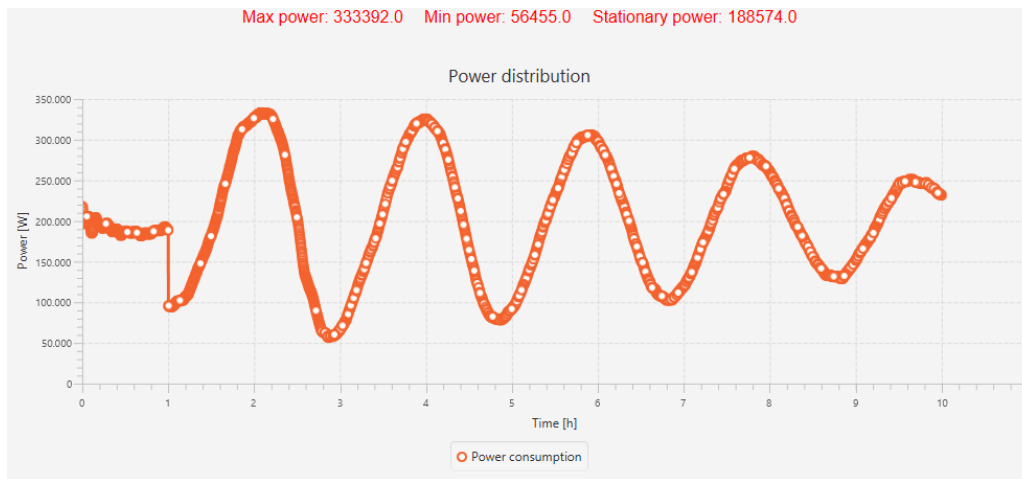
Slika 6.2: Slobodni odziv sustava na impuls uz $level = 0.5$

Do prvog sata sustav je bez pobude i predstavlja stacionarno stanje koje se nakon pobude očekuje u $t = \infty$. U $t = 1$ h nastupa impuls koji gasi pola dostupnih uređaja. Time je ostvarena manja potrošnja električne energije u početnom dijelu odziva. Tu nepotrošenu energiju sustav želi nadoknaditi pa se dalje u odzivu javlja veliko nadvišenje (gotovo 100%) u odnosu na stacionarno stanje što rezultira izuzetno oscilatornim odzivom.

Prvi pokušaj kompenzacije oscilacija u odzivu izveden je kontrolom manjeg broja uređaja. U simulaciju je uveden parametar *percentage* koji određuje postotak uređaja kojima se upravlja. Uz upravljanje sa samo 30% uređaja dobiven je odziv sa slike 6.3. Vidljivo je da se vrijeme u kojem se može pružiti manja potrošnja drastično skratilo, dok su oscilacije manje, ali i dalje prisutne.

Simulacija algoritma opisanog u poglavlju 5.2 pokazala se jednako lošom kao i slobodan odziv. Rezultati se razlikuju od očekivanih jer algoritam određivanja vremena povratka u prirodni ciklus nije dovoljno precizan. Kaotična priroda procesa zahtjeva jako precizno vraćanje uređaja u njihov prirodni ciklus, idealno u trenutak točno. Zbog velike nepreciznosti u vraćanju uređaja u prirodni ciklus, uzrokovane periodičnom vezom sa uređajima i stohastičkom promjenom temperature, ovakvo rješenje iako teoretski savršeno u simulaciji, a konačno ni u realnom sustavu nije moguće realizirati.

Problem oscilacija riješen je uključivanjem uređaja kada se trenutna potrošnja nađe ispod donje granice, odnosno isključivanjem kada se trenutna potrošnja nađe iznad gornje granice. Gornja i donja granica potrošnje određene su parametrom devijacije δ koji određuje koliki je postotak oscilacija dopušten u odnosu na stacionarno stanje. Kod ovakvog je upravljanja potrebno uračunati dostupnost uređaja za grijanje/hlađenje, pa je za svaki uređaj osigurano



Slika 6.3: Slobodni odziv sustava na impuls uz $level = 0.5$ i $percentage = 0.3$

vrijeme oporavka t_{rec} koje se također zadaje kao parametar. To je minimalno vrijeme koje mora proći između dva paljenja, odnosno gašenja uređaja. Jasno je da je vrijeme oporavka u korelaciji s prosječnim trajanjem ciklusa, ali za potrebe ovih simulacija opravdano je svim uređajima pridijeliti jednako vrijeme oporavka kako bi se vidio njegov utjecaj na odziv.

Zbog konstantnog paljenja i gašenja veće količine uređaja moguće je da nakon prestanka kompenzacije oscilacija opet nastupe oscilacije. Algoritam upravljanja potrebno je projektirati za takvu situaciju. U simulaciju je stoga ubačen još jedan parametar t_{comp} kojim je određena duljina trajanja kompenzacije. Taj je parametar usko povezan s parametrom devijacije δ .

U sklopu simulacije promatran je utjecaj jednog parametra na izgled odziva te međusobni utjecaj parametara u svrhu postizanja optimalnog odziva sustava. Najmanji utjecaj imao je parametar odmaka impulsa gašenja od početka simulacije. Kako je cijeli sustav kaotičan očekivano je da sustav neće biti vremenski zavisn što je i potvrđeno u simulaciji.

Parametar razine ciklusa, $level$ zaslužan je za visinu početnog impulsa (dubinu propadanja). Ukoliko je $level$ malen, znači da se uređaji gase ranije u ciklusu što u konačnici rezultira većim brojem ugašenih uređaja. Veličina postotka uređaja kojima se upravlja $percentage$ odgovorna je za dulje trajanje agregacije što za sobom povlači i veće oscilacije nakon agregacije.

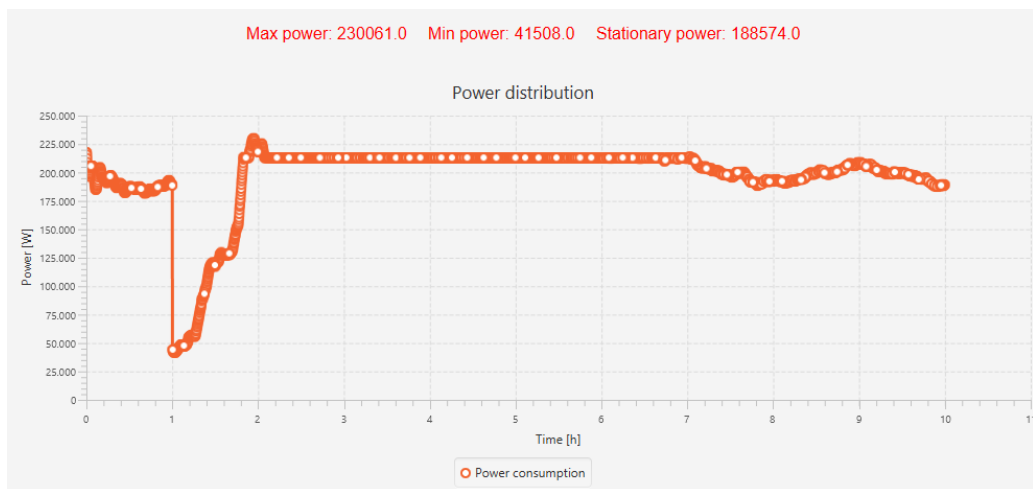
Devijacija δ predstavlja parametar dopuštenih oscilacija pri kompenzaciji. Male devijacije rezultiraju bržim paljenjem/gašenjem uređaja što nakon prestanka kompenzacije stvara velike oscilacije u sustavu. Devijacija je također odgovorna za smirivanje sustava nakon određenog vremena. Kako je ukupna energija potrošena u sustavu konstantna, nakon agregacije sustav će težiti većoj potrošnji. Devijacija će tu vrijednost ograničiti na neki iznos iznad stacionarne vrijednosti gdje će sustav nadoknaditi manjak energije uzrokovan agregacijom. Iz tog razloga, kada se energija agregacije izjednači s energijom dobivenom nakon agregacije, sustav će prestati

oscilirati te se na taj način određuje vrijeme t_{comp} .

Vrijeme nedostupnosti uređaja t_{rec} , devijacija δ i vrijeme prestanka kompenzacije t_{comp} utječu na odziv sustava nakon prestanka agregacije. Optimalan izbor navedenih parametara ostvaren je promatranjem utjecaja pojedinih parametara na sam odziv te promatranjem njihove međuzavisnosti.

Zadovoljavajući odziv sustava dobiven je uz parametre:

- Duljina trajanja simulacije, $t_{sim} = 10$ h
- Vrijeme početka agregacije, $t_{start} = 1$ h
- Razina ciklusa na kojoj uređaj gasi kompresor, $level = 0.23$
- Postotak uređaja kojim se upravlja, $percentage = 0.9$
- Devijacija od stacionarnog stanja, $\delta = 0.13$
- Vrijeme nedostupnosti uređaja, $t_{rec} = 30$ min
- Vrijeme prestanka kompenzacije, $t_{comp} = 7$ h



Slika 6.4: Optimalan odziv sustava

Na slici 6.4 je vidljiva velika dubina propadanja snage u početku agregacije zbog velikog broja ugašenih uređaja. Velikim brojem uređaja kojima se upravlja postignuto je gotovo sat vremena agregacije. U vremenu kompenzacije vidljivo je da oscilacija nema. Nakon prestanka kompenzacije, sustav dalje slobodno oscilira.

Prilikom odabira parametara kompenzacije nužno je da devijacija od stacionarnog stanja bude što manja i duljina trajanja kompenzacije što kraće. S druge strane, poželjno je da se uređajima što rjeđe šalju zahtjevi za promjenu stanja kompresora što je posljedica duljeg

vremena nedostupnosti uređaja. Uzevši to u obzir, može se reći da su odabrani parametri više nego optimistični.

7. Procjena za razvoj vlastitog elektroničkog modula

Glavne komponente koje elektronički modul mora imati nalaze se u sljedećoj tablici, a uz njih su navedene i okvirne cijene.

Tablica 7.1: Sastavnica glavnih komponenti elektroničkog modula

Komponenta	Cijena/kom [€]	Proizvođač	Link
Multiplexor	0,04	Nexperia	Avnet link
ESP8266-12F)	0,83	Espressif Systems	Alibaba link
Naponski regulator	0,15	STMicroelectronics	Mouser
Temperaturni senzor	0,66	Texas Instruments	Texas Instruments
Screw terminal 3P	0,035	INFINEON	Farnell
MOSFET Transistor	0,035	INFINEON	Farnell
5V Relej	0,0083	Songle	Alibaba
Otpornici	0,0044	YAGEO (PHYCOMP)	Farnell
LED diode (signalizacija)	0,040	KINGBRIGHT	Farnell
PNP transistor	0,68	UNISONIC TECHNOLOGIES CO	AliExpress

Ukupna cijena glavnih komponenti za jedan modul iznosi 2,46€ , odnosno 18,45 kuna.

U nastavku su opisani bitni dijelovi elektroničkog modula koji su za sada odvojeni, ali će se u budućnosti integrirati na jednoj tiskanoj pločici ukoliko se bude radilo o vanjskoj izvedbi elektroničkog modula (nasuprot onog integriranom pri proizvodnji).

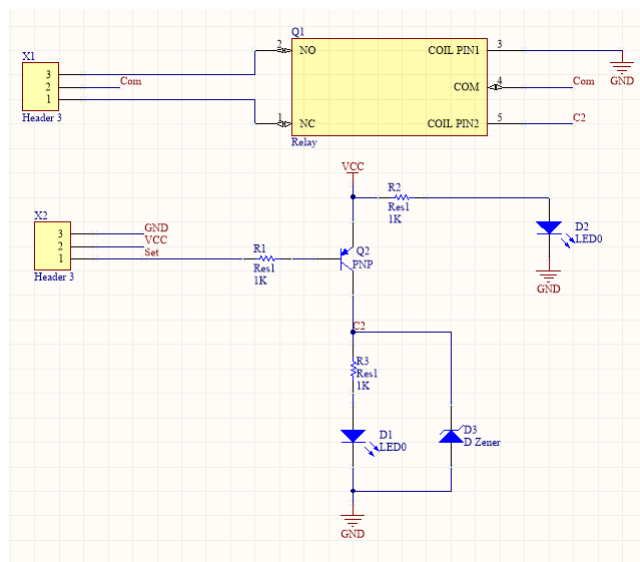
7.1 Relejni modul

U prototipnom izdanju i testiranju korišten je gotov relejni modul prikazan na slici 7.1.



Slika 7.1: Relejni modul

Zbog redukcije i cijene i prostora na tiskanoj pločici gotovog proizvoda, idealno bi bilo projektirati vlastiti relejni sklop, za razliku od „off-the-shelf“ kupovanja kao što je napravljeno u testiranju. Ekvivalentna shema relejnog kruga prikazana je na slici 7.2.



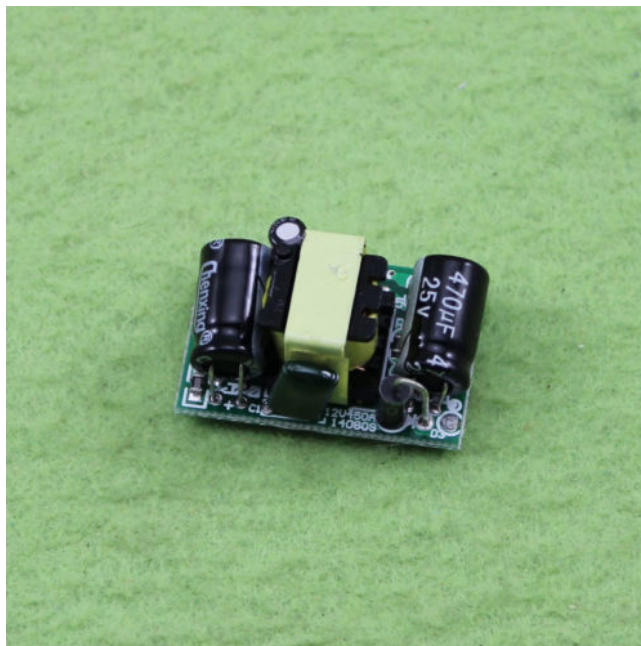
Slika 7.2: Električna shema relejnog modula

Shema se sastoji od svega par komponenti: glavnog relejnog modula, tri otpornika iznosa $1\text{ k}\Omega$, dvije LED diode koje primarno služe za signalizaciju i jedne Zener diode koja služi za postavljanje reference i zaštite.

Kada PNP tranzistor Q2 ne vodi, svijetli samo dioda D2 jer je relejni modul spojen na napajanje (ova dioda svijetli uvijek kada je relej spojen na napajanje). Kada Q2 provede, pali se i LED D1 koja signalizira propusnost na releju. Naime, jedna priključnica releja je spojena na kolektor tranzistora te kada je on u propusnom stanju postavlja visoku naponsku razinu za koju se tada zna da relej propušta [10].

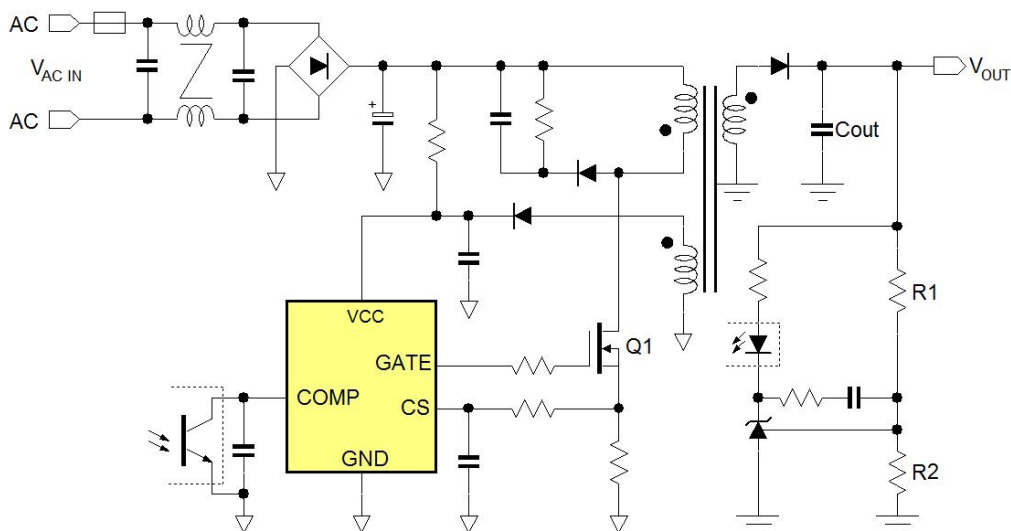
7.2 AC/DC pretvarač

Većina hladnjaka za koje je namijenjen ovaj projekt unutar svoje konfiguracije radi na napajanju 220 V AC . Elektronika korištena u ovom projektu radi na napajanju od 5 V i 3.3 V DC . Potreban je AC/DC pretvarač s 220 V AC na 5 V DC ili 220 V AC na 12 V DC i zatim naponski regulator s 12 V na 5 V . Trenutno je korištena prva varijanta s već gotovim modulom izrazito niske cijene 1.13€ tj. 8.50 kuna. Na idućoj slici je prikazan taj pretvarač. Jedna od mana kupovnih pretvarača je ta što vrlo vjerojatno ne bi mogli proći certifikaciju elektroničkih proizvoda. Iz tog razloga javlja se potreba za izradom vlastitog pretvarača pa je potrebno analizirati i vidjeti je li je uopće isplativo napraviti jedan takav pretvarač.



Slika 7.3: 220AC-5DC Silazni pretvarač

Kao što je ranije navedeno radi se o flyback tipu pretvarača. Jednu izvedbu flyback pretvarača moguće je vidjeti na sljedećoj slici³.



Slika 7.4: Elektronička shema flyback pretvarača

U nastavku slijedi okviran opis rada i bitnih komponenti tog sustava [20] [21]. Ulazni napon dovodi se na prilazne stepaljke pretvara. Taj napon se najčešće ispravlja pomoću ispravljača u Graetzovom spoju. Prije njega najčešće se spaja zaštitni krug kako nebi došlo do preopterećenja dioda u Graetzovom spoju. Ispravljeni napon potom dolazi na razne kondenzatore koji stabiliziraju izlazni napon na vršnu vrijednost od tražene, koja potom dolazi na transformator. Struja se kroz transformator povećava linearno, te ,zbog tranzistora (Q1 na shemi), u jednom trenutku počne padati kada on prestane voditi [20]. Tako se napon prenosi na sekundarnu stranu putem transformatora. Tranzistorom upravlja kontroler posebno napravljana za tu namjenu. Na sekundarnoj strani transformatora postoji opet dioda i kondenzator koji potom ispravljeni napon vršno detektiraju i tu dobivamo na izlazu traženu DC- vrijednost. Ostatak kruga je pretežno upravljanje i zaštita te izvod za napajanje postojećeg kontrolera. Kao što je moguće vidjeti, najbitnije komponente u ovom sustavu su upravo tranzistor, kontroler i transformatori, dok su ostale komponente klasični dijelovi elektroničkih krugova te ne predstavljaju probleme kod nabave.

Popis glavnih komponenti i njihova cijena nalaze se u idućoj tablici. Tri navedene komponente su kontroleri za flyback pretvarače i oni su uglavnom najskuplja stavka.

³Slika preuzeta s <https://www.richtek.com/selection-guide/en/selection-flyback.html>

Tablica 7.2: Popis potencijalnih kontrolera flyback pretvarača

Komponenta	Cijena/kom [kn]	Proizvođač	Link
Tinyswitch4	3.89	Power Integrations	Power Integrations link
FSL106HR	1.75	ON semiconductor	Mouser link
NCP1060	2.92	ON Semiconductor	Mouser link

Kao što je vidljivo u prethodnoj tablici, kontroleri sami po sebi mogu iznositi čak i jednu šestinu cijene prethodne elektronike te time dižu donju cjenovnu granicu na otprilike 25 kn za potrošnu elektroniku. Naravno, ovdje u obzir nije uzeta cijena proizvodnje tiskane pločice, međutim vidi se iz priloženog da je ovakav uređaj zasigurno ekonomski isplativ, međutim zahtjeva invazivnu ugradnju što i nije poželjno kod krajnjeg korisnika.

Detaljnija analiza uštede i ekonomske isplativosti izvedena je ranije te se došlo do zaključka da krajnji korisnik zapravo i nema značajnih pogodnosti, najviše koristi dobiva upravo agregator te bi ugradnja ovakvih modula mogla biti problematična kod krajnjih korisnika. Iz tog razloga je najbolje ovakav sustav integrirati izravno prilikom proizvodnje hladnjaka.

8. Zaključak

Kako je osnovni preduvjet pogona elektroenergetskog sustava jednakost proizvodnje i potrošnje, integracija neupravljivih OIE povećava potrebu za uravnoteženjem elektroenergetskog sustava. S obzirom na smanjeni pogon konvencionalnih elektrana, zahtjevi za uravnoteženjem pomiču se na stranu potrošnje. Kako Europska Komisija prijedlogom zakonodavnog paketa "Čista energija za sve Europljanje" nastoji promijeniti model TEE, javlja se potreba integracije korisnika distribucijske mreže koji reagiraju na cjenovne signale u tržišta električne energije i pomoćnih usluga. Takve fleksibilne potrošače nazivamo distribuiranim izvorima fleksibilnosti. U ovom radu izrađen je i testiran prototip uređaja za upravljanje radom hladnjaka kojim bi upravljao agregator i tako posredno pružao fleksibilnost elektroenergetskom sustavu u ime krajnjeg potrošača.

Ustanovljeno je da zbog prirode manjih hladnjaka kao spremnika energije te vrlo male isplativosti korisnicima (reda nekoliko desetaka lipa mjesečno) hladnjaci standardnih dimenzija nisu najpovoljniji izbor za pružanje fleksibilnosti u smislu ostvarenja dodatnih prihoda, odnosno uštede za krajnje kupce. Veći sustavi hladnjaka, industrijskih dimenzija i samim time industrijske potrošnje, potencijalno su bolji izbor. Za krajnje potrošače najveći potencijal imaju klimatizacijski uređaji zbog relativno velike snage - u prosjeku 2-4 kW, naspram 50-500 W za hladnjake - te njihovih spremnika energije (prostorije u stanu ili kući) koji imaju znatno veću inerciju.

Za upravljanje postojećim uređajima potrebno je ugraditi modul opisan u poglavlju 6.2.1 što ujedno i predstavlja najveći problem ovakve izvedbe jer je postupak invazivan za krajnjeg korisnika. Za nove uređaje takav modul se može ugraditi prilikom proizvodnje uređaja što uvelike smanjuje troškove i ne uzrokuje gubitak garancije.

S obzirom na zahtjev za uravnoteženje elektroenergetskog sustava, u ovom je radu pokazano da je moguće upravljati ciklusom rada hladnjaka, odnosno aktivirati njegovu fleksibilnost. Opisan princip upravljanja ciklusom rada hladnjaka moguće je primijeniti i na hladnjake većih snaga, zamrzivače te ostale uređaje uz manje modifikacije. Time se daje prostor za bolju integraciju obnovljivih izvora energije u elektroenergetski sustav.

Sažetak

Autori: Ante Brizić, Luka Koščak, Luka Mandić, Karlo Mlakar, Jurica Papak, Ornela Rodić

Agregacija potrošača električne energije ključna je stavka u budućnosti razvoja elektroenergetskog sustava. Kako bi se olakšalo dinamičko uravnoteženje proizvodnje i potrošnje električne energije, predlaže se korištenje distribuiranih izvora fleksibilnosti. U konkretnom primjeru, kao distribuirani izvori fleksibilnosti koristi se veliki broj hladnjaka male snage. Za ovu potrebu se razvija hardverska i programska podrška sa strane pojedinog potrošačkog uređaja, ali i agregatorskog servera koji upravlja distribuiranim hladnjacima. Zaključeno je kako je ideja distribuiranih izvora fleksibilnosti provediva, kako softverski tako i hardverski. Razmatrani hladnjaci su male snage i kratkih ciklusa rada te je njihova primjena za uravnoteženje elektroenergetskog sustava ograničena, no identičan se koncept može primijeniti na uređaje većih snaga, primjerice na bojlere, klimatizaciju i ventilaciju.

Ključne riječi: agregator, distribuirani izvori fleksibilnosti, mjerenje potrošnje električne energije, WiFi komunikacija

Summary

Authors: Ante Brizić, Luka Koščak, Luka Mandić, Karlo Mlakar, Jurica Papak, Ornela Rodić

Aggregation of electricity consumers is a key in the future development of distribution system and energy markets. One solution is using demand response to dynamically balance electricity production and consumption. In this example, many refrigerators of small power consumption are aggregated to provide balancing services to the power system. For this purpose, both the supporting hardware and software is developed at the user side and the aggregator side. The results indicate that refrigerators are a viable sources of flexibility at the distribution level, but their outreach is limited due to low capacity. However, the identical concept can be applied to other sources of flexibility at the consumer side, e.g. electric heater, air conditioning and ventilation devices.

Keywords: aggregator, distributed sources of flexibility, power metering, WiFi communication

Zahvala

Zahvaljujemo se mentoru izv.prof.dr.sc. Hrvoju Pandžiću na pomoći i savjetima koje nam je pružio tijekom izrade ovog rada. Posebno se zahvaljujemo i dr.sc. Tomislavu Pavloviću koji nam je također uvelike pomogao prilikom izrade ovog rada.

Literatura

- [1] *O osnivanju Agencije Europske unije za suradnju energetske regulatora (preinaka)*, Europska komisija. Prijedlog DIREKTIVE EUROPSKOG PARLAMENTA I VIJEĆA.
- [2] I. Pavić, H. Pandžić, I. Štritof, M. Beus, and T. Capuder, *Tržište električne energije u Republici Hrvatskoj – Položaj distribuiranih izvora fleksibilnosti*, Fakultet elektrotehnike i računarstva.
- [3] *O unutarnjem tržištu električne energije (preinaka)*, Europska komisija. Prijedlog DIREKTIVE EUROPSKOG PARLAMENTA I VIJEĆA.
- [4] *O zajedničkim pravilima za unutarnje tržište električne energije (preinaka)*, Europska komisija. Prijedlog DIREKTIVE EUROPSKOG PARLAMENTA I VIJEĆA.
- [5] T. Capuder, *Tržište električne energije na razini distribucijskog sustava*, Fakultet elektrotehnike i računarstva.
- [6] *Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor with 2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor ACS712*, Allegro MicroSystems, Inc.
- [7] T. Williams, *The Circuit Designer's Companion*, 2005.
- [8] R. Magjarević, Z. Stare, M. Cifrek, H. Džapo, M. Ivančić, and I. Lacković, *Projektiranje tiskanih veza*, Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2009.
- [9] K. R. Fowler, *Electronic instrument design*, 1996.
- [10] P. Horowitz and W. Hill, *The art of electronics*, 2001.
- [11] D. Petrinović, D. Petrinović, R. Bregović, H. Babić, and B. Jeren, *Digitalna obradba signala - Upute za laboratorijske vježbe*, 2003.
- [12] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing*, 2009.
- [13] J. G. Proakis and D. G. Manolakis, *Digital Signal Processing*, 2006.
- [14] S. K. Mitra, *DIGITAL SIGNAL PROCESSING: a Computer-Based Approach McGraw-Hill Co. Inc. 1998*, McGraw-Hill Higher Education, 2010.

- [15] H. Stark and J. W. Woods, *Probability and Random Processes with Applications to Signal Processing*, 2002.
- [16] J. G. Webster, *Electrical Measurement, Signal Processing, and Displays*, 2004.
- [17] D. R. Wright, *Finite State Machines*, CSC216, 2005.
- [18] M. Čupić, *Programiranje u Javi*, Verzija knjige 0.3.26.
- [19] R. Johnson, J. Hoeller, A. Arendsen, C. Sampaleanu, R. Harrop, T. Risberg, D. Davison, D. Kopylenko, M. Pollack, T. Templier, E. Vervaet, P. Tung, B. Hale, A. Colyer, J. Lewis, C. Leau, M. Fisher, S. Brannen, R. Laddad, and A. Poutsma, *The Spring Framework - Reference Documentation*, 2004.-2008.
- [20] C. Basso, *Switch Mode Power Supplies: SPICE Simulations and Practical Designs*, 2008.
- [21] R. W. Erickson and D. Maksimović, *Fundamentals of Power Electronics, second edition*, University of Colorado, 2005.